



WYKORZYSTANIE METODY ELEKTROOPOROWEJ DO ROZPOZNANIA NIESZCZELNOŚCI IZOLACJI SKŁADOWISK ODPADÓW

EUGENIUSZ KODA, *eugeniusz_koda@sggw.pl*

MARIUSZ LECH

PIOTR OSIŃSKI

Katedra Geoinżynierii, SGGW w Warszawie

Streszczenie: Składowiska odpadów są budowlami inżynierskimi, w których jedną z najważniejszych funkcji jest zapewnienie szczelności w celu wyeliminowania migracji zanieczyszczeń do środowiska wodno-gruntowego. W Polsce istnieje wiele składowisk, na których obserwuje się wydostawanie się odcieków (zanieczyszczeń) do podłoża. W celu rozpoznania tego rodzaju stanów awaryjnych często nie wystarczą metody rutynowych badań geotechnicznych, ze względu na utrudniony dostęp do podłoża znajdującego się pod składowiskiem o dużej powierzchni i miąższości zdeponowanych odpadów. W przypadku tego rodzaju obiektów bardzo pomocne mogą okazać się metody geofizyczne, które znajdują w ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w praktyce inżynierskiej. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych metodą elektrooporową na trzech składowiskach odpadów posiadających poziome (geomembrany) lub pionowe (przesłony bentonitowe) uszczelnienia. Badania geofizyczne elektrooporowe pozwoliły ocenić stan tych uszczelnień, a w przypadku nieszczelności określić kierunek migracji i strefę zanieczyszczonej.

Słowa kluczowe: badania geofizyczne, składowisko odpadów, uszczelnienie, przesłona przeciwifiltracyjna, zanieczyszczenie gruntu, jakość wody gruntowej.

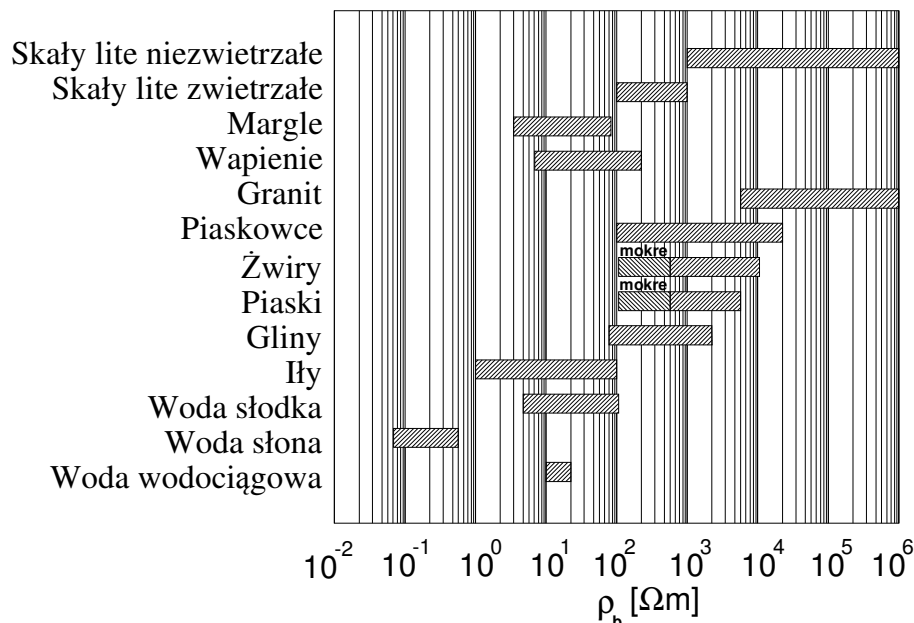
1. Badania geofizyczne – charakterystyka metod

Badania geofizyczne można podzielić na cztery główne grupy: grawimetryczne, magneto-metryczne, sejsmiczne i geoelektryczne. Metody geofizyczne polegają na „prześwietlaniu” profilu gruntowego i pomiarze parametrów fizycznych gruntów bez naruszania ich struktury. Metody te mogą być stosowane na różnych etapach prac terenowych, zarówno jako badania wstępne mające na celu orientacyjne rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych lub jako badania uzupełniające pozwalające na zagęszczenie punktów pomiarowych, a także w ramach monitoringu.

