

## SALTWATER MONITORING WITH LONG-ELECTRODE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

### MONITORING WÓD ZASOLONYCH PRZY UŻYCIU METODY TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ DŁUGICH ELEKTROD

THOMAS VOß<sup>1</sup>, MATHIAS RONCZKA<sup>2</sup>, THOMAS GÜNTHER<sup>2</sup>

**Abstract.** Since 2011 the German well logging company Bohrlochmessung – Storkow GmbH and the German Leibniz Institute for Applied Geophysics are engaged in the joint research project ‘SAMOLEG – Saltwater monitoring with long electrode geoelectrics’ (electrical resistivity tomography – ERT), with a grant of the German Federal Ministry of Education and Research. The basic concept of SAMOLEG is to use the existing networks of old steel-cased groundwater measuring wells as current injection and voltage electrodes for electrical resistivity tomography measurements in order to obtain deeper access to salt water bearing aquifers than with conventional surface ERT. Permanent wiring of several old wells would give the opportunity to conduct cost-efficient ERT measurements for saltwater monitoring with a high temporal sampling on sites that are threatened by saltwater rise due to anthropogenic (e.g. natural gas /CO<sub>2</sub>-storage, water production from wells) or natural causes (e.g. decreasing precipitation due to climate change). First model tank and numerical modelling experiments reveal different sensitivities of ‘equal-length’ and ‘unequal-length’ combinations of wells to rising or laterally inflowing saltwater. Field measurements on a test site in Eastern Brandenburg with known groundwater salinization demonstrate the monitoring potential of the SAMOLEG concept.

**Key words:** electrical resistivity tomography (ERT), long electrodes, saltwater monitoring, environmental safety of CO<sub>2</sub>-storage, complete electrode model.

**Abstrakt.** Od 2011 roku niemieckie przedsiębiorstwo geofizyki otworowej Blm – Storkow GmbH wspólnie z Instytutem Leibniza ds. Geofizyki Stosowanej są zaangażowane w projekt badawczy pt. SAMOLEG – Monitorowanie zasolenia wód podziemnych za pomocą elektrooporowej metody długich elektrod” (tomografia elektrooporowa) – grant Niemieckiego Federalnego Ministerstwa Edukacji i Badań Naukowych. Zasadniczą ideą projektu SAMOLEG jest wykorzystanie istniejącej sieci starych stalowych studni i piezometrów jako elektrod prądowych i pomiarowych w technice tomografii elektrooporowej, w celu dostępu do głębszych zasolonych poziomów wodonośnych, niż mogłoby to mieć miejsce bazując na konwencjonalnych powierzchniowych metodach elektrooporowych. Trwałe okablowanie kilku studni w wybranej sieci badawczej dałoby możliwość przeprowadzania częstego niskonakładowego monitoringu zasolenia wód w miejscach, które z przyczyn antropogenicznych (np. magazynowanie gazu lub CO<sub>2</sub>, zintensyfikowane ujmowanie wód podziemnych) oraz naturalnych (np. niewielkie opady atmosferyczne wywołane zmianami klimatycznymi) zagrożone są podniesieniem się poziomu wód zasolonych. Pierwsze badania laboratoryjne oraz modelowanie numeryczne ujawniły zmienne czułości kombinacji elektrod o równej i różnej długości względem wznosu lub bocznego dopływu wód, natomiast pomiary terenowe we wschodniej Brandenburgii, na polu testowym o znanym zasoleniu wód podziemnych, potwierdziły zakładany potencjał monitoringowy koncepcji SAMOLEG.

**Słowa kluczowe:** tomografia elektrooporowa, długie elektrody, monitoring wód zasolonych, bezpieczeństwo środowiskowe magazynowania CO<sub>2</sub>, kompletny model elektrodowy.

<sup>1</sup> Blm-Storkow GmbH, Schützenstraße 33, D-15859 Storkow, Germany; e-mail: voss@blm-storkow.de

<sup>2</sup> Leibniz Institute for Applied Geophysics, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Germany; e-mail: Mathias.Ronczka@liag-hannover.de, Thomas.Guenther@liag-hannover.de

