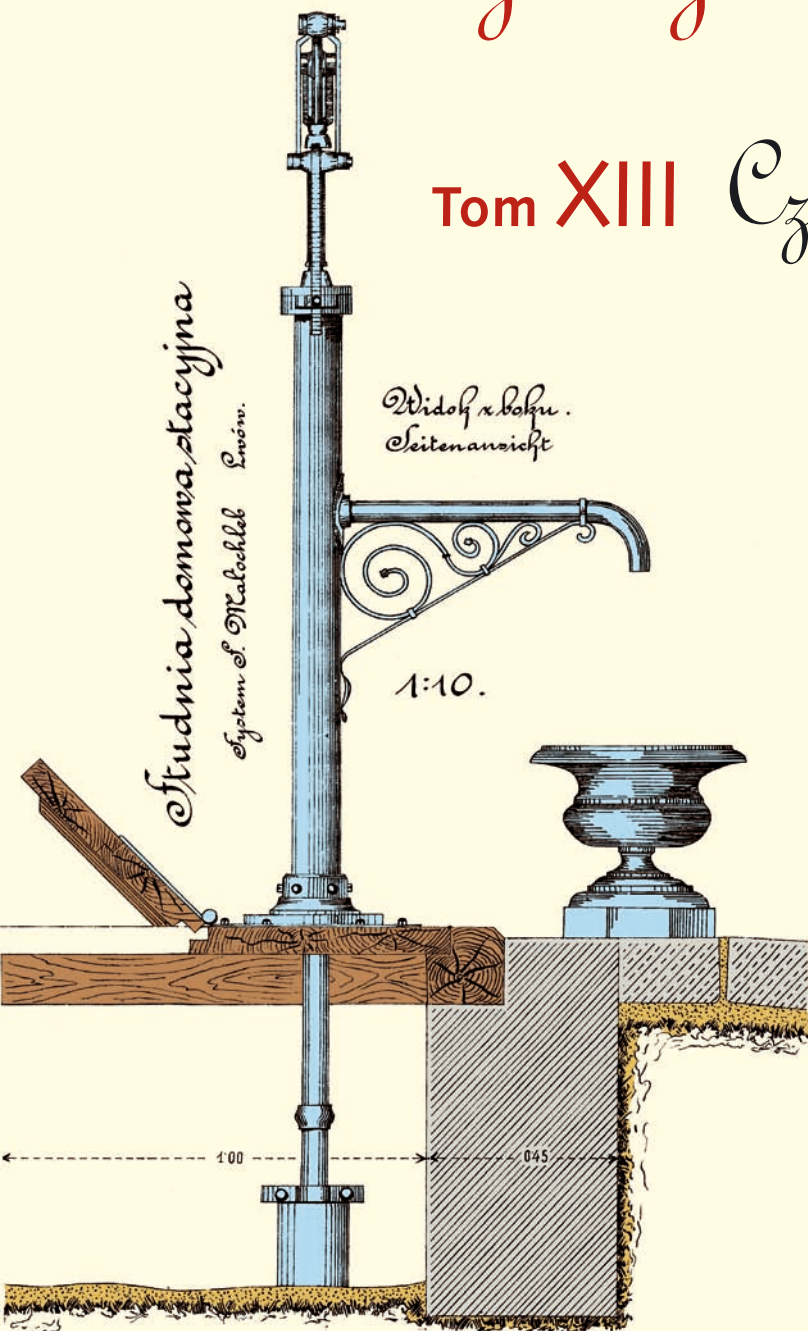


Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 2.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska
Wojciech Ciężkowski
Józef Górski
Andrzej Kowalczyk
Ewa Krogulec
Grzegorz Malina
Jerzy Małecki
Marek Marciniak
Jacek Motyka
Marek Nawalany
Jan Przybyłek
Andrzej Rózkowski
Andrzej Sadurski
Andrzej Szczepański
Stanisław Staško
Stanisław Witczak
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$: pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, www.pretext.com.pl

Druk: ROMA-POL, www.romapol.pl

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Michał Rudzki, Arkadiusz Krawiec

**Ocena zanieczyszczenia wód podziemnych
z wykorzystaniem metody tomografii
elektrooporowej**

**Assesment of Groundwater Pollution
Using Electrical Resistivity Tomography (ERT)**

Słowa kluczowe

tomografia elektrooporowa, zanieczyszczenia wód podziemnych, ingresja/ascenzja wód słonych, kartografia jakości wody