W badaniach środowiskowych mających na celu rozpoznanie zanieczyszczenia podłoża wykorzystywane są przeważnie dwie metody badań: metoda elektrooporowa (profilowanie, kartowanie oraz tomografia elektrooporowa) i elektromagnetyczna (np. [1, 2]). Ponadto, badania elektrooporowe i sejsmiczne są stosowane na szeroką skalę w monitoringu budowli hydro-technicznych (np. [3, 4, 5]). Do ich zalet, poza nieinwazyjnym charakterem, zalicza się niski koszt i szybkość uzyskania wyników, jak również możliwość zbudowania przestrzennego modelu podłoża bez konieczności wprowadzania ciężkiego sprzętu na badany teren. Do zalet tych metod należy również zaliczyć możliwość uzyskiwania ciągłych interpretacji w przekrojach badawczych lub w układzie przestrzennym.

Jedną z metod, która wykorzystywana jest od lat w geotechnice jest metoda elektrooporowa. Metoda ta, jak wykazały dotychczasowe badania (np. [6, 7]), jest wrażliwa na wilgotność i stan nasycenia wodą ośrodka gruntowego oraz zanieczyszczenie wody w porach gruntowych, szczególnie związkami soli. Interpretacja wyników badań terenowych wymaga uwzględnienia

wpływu wymienionych czynników na pomierzone wartości oporności elektrycznej ośrodka gruntowego. Metoda ta bazuje na założeniu, że grunty i skały, podobnie jak inne materiały, charakteryzują się zdolnością do przewodzenia prądu elektrycznego. Przykładowe wartości pozornej oporności właściwej wybranych skał i gruntów oraz wody przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Pozorne oporności właściwe wybranych ośrodków (na podstawie [6, 7, 8])

W praktyce pomiary oporności elektrycznej gruntu przeprowadzane są metodą wykorzystującą układ składający się z czterech elektrod (rys. 2). W metodzie tej prąd elektryczny wprowadzany jest do gruntu za pomocą dwóch elektrod A i B, które wzbudzają pole elektryczne, natomiast elektrody M i N mierzą różnicę potencjału tego pola. Znając różnicę potencjału pola elektrycznego (ΔV) i natężenie (I) płynącego prądu oraz odległości pomiędzy elektrodami można określić wartość oporności właściwej gruntu ze wzoru:

$$\rho = K_g \frac{\Delta V}{I} \quad [\Omega \cdot m] \quad (1)$$

gdzie:

ρ – oporność właściwa gruntu [Ωm],

K_g – stała geometryczna (w układzie Wennera $K_g = 2\pi a$ [m]),

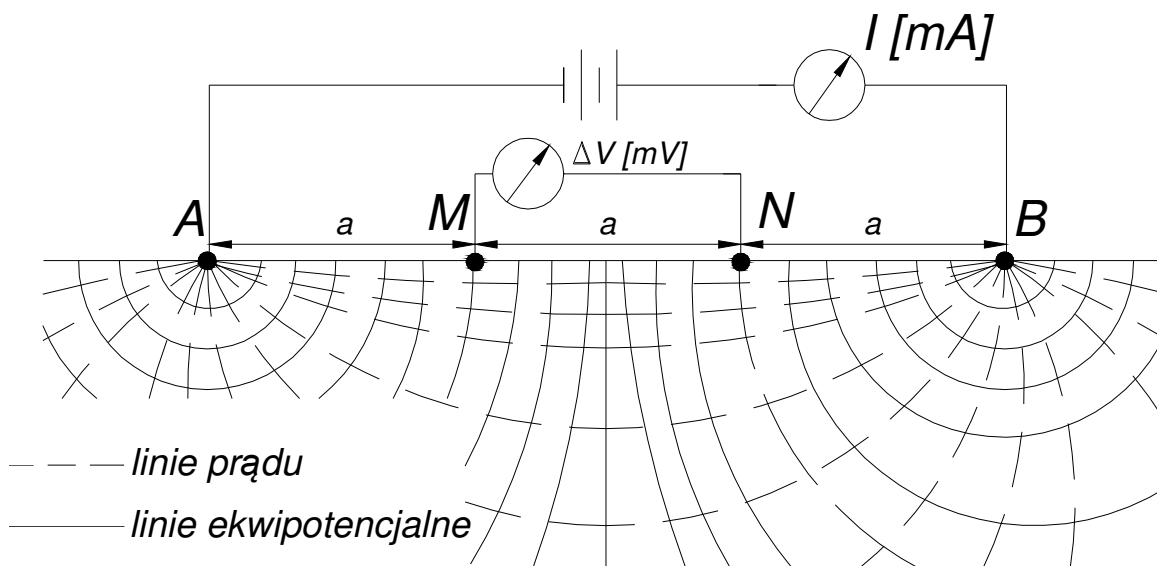
ΔV – różnica potencjału pola elektrycznego pomiędzy elektrodami M i N [V],

