



**mgr inż. Michał Ćwiklik<sup>1</sup>, dr inż. Bernadetta Pasierb<sup>2</sup>, dr hab. inż. Sławomir Porzucek<sup>3</sup> prof. AGH**

<sup>1,2</sup> Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej

<sup>1</sup> [✉michal.cwiklik@doktorant.pk.edu.pl](mailto:michal.cwiklik@doktorant.pk.edu.pl);  ORCID: 0000-0002-3206-2877; <sup>2</sup> [✉bpasierb@pk.edu.pl](mailto:bpasierb@pk.edu.pl);  ORCID: 0000-0001-5616-7289

<sup>3</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki,

[✉porzucek@agh.edu.pl](mailto:porzucek@agh.edu.pl);  ORCID: 0000-0002-8250-2703

## **Rozpoznanie podłoża fliszowego metodą tomografii elektrooporowej ERT w sąsiedztwie budowy drogi ekspresowej S-7 "Zakopianki"**

(Recognition of the flysch bedrock using the ERT method  
in the vicinity of the expressway S-7 "Zakopianka")

Określenie warunków geologiczno-inżynierskich podłoża polega na identyfikacji i analizie warunków geomorfologicznych, hydrogeologicznych oraz cech budowy geologicznej, które mogą wpłynąć bezpośrednio lub pośrednio na bezpieczeństwo prac budowlanych na wszystkich etapach ich realizacji. Ocena warunków geologiczno-inżynierskich oraz naturalnych i/lub antropogenicznych zagrożeń powinna obejmować zatem zarówno stan istniejący, jak i prognozę zmian nie tylko w obrębie obiektu, lecz także w strefie możliwego zagrożenia (Majer et al. 2018). Bardzo pomocne w tym zakresie są metody geofizyczne. Zaletą metod geofizycznych jest ich efektywność i nieinwazyjność, dostarczanie ciągłej dwuwymiarowej lub przestrzennej informacji, niemożliwej do uzyskania metodami bezpośrednimi oraz krótki czas wykonywania badań. Umożliwiają one rozpoznanie budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych, ocenę ryzyka procesów osuwiskowych, identyfikację podziemnej infrastruktury technicznej, jak również rozpoznanie płytkich ubytków w górotworze. Metody geofizyczne pozwalają także na oszacowanie parametrów fizyczno-mechanicznych danego ośrodka (Martinez-Pagán et al. 2013; Pasierb et al. 2019, Pasierb & Nawrocki 2020; Cebulski et al. 2020; Tsai et al. 2021). W przypadku inwestycji budowlanych, które znajdują się w skomplikowanych warunkach gruntowo-wodnych (np. płytkie zwierciadło wód gruntowych lub obecność gruntów o małej nośności, występowanie uskoków czy osuwisk) prowadzony jest monitoring geofizyczny. Jego zadaniem jest kontrola gruntów przed i po pracach stabilizacyjnych, takich jak procesy iniekcji czy cementowania (Pacanowski et al. 2014; Apuani et al. 2015; Kremer et al. 2018; Ćwiklik et al. 2021). Jedną z najczęściej stosowanych metod geofizycznych jest metoda tomografii elektrooporowej ERT (*Electrical Resistivity Tomography*), która umożliwia dokładną identyfikację warstw gruntowo-skalnych na obszarach o skomplikowanej budowie geologicznej, gdzie konwencjonalne, bezpośrednie, inwazyjne metody badawcze nie mogą zagwarantować pełnego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych (Hasan et al. 2021).