Key words

electrical resistivity tomography, groundwater pollution, salt water ingression/ascension, groundwater quality mapping

Abstract

The paper presents two examples of application of the electrical resistivity tomography (ERT) for mapping the occurrences of mineralized waters. One example deals with the polluted water infiltration from a near-by waste disposal lagoon, while the other refers to the problem of saline water intrusions in coastal areas. Since the ERT method is not widely known or adopted for this type of studies, a comprehensive description of the method is given, together with the outline of its main features and differences between the ERT and standard DC method. An emphasis is put on the resolution of the method, that allows for precisely delineate the areas of mineralized water presence.

Wstęp

Niniejszy artykuł prezentuje zalety metody tomografii elektrooporowej w porównaniu do standardowych wariantów badań elektrooporowych: profilowań i sondowań. Podane przykłady obrazują zdolności detekcyjne metody w wykrywaniu i lokalizowaniu obecności wód zmineralizowanych. Ponieważ metoda ta nie jest powszechnie znana, przykłady poprzedzone zostały krótkim jej opisem.

Na przestrzeni ostatnich lat metoda elektrooporowa była, i jest, z powodzeniem wykorzystywana do wykrywania i lokalizowania obecności wód zmineralizowanych w ośrodku skalnym. Zaletą tej metody jest szybkość prowadzenia prac oraz relatywnie niski koszt badań. Ponadto metoda ta nie ma ograniczeń co do obszaru i pozwala na uzyskanie pełnego obrazu badanego rejonu, a nie ogranicza się do punktowego rozpoznania, co daje nam np. wykonanie otworów badawczych. W swoich podstawowych wariantach metoda elektrooporowa ma jednak pewne ograniczenia, do których należą: jednowymiarowość modelu oraz niewielka rozdzielczość pozioma. Ograniczenia te można w dużym stopniu wyeliminować przy zastosowaniu tej metody w wariacie tomografii elektrooporowej.

Charakterystyka metody tomografii elektrooporowej

W chwili obecnej metoda elektrooporowa z reguły stosowana jest w dwóch podstawowych wariantach: profilowań elektrooporowych (PE) i sondowań elektrooporowych (SE). W wariacie sondowań zwiększenie rozstawu elektrod zasilających pociąga za sobą zwiększenie głębokości efektywnego wnikania pola elektrycznego w ośrodek gruntowy, czyli uzyskiwanie informacji z coraz większej głębokości, dla ustalonego punktu obserwacji. W wariacie profilowań zmiana położenia układu pomiarowego o ustalonej geometrii pozwala na poziome śledzenie zmian oporności elektrycznej ośrodka. Wspólną cechą obu wariantów jest „jednowymiarowość” otrzymanej informacji, tzn. określenie zmian oporności elektrycznej ośrodka jedynie w pionie (wariant sondowań) lub w poziomie (wariant profilowań).

Konsekwencją takiej metodyki pomiarów są określone ograniczenia interpretacyjne. W przypadku profilowań elektrooporowych można mówić jedynie o ich interpretacji jakościowej, w przypadku sondowań zaś interpretacja ilościowa ograniczona jest w praktyce do modelu jednowymiarowego, zakładającego poziome zaleganie warstw geologicznych w całym obszarze objętym działaniem pola elektrycznego – warunek rzadko spełniony, biorąc pod uwagę rozmiar stosowanych zwykle rozstawów.