I – natężenie prądu wzbudzonego w gruncie [A].

Ważną zaletą badań metodą elektrooporową jest możliwość interpretacji w ciągłym przekroju geologicznym lub nawet w układzie przestrzennym, w przeciwieństwie do badań inwazyjnych, których interpretacja przeprowadzana jest w profilach punktowych i interpolowana w przekrojach geologicznych.

Czynnikiem wywierającym istotny wpływ na oporność elektryczną ośrodka gruntowego jest (obok porowatości, składu mineralnego szkieletu gruntowego, temperatury, wielkości i kształtu ziaren oraz wzajemnego ich ułożenia względem siebie [6, 7, 8]) również jego wilgotność oraz stężenie soli rozpuszczonych w wodzie wypełniającej pory gruntowe. Wpływ zasolenia wody gruntowej ma zatem istotny wpływ na parametr oporności elektrycznej gruntu

i wody gruntowej i należy spodziewać się różnic oporności w gruntach, które będą zanieczyszczone odciekami wydostającymi się ze składowisk odpadów. Zastosowanie w takich przypadkach metody elektrooporowej do monitorowania stanu technicznego uszczelnień wokół składowisk odpadów, okonturowania zasięgu ewentualnych zanieczyszczeń w gruncie oraz wskazania dróg migracji tych zanieczyszczeń jest w pełni uzasadnione. Badania geofizyczne umożliwiają też zlokalizowanie badań szczegółowych: wierceń i sondowań geotechnicznych, a także miejsc instalacji piezometrów i poboru próbek do laboratoryjnych analiz chemicznych.



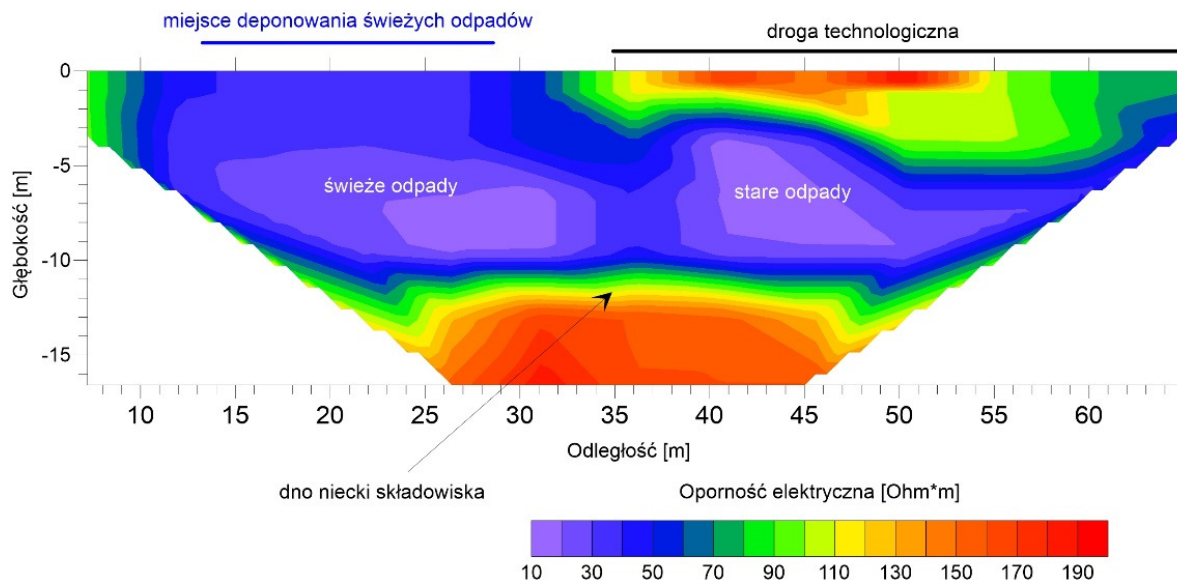
Rys. 2. Schemat pomiaru oporności elektrycznej gruntu w układzie czteroelektrodowym [8]

