



**Referat wygłoszony na posiedzeniu  
Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w Krakowie  
w dniu 9 marca 2022**

**dr inż. Bernadetta Pasierb**

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Warszawska 24, 31-155 Kraków,  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,  
Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej  
bpasierb@pk.edu.pl  
ORCID: 0000-0001-5616-7289

**Wykorzystanie metody ERT w badaniach 3D krasu węglanowego Zrębu Zakrzówka**

(Application of the ERT method in 3D studies of Zakrzówek Horst carbonate karst)

Śródmieście Krakowa wraz z jego zachodnimi i południowymi dzielnicami znajduje się w strefie siedmiu struktur zrębowych. Jedną z nich jest Zrąb Zakrzówka, umiejscowiony około 4 km od centrum, w kierunku południowo-zachodnim. Zrąb Zakrzówka utworzony został w wyniku alpejskich ruchów górotwórczych w paleogenie (Felisiak 1992). Jest to niewielkich rozmiarów, około 1 km<sup>2</sup>, wypiętrzona struktura tektoniczna ograniczona uskokami z płaską wierzchowiną, rozczłonkowana w zachodniej części systemem „schodkowych” uskoków (Jędrys & Krajewski 2002). Zrąb budują górnourajskie wapienie uławiczone, które w tym rejonie mają około 225m miąższości (Gradziński 1972; Krajewski & Olchowy 2021), na nich lokalnie występują utwory kredowe typu margle, wapienie margliste i piaszczyste wapienie. Rowy tektoniczne rozdzielające zręby wypełnione są utworami miocenu i przykryte osadami czwartorzędowymi (Sermet & Rolka 2013). Na obszarze zrębu znajdują się nieczynne kamieniołomy oraz liczne jaskinie krasowe, wśród nich najważniejsze to: jaskinia Twardowskiego, jaskinia Niska, jaskinia z Kulkami, jaskinia Pod Niżną, jaskinia Wywiew oraz jaskinia Jasna. Obszar Zrębu Zakrzówka jest silnie zaburzony tektonicznie. Jaskinie rozwinięte są głównie w strefach gęsto pociętych uskokami, w kierunku NE-SW. Większość lejów i studzienek łączących poszczególne piętra jaskiń rozwinięta jest na uskokach (Matyszkiewicz & Krajewski 1996), a niektóre ich korytarze przesunięte są wzdłuż tych samych powierzchni uskokowych (Jędrys & Krajewski 2002). Jaskinie Zrębu Zakrzówka stanowią prawdopodobnie system połączonych ze sobą jaskiń. Ta hipoteza była sprawdzana m.in. badaniami prowadzonymi przez zespół prof. Jacka Motyki i grotolazów pod kierownictwem Andrzeja Górnego (Motyka & Postawa 1998), które wykazały, że znaczniki (NaCl i fluoresceina) zadane nad jaskinią z Kulkami pojawiły się w jaskiniach Jasnej i Twardowskiego. Również badania geofizyczne prowadzone metodą georadarową w północnym rejonie jaskini Twardowskiego

przez zespół Jędrzyński & Krajewski (2002) potwierdziły przypuszczenie o istnieniu rozległego systemu krasowego w tej części zrębu. Prawie na wszystkich echogramach pojawiły się silne refleksy od pustek, które w znacznej części są dostępne. W celu sprawdzenia powyższej hipotezy, jak również dokładnego rozpoznania podłoża i występujących systemów krasowych zdecydowano się przeprowadzić badania geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej ERT, w zachodnim rejonie Zrębu Zakrzówka, w którym do niedawna odbywały się jeszcze prace eksploracyjne (Górny, Molenda, Motyka & Słobodzian 1997; Szelerewicz & Górny 2019), a obecnie z powodu występowania licznych obrywów wapienia ze stropu jaskini są niemożliwe. Obszar ten znajduje się nad jaskinią Jasną, położoną w obrębie zachodniej krawędzi zrębu u podstawy skał, od strony Wisły. Jaskinia jest częścią struktur krasowych Zrębu Zakrzówka, łączy się też z siecią kanałów krasowych zasilanych wodami Wisły, co zostało stwierdzone w czasie powodzi w 1997 roku, kiedy dno komory jaskini zalane było wodą.