## INTRODUCTION

A widely discussed possibility to reduce CO<sub>2</sub> emission is the capture of CO<sub>2</sub> from the exhaust of its main industrial producers and its subsequent storage in deep geological formations, e.g. in depleted oil-/gas fields or salt water bearing aquifers (CCS – Carbon Dioxide Capture and Storage). The sedimentary North German Basin (NGB) with its numerous salt pillows and diapirs has a high potential for CCS. A CO<sub>2</sub> storage structure must be formed like a typical geological trap with sealing layers above porous sedimentary rocks and it must be deep enough (> ~800 m) in order to keep the CO<sub>2</sub> in its volume saving “quasi-liquid” supercritical state. The inflow of CO<sub>2</sub> into the pore space of the storage rock can be realised only by over-pressure against the saline pore water. So, even if the storage structure is tight against the buoyant force of the CO<sub>2</sub>, the overall increase of formation pressure might cause saltwater to rise into higher, freshwater-bearing aquifers. Due to natural and/or anthropogenic causes, in many areas of the NGB the salt-/freshwater boundary lies al-

ready now close to the surface. This affects in some cases even the production of water works, which have to take care not to provoke a further rise of saltwater by too much pumping from their wells. Therefore, the further development of efficient saltwater monitoring methods that could be integrated in an early warning system plays an important role for environmentally safe geological CO<sub>2</sub>-storage.

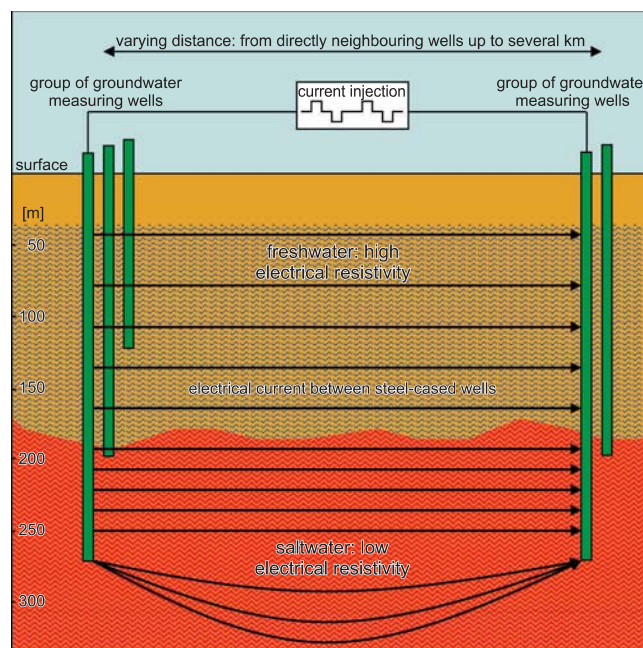
In 2010 the German Federal Ministry of Education and Research published the research call “Geological CO<sub>2</sub>-storage – long-term safety” under the special research program “Geotechnologien”. The small and medium-sized well logging company “Bohrlochmessung – Storkow GmbH” together with the Leibniz Institute for Applied Geophysics Hannover could successfully apply for a grant from this program with a joint research proposal that suggests the use of existing networks of old steel-cased groundwater measuring wells as long electrodes for cost-efficient electrical tomographic monitoring measurements.

## GENERAL CONCEPT

The general concept of SAMOLEG is the utilization of steel-cased groundwater wells as electrodes for ERT measurements (see Fig. 1). A large number of steel-cased groundwater measuring wells exists especially in the Eastern part of Germany. Once built with high effort during hydrogeological and lignite exploration campaigns they are nowadays mostly not used anymore for periodical measurements. While their technical suitability (tight casing joints, open filter screen slots) for water sampling or piezometric measurements is often unknown, long electrode ERT (Daily *et al.*, 2004) could be a mean to reuse this existing infrastructure.

Compared to ‘classical’ surface ERT measurements with plugged point electrodes, SAMOLEG offers the advantages of greater measuring depth with the same electrode separation, a “ready-installed” electrode layout, good electrode coupling to the underground and the possibility of in-electrode water sampling for calibration purposes. The degree of corrosion of the old casing pipes especially in salt water environments should be checked beforehand by appropriate logging methods (for example electromagnetic wall thickness measurements or camera inspection) in order to assess the effective coupling length of the casing correctly.

The SAMOLEG concept emphasizes the monitoring aspect with focus on high temporal resolution which can be efficiently realized by permanent wiring of groundwater wells as long electrodes on a site with the threat of saltwater rise. Of course, spatial resolution is low compared to surface ERT with much smaller distances between the electrodes (Rucker *et al.*, 2010).