2. Zastosowanie metody elektrooporowej do rozpoznania nieszczelności izolacji składowisk odpadów – przykłady

Składowisko odpadów z uszczelnieniem podstawy geomembraną i gliną – bez awarii

Pierwszy z obiektów to czynne składowisko odpadów komunalnych, które funkcjonuje od 1996 r. Teren wokół składowiska zajmują lasy i nieużytki; najbliższa zabudowa mieszkaniowa znajduje się w odległości ok. 700 m od składowiska. Składowisko zlokalizowane zostało w wyeksploatowanym wyrobisku kruszywa. Jest to składowisko podpoziomowe o głębokości niecki do 12 m p.p.t. Podłoże niecki składowiska oraz jego skarpy uszczelnione są geomembraną HDPE o grubości 1,5 mm, pod którą została ułożona warstwa gliny o miąższości 0,5 m. Na geomembranie znajduje się warstwa zabezpieczająca, natomiast w dnie niecki składowiska położony został drenaż z perforowanych rur kamionkowych o średnicy 100 mm.

W ramach programu monitoringu środowiska wokół składowiska wykonane zostały w latach ubiegłych dwa odwierty: jeden w kierunku północno – wschodnim, drugi w kierunku wschodnim od niecki składowiska, czyli na przewidywanym kierunku odpływu wód podziemnych z rejonu składowiska. Na podstawie tych wierceń w podłożu stwierdzono występowanie morenowych glin i glin piaszczystych o miąższości ok. 4 m podścielonych piaskami i żwirami o nieustalonej głębokości zalegania spągu. Stwierdzono występowanie swobodnego zwierciadła wody na poziomach, odpowiednio 16,3 i 17,5 m p.p.t. Miąższość warstwy wodonośnej oraz rodzaj utworów pod nią zalegających nie zostały w trakcie prac ustalone. Badanie metodą tomografii elektrooporowej wykonane zostało w 2011 r. przy rozstawie elektrod tomografu wynoszącej 4,8 m i długości ciągu wynoszącej 72 m.