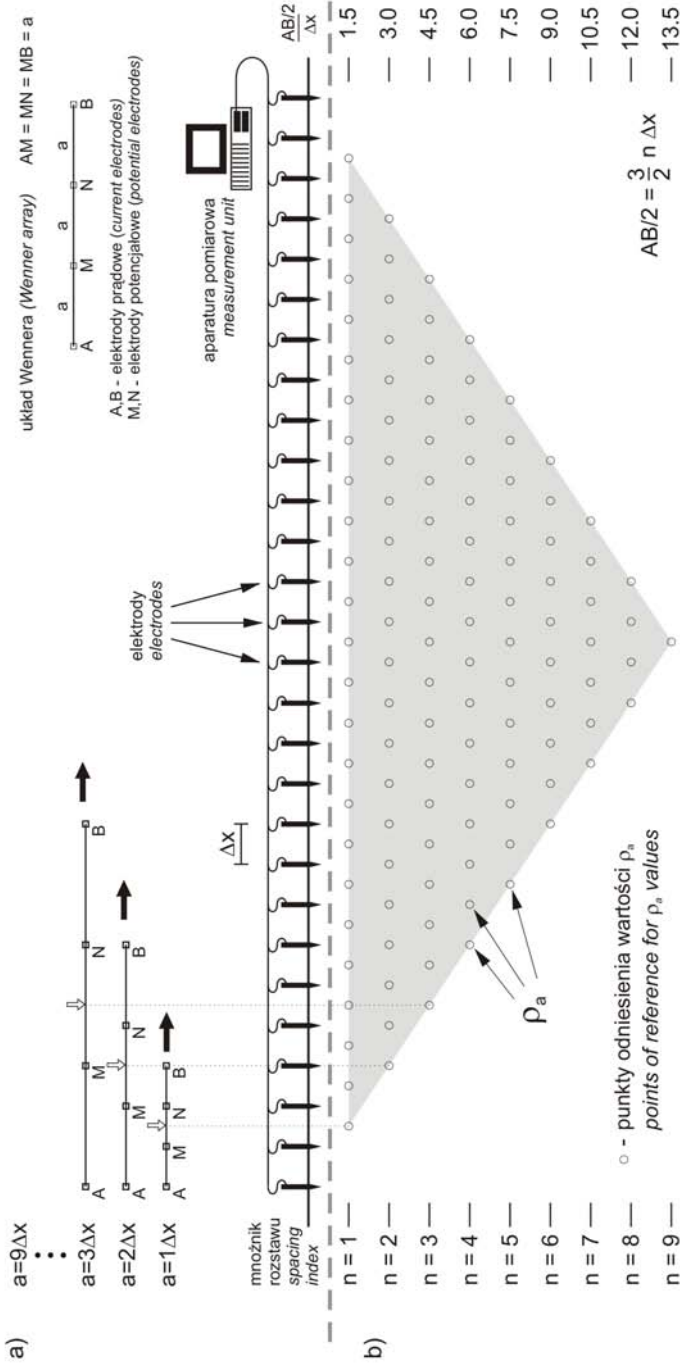
Sposób wykonywania pomiarów w metodzie tomografii elektrooporowej przedstawiono na rysunku 1a. W przykładzie tym pomiary wykonywane są układem Wennera. System składa się z określonej liczby elektrod, oddalonych od siebie o stałą wartość Δx , podłączonych za pomocą kabla wielożyłowego do aparatury pomiarowo-rejestrującej. Akwizycja danych polega na wykonaniu szeregu pojedynczych pomiarów oporności pozornej za pomocą „chwilowego” układu pomiarowego, na który składa się określona kombinacja elektrod, wybranych spośród wszystkich rozmieszczonych wzdłuż kabla. Kombinacja ta dobierana

jest tak, aby w trakcie pomiarów zmianie ulegała zarówno wielkość rozstawu (a więc i głębokość wnikania pola elektrycznego), jak i położenie układu pomiarowego wzdłuż linii profilu. Zwiększenie rozstawu układu realizowane jest poprzez wybór elektrod oddalonych od siebie o kolejne wielokrotności odstepu Δx ($n = 1, 2, 3 \dots, n$ – tzw. mnożnik rozstawu). Pomiary z reguły wykonuje się w seriach, w obrębie których najpierw ustala się wielkość n , a następnie układ pomiarowy o takiej konfiguracji jest „przemieszczany” w poziomie o wartość odstepu Δx , poprzez automatyczne podłączenie do aparatury kolejnej kombinacji elektrod. Na rysunku pokazano położenie trzech początkowych konfiguracji pomiarowych dla trzech pierwszych serii pomiarów (dla wartości n wynoszących 1, 2 i 3). Tak więc, pod względem sposobu akwizycji danych, tomografia elektrooporowa stanowi swego rodzaju połączenie obydwu klasycznych wariantów metody elektrooporowej – sondowań (ze względu na sukcesywny wzrost głębokości penetracji) oraz profilowań (ze względu na przemieszczanie układu pomiarowego w poziomie).