W referacie przedstawiono wykorzystanie metody tomografii elektrooporowej ERT w rozpoznaniu podłoża fliszowego, w sąsiedztwie budowy drogi ekspresowej S-7 "Zakopianki". Budowa trasy S-7 Lubień - Rabka Zdrój, prowadzona była w trudnych warunkach geologicznych, związanych ze złożoną tektoniką podłoża utworów fliszowych, dużą zmiennością nachylenia warstw skalnych w stosunku do nachylenia stoków, płytkim występowaniem zwierciadła wód podziemnych oraz licznymi osuwiskami (Starkel 2006). Skomplikowane warunki geologiczne wymagały od wykonawcy wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań technologicznych, m.in. przeprowadzenia procesu iniekcji. Celem zastosowanych badań geofizycznych z użyciem metody tomografii elektrooporowej ERT było rozpoznanie przypowierzchniowego rozkładu oporności elektrycznej ośrodka geologicznego i powiązania wyniku z litologią skał oraz uszkodzeniami nasypu. Dodatkowo na podstawie badań metodą ERT podjęto próbę oceny skuteczności procesu iniekcji. Badania prowadzone były dwukrotnie, w odstępie dwóch lat. Pomiarów przeprowadzono zachowując te same parametry pomiarowe (m.in. układ Wennera-Schlumbergera; rozstaw elektrod równy 3m) oraz przetwarzania (m.in. *robust inversion*) (Loke 2010; Pasięb 2015). Wykorzystano aparaturę ARES (firmy GF Instruments) i oprogramowanie Res2Dinv (firmy Geotomo Software). Na wszystkich profilach wykonane były prace niwelacyjne. Na etapie interpretacji kontekstowej (geologiczno-inżynierskiej) posłużono się informacjami z otworów wiertniczych oraz mapą z zaznaczonymi strefami prowadzenia procesu iniekcji. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że czwartorzędową warstwę przypowierzchniową, względnie niskoopornościową, należy interpretować jako zbudowaną z utworów o charakterze ilasto-gliniastym. Głębszą strefę wyskoopornościową zinterpretowano jako paleogeńskie mułowce lub łupki fliszu karpackiego. Zaobserwowane w podłożu duże zróżnicowanie oporności na małych odległościach świadczyły o dużym zróżnicowaniu litologicznym podłoża. Metodą tomografii elektrooporowej ERT bardzo dokładnie rozpoznano podłoże fliszowe, tj. określono litologię i miąższości warstw, wyznaczono strefy silnego spękania ośrodka i strefy uskokowe. Stwierdzono, że ośrodek skalny, charakteryzujący się w pierwszej serii pomiarowej podwyższoną wartością oporności, a w drugiej serii jej spadkiem, odznacza się silnymi spękaniem (jest zwietrzały) i przez to ma możliwość przyjęcia wody obniżającej wartości oporności. Podwyższenie natomiast oporności może być wynikiem iniekcji, która powoduje ograniczenie spływu i filtracji wód. Na podstawie przekrojów ERT można było określić jak głęboko wniknęła mieszanka iniekcyjna, wypełniając wolne przestrzenie w podłożu. Określono również strefy zatrzymania wyskoopornościowej mieszanki iniekcyjnej na powierzchni terenu, wskazujące na właściwe wypełnienie stref, które prawdopodobnie nie były w stanie przyjąć większej ilości mieszanki. Przeprowadzone badania wykazały skuteczność zastosowania metody tomografii elektrooporowej ERT w rozpoznaniu skomplikowanej budowy podłoża fliszowego i ocenie stopnia zapobiegania zagrożeniom poprzez monitoring procesu iniekcji.

## Literatura:

- Apuani T., Giani G. P., d'Attoli M., Fischanger F., Morelli G., Ranieri G. & Santarato G. 2015. Assessment of the Efficiency of Consolidation Treatment through Injections of Expanding Resins by Geotechnical Tests and 3D Electrical Resistivity Tomography. Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal. Vol. 2015, Article ID 237930, 13 pages DOI: 10.1155/2015/237930
- Cebulski J., Pasierb B., Wieczorek D. & Zielinski A. 2020. Reconstruction of landslide movements using Digital Elevation Model and Electrical Resistivity Tomography analysis in the Polish Outer Carpathians. CATENA 195, pp 14 DOI: 10.1016/j.catena.2020.104758. – ISSN 0341-8162
- Ćwiklik M., Pasierb B. & Porzucek S. 2021. Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej jako narzędzia do oceny skuteczności procesu iniekcji – przykład z obszaru drogi krajowej nr 47. W 7. WPGI zeszyt abstraktów: 7. Ogólnopolskie Sympozjum Współczesne Problemy Geologii Inżynierskiej w Polsce, 14-17.09.2021 Bydgoszcz,
- Hasan M., Shang Y. & Meng, H. 2021. Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation. Sci Rep 11, 23683. DOI: 10.1038/s41598-021-03217-8
- Kremer T., Vieira C. & Mainault A. 2018. ERT monitoring of gas injection into water saturated sands: Modelling and inversion of cross-hole laboratory data. Journal of Applied Geophysics, Elsevier, 158, pp.11-28. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.06.001ff. fffhal-02140621
- Loke M.H., 2010. Rapid 2D Resistivity & IP Inversion Using Least-Squares Method. Tutorial Geotomo Software: [www.geotomosoft.com/downloads.php](http://www.geotomosoft.com/downloads.php).
- Majer E., Sokołowska M. & Frankowski Z. 2018. Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego . PIG-PIB. Warszawa. ISBN 978-83-7863-774-5
- Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Manteca J.I. & Rosique M. 2013. The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain), Engineering Geology 156, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.01.013
- Pacanowski G., Czarniak P., Bąkowska A., Mieszkowski R. & Welc F. 2014. The role of geophysical ERT method to evaluate the leakproofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the example of the construction of retail and office complex in Lublin, Poland. Studia Quaternaria, 31 (2), pp. 91–99. DOI: 10.2478/squa-2014-0009
- Pasierb B. & Nawrocki W. 2020. Not only the 'Gold Train' – the 'Underground Town' of Riese (Poland) – the ambiguity of interpretation ERT and GPR methods. Archaeological Prospection 27 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1002/arp.1779. – ISSN 1099-0763
- 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., Grodecki M. & Gwóźdź R. 2019. Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. Acta Geophysica, 67 (6), pp. 1823-1834 DOI: 10.1007/s11600-019-00338-7. – ISSN 1895-7455
- Starkel L. 2006. Geomorphic hazards in the Polish Flysch Carpathians. Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 40, pp. 7-19.
- Tsai W-N, Chen C-C, Chiang C-W, Chen P-Y, Kuo C-Y, Wang K-L, Lin M-L and Chen R-F. 2021. Electrical Resistivity Tomography (ERT) Monitoring for Landslides: Case Study in the Lantai Area, Yilan Taiping Mountain, Northeast Taiwan. Front. Earth Sci. 9:737271. DOI: 10.3389/feart.2021.737271