Rys. 3. Rozkład oporności elektrycznej w przekroju pionowym składowiska

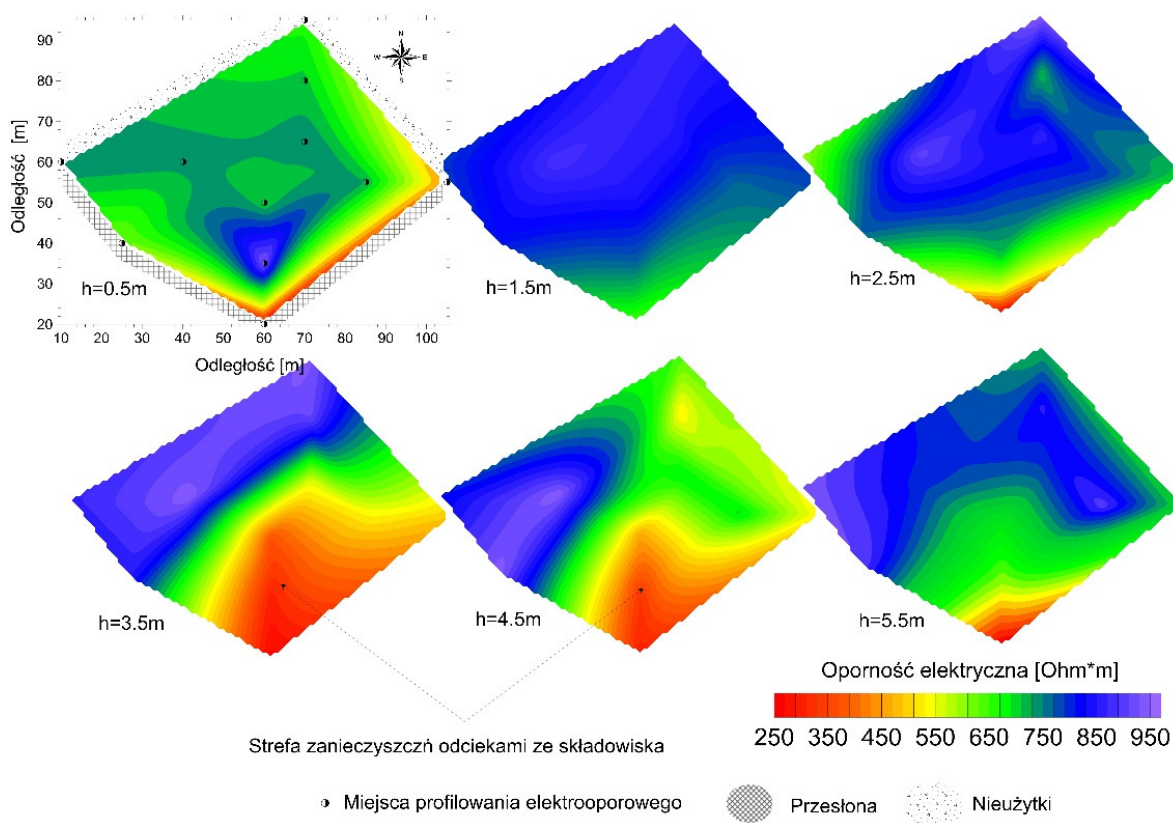
W centralnej i prawej części przekroju od powierzchni terenu oporność elektryczna wynosi 150–200 Ωm i wynika ze zlokalizowanej w tym miejscu gruntowej drogi dojazdowej do kwatery składowiska. Poniżej, znajdują się odpady stare (przykryte), których oporność elektryczna wynosi ok. 30–40 Ωm . Z lewej strony przekroju zlokalizowana jest kwatera, w której deponowane są zmieszane odpady komunalne, których oporność elektryczna wynosi poniżej 50 Ωm . Istotnym elementem przekroju, z punktu widzenia niniejszego artykułu, jest jego centralna część i granica pomiędzy bryłą składowiska, a gruntami położonymi poniżej uszczelnienia dna niecki. Centralna część przekroju, na głębokości pomiędzy 12 a 16 m p.p.t., charakteryzuje się opornością powyżej 160 Ωm , co potwierdza obserwowaną w profilu geologicznym wykonanym przed budową składowiska, warstwę suchych piasków zalegających na tej głębokości. Wykonane badania elektrooporowe nie wskazują na istnienie nieszczelności w dnie i skarpach składowiska, gdyż nie zaobserwowano stref o niskiej oporności elektrycznej w warstwie piasków pod bryłą składowiska. Prowadzony monitoring wód podziemnych i badania próbek wody z piezometrów również potwierdzają, że odcieki nie przedostają się poza uszczelnienie składowiska.

Zrekultywowane składowisko odpadów komunalnych – nieszczelna izolacja

Drugi obiekt badawczy to zrekultywowane składowisko odpadów, które funkcjonowało od 1994. Otoczenie składowiska stanowi las i nieużytki rolnicze z charakterystycznym silnym urzeźbieniem terenu z licznymi kulminacjami pagórków i dolin. Jest to składowisko podziemno-nadziemne umiejscowione również w byłym wyrobisku żwiru. Rzędna uszczelnionego dna składowiska wynosi 87,0 m n.p.m. przy rzędnych terenu pomiędzy 88–94 m n.p.m. Rozpoznanie geologiczne w obrębie żwirowni stwierdziło występowanie poeksploatacyjnych nasypów piaszczysto-żwirowych o miąższości 0,3–0,5 m, z wykształconą poniżej warstwą żwirów z soczewkami piasku, podścieloną kompleksem glin morenowych. Strop glin morenowych występuje na rzędnej 86,9 m n.p.m. Spadek swobodnego zwierciadła wód gruntowych, położonego zaledwie ok. 2 m p.p.t., jest w kierunku północnym. W 1994 r. wykonane zostało uszczelnienie dna i skarp wyrobiska geomembraną HDPE o grubości 1,5 mm z warstwą ochronną z glin ze złoża lokalnego oraz warstwą drenażową o grubości ok. 0,4 m ze zbieraczem u podnóża skarpy i z odprowadzeniem do zbiornika otwartego wód odciekowych. Po zamknięciu

składowiska i jego rekultywacji w 2014 r. od północnej strony składowiska wykonana została przesłona przeciwfiltracyjna zagłębiona w glinach.