Poniżej schematu elektrod (rys. 1b) znajduje się diagram, obrazujący przestrzenne przyporządkowanie pomierzonych wartości oporności pozornej, dla wszystkich możliwych (dla pokazanego typu układu i użytej liczby elektrod) kombinacji elektrod, tworzących „chwilowy” układ pomiarowy. W ten sposób pod względem rozkładu oporności opisany zostaje ośrodek ograniczony od góry powierzchnią terenu, od dołu – głębokością penetracji dla maksymalnych wartości rozstawu elektrod, z boków zaś – skrajnymi położeniami układów pomiarowych dla poszczególnych wielkości rozstawów. Przestrzenny rozkład pomierzonych wartości jest znacznie bardziej jednorodny niż w przypadku tradycyjnych metod pomiarowych (sondowań lub profilowań). Właściwość ta powoduje, że badania tego typu określa się jako badania dwuwymiarowe – 2D. Taki charakter zebranej informacji pozwala na zastosowanie znacznie bardziej zaawansowanych technik interpretacji ilościowej wyników pomiarów. Liczba możliwych do wykonania w ten sposób pomiarów jest stosunkowo duża – w praktyce jest to kilkaset lub nawet kilka tysięcy pomiarów. Wymusza to stosowanie aparatów pomiarowych o określonych możliwościach w zakresie automatycznego sterowania procesem akwizycji i rejestracji danych.

Ilościowa interpretacja wyników badań metodą tomografii elektrooporowej

W przypadku metody sondowań elektrooporowych interpretacja ilościowa w praktyce ogranicza się do stosowania modelu jednowymiarowego, zakładającego zarówno poziome zaleganie jednorodnych pod względem opornościowym warstw geologicznych, jak i płaską powierzchnię terenu (tzw. inwersja 1D). Rezultatem takiego założenia są istotne ograniczenia interpretacyjne, z których najpoważniejszym jest niemożność uwzględnienia w interpretacji pojedynczego sondowania poziomych zmian oporności elektrycznej. Gdy mamy bardziej skomplikowaną budowę geologiczną prowadzi to do istotnych różnic pomiędzy wynikami interpretacji a rzeczywistym układem warstw geologicznych (Loke, 1999).

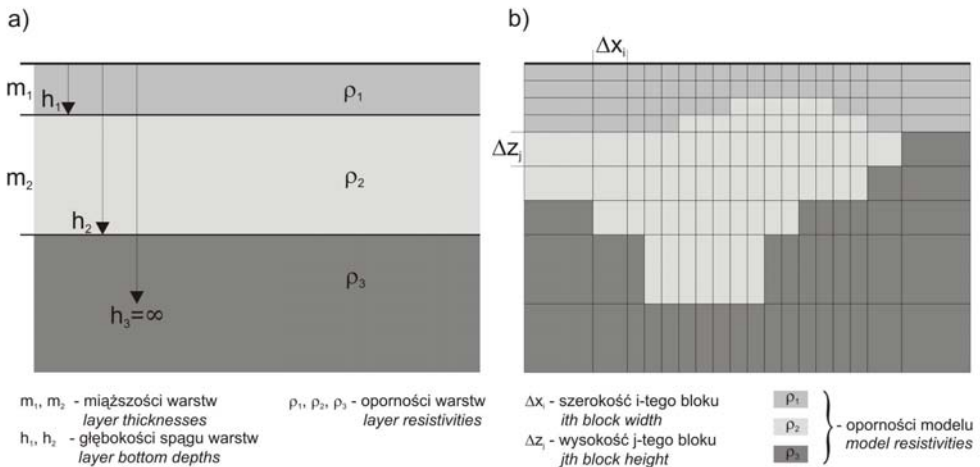


Rysunek 1. Schemat obserwacji w metodzie tomografii elektrooporowej (wg: Mościcki, Antoniuk, 1999, zmienione):
a) sposób wykonywania pomiarów b) przestrzenne przyporządkowanie pomierzonych wartości oporności pozornej

Figure 1. Measurement scheme in the electrical resistivity tomography method (after: Mościcki, Antoniuk, 1999, revised):
a) method of observations b) spatial arrangement of measured apparent resistivity values

W tomografii elektrooporowej przestrzenny rozkład wyników pomiarów umożliwia zastosowanie bardziej zaawansowanych technik interpretacyjnych, określanych jako inwersja 2D. Zasadniczą cechą, odróżniającą inwersję 2D od inwersji 1D, jest rodzaj stosowanego modelu geoelektrycznego ośrodka. W inwersji 2D model ten jest dwuwymiarowy, czyli dopuszczający zmienność parametrów ośrodka nie tylko w pionie, ale i w poziomie (Loke, Barker, 1996).