W referacie przedstawiono możliwości wykorzystania metody ERT w badaniach 3D krasu węglanowego Zrębu Zakrzówka, która uważana jest za jedną z najskuteczniejszych metod geofizycznych w tym zakresie (Cheng et al. 2019; Pasierb 2012). Metoda ta jest nieinwazyjną metodą geofizyczną bazującą na zmienności parametrów elektrycznych ośrodka. Pomiarów metodą ERT poprowadzono w siatce równoległych profili umożliwiających interpretację danych również w układzie 3D. Przetwarzanie danych wykonano z wykorzystaniem programów inwersyjnych Res2Dinv i Res3Dinv firmy Geotomo Software (Loke 2004). Na etapie inwersji na model nałożono ograniczenia w celu wyeliminowania niejednoznaczności rozwiązania zagadnienia odwrotnego. W tym celu zastosowano robust inwersję (metoda optymalizacji z normą  $L_1$ ) (Farquharson & Oldenburg 1998; Loke et al. 2003; Pasierb 2015). Jest ona odpowiednia do zastosowania w sytuacjach nagłych zmian granic geologicznych, charakterystycznych dla pustek krasowych. Interpretację wyników ERT przedstawiono w formie przekrojów pionowych 2D, jak również dzięki zastosowanemu procesowi inwersji 3D w postaci przekrojów poziomych tzw. map cięcia głębokościowego. Wykorzystując technikę przetwarzania obrazu wolumetrycznego (w programie Voxler firmy Golden Software), wyniki aproksymowano do obrazów przestrzennych (Pasierb 2021). Wykonane badania umożliwiły zlokalizowanie poza komorą główną jaskini dodatkowych pustek, niedostępnych do tej pory dla eksploratorów. Metodą ERT rozpoznano budowę warstwy przypowierzchniowej, obecność w niej utworów ilastych, jak również miejsc zawodnionych. Określono granicę głębokościową między podłożem a nadkładem, oraz między warstwami zróżnicowanymi litologicznie. Udało się również zlokalizować strefę uskokową. Badania potwierdziły hipotezę, że jaskinia Jasna stanowi fragment rozległego systemu jaskiniowego Zrębu Zakrzówka. W wyniku przeprowadzonych badań metodą ERT wytypowane zostały również główne, najbardziej perspektywiczne kierunki przyszłych badań speleologicznych.

## Literatura:

- Farquharson C.G. & Oldenburg D.W. 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure, *Geophysical Journal International* 134, pp: 213–227
- Felisiak I. 1992. Osady krasowe oligocenu i wczesnego miocenu oraz ich znaczenie dla poznania rozwoju tektoniki i rzeźby okolic Krakowa. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 62, pp: 173–207
- Górny A., Molenda R., Motyka J. & Słobodzian B. 1997. Warunki hydrogeologiczne i zjawiska krasowe Zrębu Zakrzówka. *Materiały 31 Sympozjum Speleologicznego. Ojców* pp: 29-34
- Gradziński R. 1972. Przewodnik geologiczny po okolicach Krakowa. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Jędrys J. & Krajewski M. 2002. Poszukiwania jaskiń na Zakrzówku metodą georadarową. *Jaskinie* 4 (29), pp: 28–30.
- Krajewski M. & Olchowy P. 2021. Upper Jurassic bedded limestones and early diagenetic dolomitized limestones in the light of mineralogical, geochemical and sedimentological studies; Kraków area, Poland. *Minerals* 11 (5), pp: 462. DOI:10.3390/min11050462
- Loke M.H. 2004. Tutorial 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software,
- Loke M. H., Ackworth I. & Dahlin T. A. 2003. Comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging survey. *Exploration Geophysics*, 34 (1), pp: 182-187. DOI:10.1071/EG03182
- Motyka J., Czop M. & Polak K. 2003. Wpływ warunków wodnych w kamieniołomie "Zakrzówek" w Krakowie na jego funkcję rekreacyjną. [w:] *Kształtowanie krajobrazu terenów poeksploatacyjnych w górnictwie. Międzynarodowa Konf. Nauk., 10-12 grudnia 2003. Kraków*, pp: 208–219.
- Motyka J. & Postawa A. 1998. Zróżnicowanie przestrzenne stężenia jonu chlorkowego z wodach z wycieku w kamieniołomie w Zakrzówku (okolice Krakowa, S Polska) *Kras i Speleologia* 9, pp: 105-117
- Pasierb B. 2012. Techniki pomiarowe metody elektrooporowej. *Technical Transactions, PK University of Technology Press, series Environmental Engineering*. pp: 191–199.
- Pasierb B. 2015. Numerical Evaluation 2D Electrical Resistivity Tomography for Subsoil Investigations. *Technical Transactions, PK University of Technology Press, series Environmental Engineering*. pp: 101–113.
- Pasierb B. 2021. Badania metodą tomografii elektrooporowej 2/3D nad Jaskinią Jasną w Krakowie. *Materiały 55. Sympozjum Speleologicznego, Bartkowa 14-17.10.2021* red. Jan Urban Sekcja Speleologiczna Polskiego Towarzystwa. ISBN 978-83-962910-0-4
- Sermet E. & Rolka G. 2013. Pogórnicy spadek na Zrębie Zakrzówka. *Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury*, 5 pod red. P.P. Zagożdżona i M. Madziarza. Wrocław
- Szelerewicz M. & Górny A. 2019. Jaskinia Jasna, [w:] *Jaskinie Polski [online]*, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
- Cheng, Q., Chen, X., Tao, M. et al. 2019. Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography. *Environ Earth Sci* 78, 285. DOI:10.1007/s12665-019-8284-2