Badania metodą elektrooporowego kartowania podłoża na terenie przyległym do składowiska wykonano w 2014. Badania zostały przeprowadzone na głębokościach od 0,52 do 5,2 m p.p.t. na powierzchni ok. 0,5 ha (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład oporności elektrycznej na poszczególnych głębokościach na terenie przyległym do składowiska

Analizując wyniki badań (rys. 4) można stwierdzić, że najmniejsze wartości oporności elektrycznej występują w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska i wraz ze wzrostem odległości od skarp wartości oporności rosną. Na głębokości 0,5 m ma to związek z większą wilgotnością spowodowaną spływem powierzchniowym wody ze skarp składowiska. Na głębokości 1,5 m oporności gruntów wynoszą ok. 800 Ωm i na całym obszarze są zbliżone do siebie. Nieco inaczej sytuacja przedstawia się na większych głębokościach, na których obserwujemy charakterystyczny klin o wyraźnie mniejszych opornościach, najbardziej widoczny na poziomach 3,5 i 4,5 m p.p.t. i zanikający na głębokości 5,5 m. Wskazuje to na nieszczelność izolacji składowiska. Okonturowana czerwonym kolorem strefa zanieczyszczenia wynika z przedostawania się zasolonych odcieków poza bryłę składowiska i sięga ona ok. 50 m poza teren składowiska.

Składowisko stare z pionową przesłoną przeciwfiltracyjną

Przedmiotem analizy było składowisko, które nie było uszczelnione w podstawie. Pierwsza warstwa wodonośna występuje na głębokości 0,5–2,0 m p.p.t. i była ona przez wiele lat narażona na zanieczyszczenia odciekami. Druga warstwa wodonośna znajduje się na głębokości 15–25 m p.p.t. i jest izolowana od góry warstwami glin zwałowych, a lokalnie iłów.

W ramach rekultywacji składowiska podjęto działania w celu wyeliminowania dopływu zanieczyszczeń do wód gruntowych. Szczególny wpływ na poprawę jakości wód podziemnych ma wykonana w 2000 r. pionowa przesłona przeciwfiltracyjna z zawiesziny twardniejącej (bentonitowo-cementowej) oraz system ujęcia i zagospodarowania odcieków [9, 10]. Potwierdzają to wyniki prowadzonego od kilkunastu lat monitoringu wód podziemnych i powierzchniowych. Niemniej w niektórych piezometrach w wybranych okresach obserwowane są duże wahania wartości oznaczanych wskaźników. Wahania te mogą wynikać z innych niż składowisko źródeł zanieczyszczeń (teren z licznymi zakładami przemysłowymi i z zakresu gospodarki odpadami, m.in. instalacja mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów) oraz zmiennych stężeń zanieczyszczeń wynikających z wahań poziomu zwierciadła wody gruntowej w warstwie o niewielkiej miąższości.