Założenie dwuwymiarowości modelu wymusza jego odpowiednią strukturę. Model 1D, czyli układ płasko-równoległych warstw opisany być może za pomocą kilku liczb (n oporności, $n-1$ miąższości – rys. 2a). Model 2D, uwzględniający zmienność parametrów na pionowej płaszczyźnie przekroju, jest bardziej skomplikowany, a sam rozkład opisany być może w różny sposób. Najpowszechniej stosowanym obecnie typem modelu jest układ prostokątnych bloków tworzących quasi-regularną siatkę, przy czym w obrębie każdego z bloków oporność elektryczna ośrodka jest stała (rys. 2b). Taka budowa modelu pozwala na zobrazowanie bardziej skomplikowanych struktur geologicznych czy też procesów środowiskowych, których opisanie tradycyjnie stosowanym układem płasko-równoległych warstw jest często niemożliwe. W sposób szczególny predestynuje to metodę tomografii elektrooporowej do badań struktur lub zjawisk o ograniczonej rozciągłości przestrzennej (Rudzki, 2002).



Rysunek 2. Porównanie modeli geofizycznych w metodzie sondowań elektrooporowych (a) oraz w metodzie tomografii elektrooporowej (b)

Figure 2. Comparison of the geophysical models for the standard DC method (a) and for the ERT method (b)

Zastosowanie modelu dwuwymiarowego sprawia, iż konieczna jest automatyzacja procesu inwersji. W przypadku interpretacji sondowań elektrooporowych możliwy jest sukcesywny dobór parametrów przez interpretatora, i tym samym poszukiwanie najlepszego dopasowania modelu do wyników pomiarów. W przypadku tomografii elektrooporowej, gdzie liczba parametrów modelu jest daleko większa, a sumaryczny wpływ ich wartości na końcowy

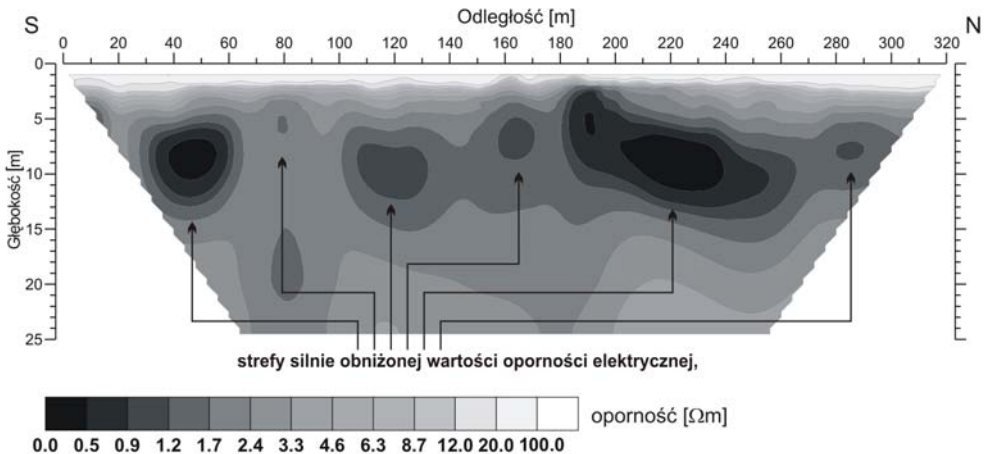
wynik przetwarzania trudny do przewidzenia, podobny schemat postępowania jest w praktyce niemożliwy. Dlatego też zarówno dobór modelu startowego, jak i iteracyjna procedura zmiany jego parametrów w celu uzyskania jak najlepszego dopasowania do wyników pomiarów realizowane są w zasadzie automatycznie, a rola interpretatora sprowadzona jest do narzucenia warunków brzegowych dla modelu oraz dla sposobu poszukiwania rozwiązania.

Najbardziej istotnym (z punktu widzenia interpretacji geologicznej) efektem automatyzacji procesu inwersji jest „rozmyty” charakter jej wyników. Wyraża się on w braku ostrych (skokowych) zmian wartości wyinterpretowanej oporności elektrycznej na płaszczyźnie przekroju, które to zmiany tradycyjnie utożsamiane są z granicami geologicznymi lub hydrogeologicznymi. Ze względu na automatyczny charakter procesu inwersji w metodzie tomografii elektrooporowej wprowadzenie tego rodzaju skokowych zmian w zasadzie nie jest możliwe. Dlatego też wyniki inwersji 2D w metodzie tomografii elektrooporowej traktować należy (podobnie zresztą jak wyniki każdego badania elektrooporowego) jako pewien uogólniony model budowy ośrodka.

Przykłady zastosowania

Lokalizacja dróg migracji zanieczyszczeń

Rysunek 3 przedstawia wyniki badań rozkładu zanieczyszczenia w warstwie wodonośnej metodą tomografii elektrooporowej na profilu zlokalizowanym równoległe do krawędzi osadnika odpadów chemicznych. Pomiary zrealizowano układem symetrycznym Wennera przy odległości pomiędzy elektrodami 2 m.



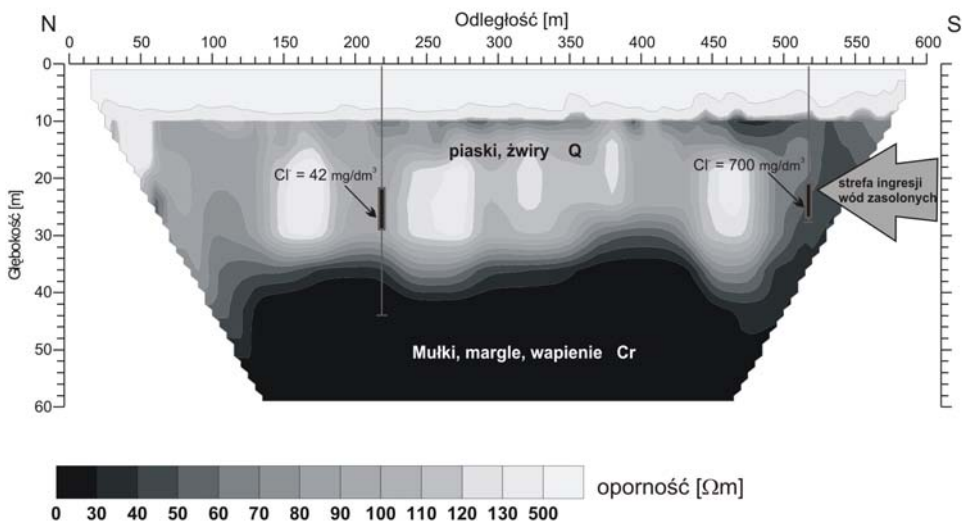
Rysunek 3. Wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej w sąsiedztwie osadnika odpadów chemicznych

Figure 3. The results of the ERT surveys in the vicinity of the chemical waste disposal pond

Łączna liczba elektrod użytych w czasie pomiarów wynosiła 160. W omawianym rejonie, ośrodek skalny to piaski i żwiry akumulacji wodnolodowcowej i rzecznej o miąższości około 15 m. Poniżej zalega warstwa glin zwałowych o miąższości 15-20 m. Zwierciadło wody ma charakter swobodny i występuje najczęściej na głębokości od 2 do 3 m. Rysunek 3 przedstawia model opornościowy ośrodka, uzyskany na drodze inwersji 2D danych pomiarowych. Warto zwrócić uwagę na zakres zmienności oporności elektrycznej ośrodka. W strefie saturacji wartości te nie przekraczają kilku Ωm , a w obszarze anomalii wynoszą poniżej 1 Ωm , co w przypadku utworów piaszczysto-żwirowych jest wielkością ekstremalnie niską. W normalnych warunkach utwory te charakteryzują się opornością elektryczną ok. 80 Ωm i więcej. Wyniki pomiarów świadczą o znacznej mineralizacji wód podziemnych, co potwierdzone zostało analizami próbek wody pobranych z piezometrów. Na uwagę zasługuje także szczegółowość uzyskanego obrazu – widoczne są strefy o rozciągłości poziomej rzędu 20-30 m, trudne do zobrazowania za pomocą badań elektrooporowych w ich klasycznych wariantach. W analizowanym przypadku wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej dostarczają cennej informacji, czy to o położeniu ognisk zanieczyszczeń, czy też o ewentualnych drogach ich migracji.