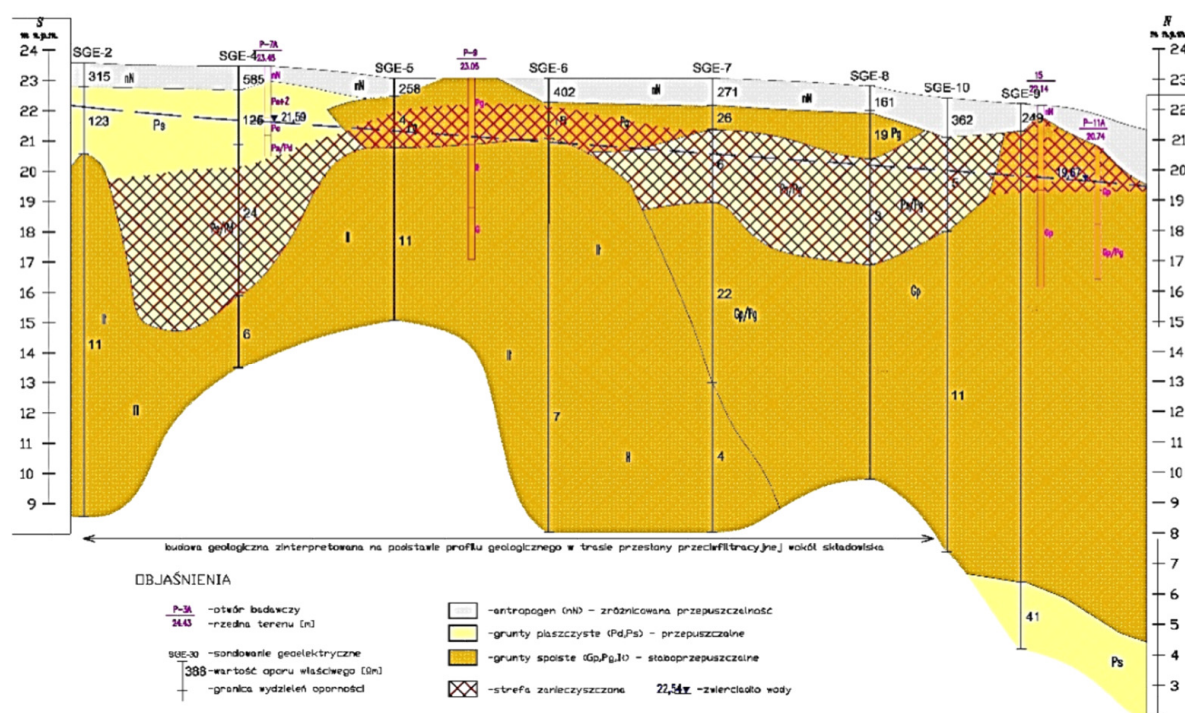
Badania geofizyczne miały na celu analizę wyników badań monitoringowych jakości wód podziemnych w aspekcie zmian poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń z uwzględnieniem warunków hydrogeologicznych i zagrożeń spowodowanych przez poszczególne instalacje dla środowiska wodno-gruntowego [9, 10]. Badania objęły wykonanie kilkudziesięciu sondowań geoelektrycznych (SGE) o rozstawie linii pomiarowej $AB/2 = 50\text{--}80$ m. Zastosowane rozstawy sondowań umożliwiły rozpoznanie budowy geologicznej do głębokości ok. 20 m. Wykonana interpretacja ilościowa pozwoliła na charakterystykę opornościową poszczególnych warstw gruntowych (rys. 5)

Na podstawie interpretacji ilościowej sondowań SGE sporządzono przekroje geoelektryczne (rys. 5), które pozwoliły na wydzielenie warstw na bazie danych z otworów badawczych oraz profilu geologicznego na zewnątrz trasy przesłony przeciwfiltracyjnej. Analiza rozkładu oporów wskazuje na migrację skumulowanych wcześniej zanieczyszczeń w pierwszej warstwie wodonośnej po zewnętrznej stronie przesłony przeciwfiltracyjnej. Na przekrojach geoelektrycznych zaobserwowano również stagnowanie zanieczyszczeń w lokalnych obniżeniach erozyjnych w stropie glin zwałowych, wypełnionych gruntami piaszczystymi (rys. 5). W obniżeniach takich następuje stagnowanie zanieczyszczeń z okresu, gdy składowisko nie było odizolowane, a przy ograniczonym odpływie wód z takich miejsc procesy samooczyszczania środowiska wodno-gruntowego są bardzo opóźnione i mogą trwać wiele lat. Z numerycznych badań modelowych wynika, że czas migracji „plamy” zanieczyszczeń od miejsca zamknięcia przesłony przeciwfiltracyjnej do najbliższego cieku wyniesie około 30 lat [11], a więc aktualnie jest to połowa tego okresu i zanikające stare zanieczyszczenia nadal mają znaczący wpływ na stan środowiska wodno-gruntowego. Potwierdzają to wyniki badań monitoringowych jakości wód i sezonowa zmienność tych parametrów wynikająca z wahań poziomu zwierciadła wody gruntowej (przy niższym poziomie wody obserwowane są wyższe stężenia wskaźników zanieczyszczeń). Na jakość wody gruntowej mają wpływ również inne niż składowisko źródła zanieczyszczeń występujące w jego otoczeniu (np.: zakłady przemysłowo-usługowe, obiekty przetwarzania odpadów, spływy z nawierzchni dróg i placów, przecieki z instalacji podziemnych).

3. Wnioski i podsumowanie

Podstawową funkcją, jaką muszą spełniać składowiska odpadów jest zapewnienie szczelności izolacji zabezpieczających przed migracją odcieków do środowiska wodno-gruntowego. W przypadku powstania awarii systemów izolacyjnych często wymagane jest zastosowanie nietypowych metod ich rozpoznania.

Badania geofizyczne metodą elektrooporową są przydatne do oceny zanieczyszczenia w rejonie składowisk, również do oceny nieszczelności w wykonanych systemach izolacyjnych, gdyż umożliwiają rozpoznanie podłoża również pod podstawą składowiska.



Rys. 5. Przekrój geoelektryczny obok starego składowiska z pionową przesłoną przeciwnfiltracyjną

W artykule przedstawiono trzy przykłady badań środowiska wodno-gruntowego w rejonie składowisk odpadów z wykorzystaniem metody elektrooporowej, obejmujące: składowisko szczelne, składowisko z nieszczelną izolacją poziomą oraz stare składowisko zabezpieczone pionową przesłoną przeciwnfiltracyjną. Przeprowadzone badania wykazały przydatność tej metody do oceny stanu izolacji składowisk odpadów oraz stanu zanieczyszczenia środowiska wodno-gruntowego w rejonie tych obiektów.

Literatura

1. Abu-Zeid N., Bianchini G., Santarato G., Vaccaro C. Geochemical characterization and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study. *Environmental Geology* 45, Italy, 2004, p. 439–447.
2. Kowalska A., Pierwoła J. Obrazowanie elektrooporowe wschodniej części otoczenia składowiska odpadów powęglowych Panewniki KWK „Halemba-Wirek”. *Kwartalnik Górnictwo i Geologia*, 2010.
3. Bestyński Z. Rozpoznanie litologii, tektoniki i parametrów mechanicznych fliszu, na przykładzie prawego przyczółka zapory Świnna Poręba. *Geofizyka: Biuletyn Informacyjny*, Nr 11/2013, Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, Warszawa, 2013.
4. Zabuski L. Analiza zachowania się sztolni hydrotechnicznych zapory w Świnnej Porębie. *Geofizyka: Biuletyn Informacyjny*, Nr 11/2013, PBG, Warszawa, 2013, s. 105–113.
5. Stopiński W. Bedrock monitoring by means of the electric resistivity method during the construction and operation of the Czorsztyn-Niedzica dam. *Acta Geophysica Polonica*, Vol. 51, no. 2, 215–256, 2003.
6. Keller G.V., Frischknecht F.C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford. 1966.
7. Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G. Electrical resistivity survey in soil science. *Soil and Tillage Research*. 83, 173–193, 2005.
8. Zahody A.A.P., Eaton G.P., Mabey D.R. *Electrical methods in US Geological Survey*. Technical Water Resources, USGS Publications, 1974.

9. Koda E., Kołanka T., Osiński P. Investigation of soil contamination level beneath the metallurgical waste landfill for the purpose of future reclamation works. *Annals of WULS – Land Reclamation*. 45 (1), 5–16. 2013.
10. Zadroga B., Olańczuk-Neyman K. *Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego. Aspekty geotechniczno-budowlane*. Wyd. Politechniki Gdańskiej. 2001.
11. Koda E. Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Nr 384. Wydawnictwo SGGW. Warszawa. 2011.

GEOELECTRICAL TESTS AS A METHOD OF LEAKAGE DETECTION IN LANDFILL CONTAINMENT SYSTEMS

Abstract: Landfills are structures, which one of the main characteristics is to assure insulation for elimination of contaminants transport into soil-water environment. For determination of such emergency cases a standard site investigation methods could be insufficient. It is mainly because of the landfill subsoil access difficulties, for wide and thick areas of waste disposed. At present, in engineering practice, more commonly geoelectrical testing method is used, for such sites. The present article focuses on presenting and analysing the results of geoelectrical tests carried out for three municipal landfills of different horizontal (geomembrane) and vertical (bentonite cut-off wall) containment systems. The methods presented in the paper assess the construction condition and potential migration paths of the leaking contaminants.

Keywords: geoelectrical tests, landfill, containment, vertical barrier, groundwater and soil contamination.