Ingresja wód słonych

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej w profilu zlokalizowanym prostopadle do linii brzegowej. Pomiarzy zrealizowano układem symetrycznym Wennera przy odległości pomiędzy elektrodami 10 m. Łączna liczba elektrod użytych w czasie pomiarów wynosiła 60.



Rysunek 4. Wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej na obszarze ingresji zasolonych wód morskich

Figure 4. The results of the ERT surveys in the area of marine water intrusions

Miaższość warstw plejstocenu i holocenu w rozpatrywanym obszarze wynosi około 40 m. Są to głównie piaski różnoziarniste, mułki oraz warstwa glin zwałowych zalegająca na osadach kredy. Zwierciadło wody poziomu czwartorzędowego ma charakter swobodny i występuje na głębokości od 3 do 5 m.

Rysunek 4 przedstawia model opornościowy ośrodka, uzyskany na drodze inwersji 2D danych pomiarowych. Warto zwrócić uwagę na zakres zmienności oporności elektrycznej na głębokości około 32-38 m, gdzie występuje kilkumetrowa warstwa glin zwałowych, poniżej której znajduje się strop margli i wapieni kredy (oporność poniżej 30 Ωm). W części południowej przekroju zaznacza się wyraźny spadek oporności do około 30-40 Ωm , co wskazuje miejsce ingresji wód słonych. Potwierdzają to także wyniki oznaczeń jonu Cl^- . W zaznaczonej studni eksploatowanego na tym obszarze ujęcia obserwuje się zawartość około 700 mg/dm^3 jonu Cl^- .

Podsumowanie

Tomografia elektrooporowa stanowi połączenie klasycznych wariantów metody elektrooporowej, tj. profilowań elektrooporowych (PE) i sondowań elektrooporowych (SE). Dwuwymiarowość modelu interpretacyjnego w metodzie tomografii elektrooporowej pozwala na zobrazowanie bardziej skomplikowanych struktur geologicznych, czy też procesów środowiskowych, których opisanie tradycyjnie stosowanym w metodzie sondowań elektrooporowych układem płasko-równoległych warstw jest często niemożliwe lub przynosi niezadowalające efekty.

Podstawową zaletą tomografii elektrooporowej w porównaniu do tradycyjnych technik geoelektrycznych jest zdecydowanie większa rozdzielczość przestrzenna wyników badań. Umożliwia to efektywne stosowanie tej metody do badania struktur, czy zjawisk o ograniczonej rozciągłości, szczególnie w kierunku poziomym. W aspekcie badań hydrogeologicznych czy środowiskowych metoda ta jest więc szczególnie predestynowana do wykrywania obecności i zasięgu rozprzestrzenienia wód zmineralizowanych w ośrodku skalnym, lokalizowania źródeł zanieczyszczeń czy dróg ich migracji. Jednocześnie trzeba mieć na uwadze fakt, że wyniki badań uzyskanych tą metodą traktować należy jako uogólniony model sytuacji geologicznej. W modelu tym poszczególne elementy opornościowego obrazu ośrodka nie zawsze precyzyjnie odzwierciedlają kształt czy położenie obszarów anomalnych, ale jeśli jest on traktowany całościowo, zdecydowanie lepiej i dokładniej oddaje rzeczywistość geologiczną na badanym obszarze.

Literatura

- Loke M.H., Barker R.D., 1996: *Least squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections*, Geophysics, 60, s. 1682-1690.
- Loke M.H., 1999: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, www.abem.se.

- Mościcki W. J., Antoniuk J., 1999: *Metoda obrazowania elektrooporowego (resistivity imaging). Przykład badań dla celów geologiczno – inżynierskich*, [in:] Mat. V Konferencji Naukowo-Technicznej „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska”, Kraków.
- Rudzki M., 2002: *Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do wykrywania podziemnych obiektów antropogenicznych*, Publ. Inst. Geophys., Pol. Acad. Sc., M-27 (352), s. 247-273.

Badania ingresji wód słonych zostały wykonane w ramach grantu UMK nr 335-G.