**Fig. 1. General concept of ERT measurements using old steel-cased groundwater wells as current injection electrodes (voltage measurements on steel-cased wells not included in the figure)**

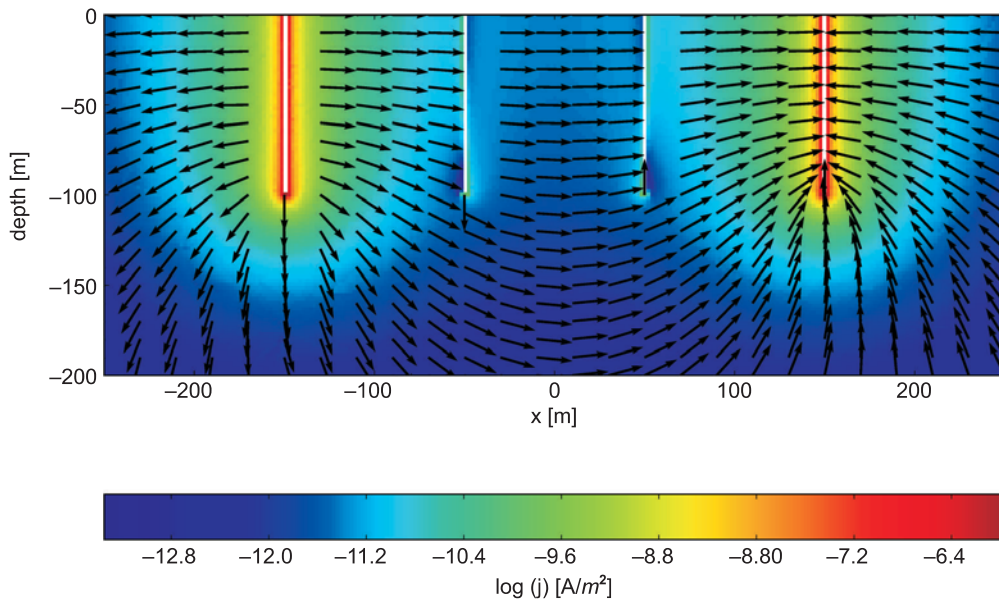
Ogólne założenia metody elektrooporowej przy użyciu starych stalowych studni głębinowych jako elektrod prądowych (pomiar potencjału na stalowych studniach nie załączone na rycinie)

## FIRST MODELLING RESULTS

The behaviour of ‘long’ electrodes (‘long’ relative to electrode separation) differs compared to ‘point’ electrodes, on which bases the ‘classical’ theory, modelling and inversion of surface ERT. The study of long electrodes must take into account the impact of the exact electrode geometry on spatial current distribution as a function of varying coupling/ contact resistance along the electrode body which can be surrounded by

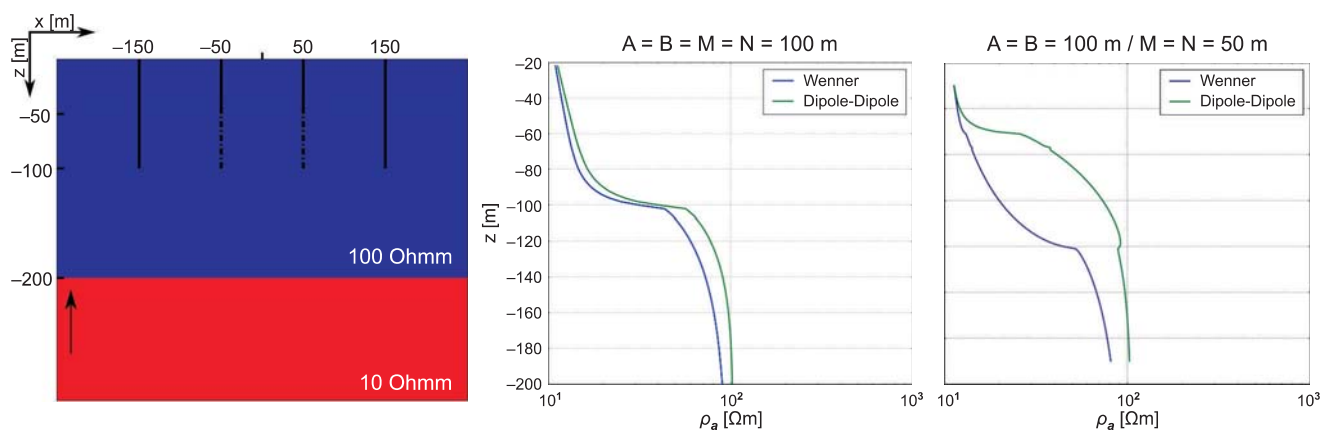
different geological layers or water with different salinization. First model tank and numerical modelling experiments using the complete electrode model (Rücker, Günther, 2011) (see Fig. 2) were conducted to analyse long electrode sensitivity to a freshwater/ saltwater boundary.

The evaluation of the first modelling results shows the varying sensitivity of different sets of electrode lengths and



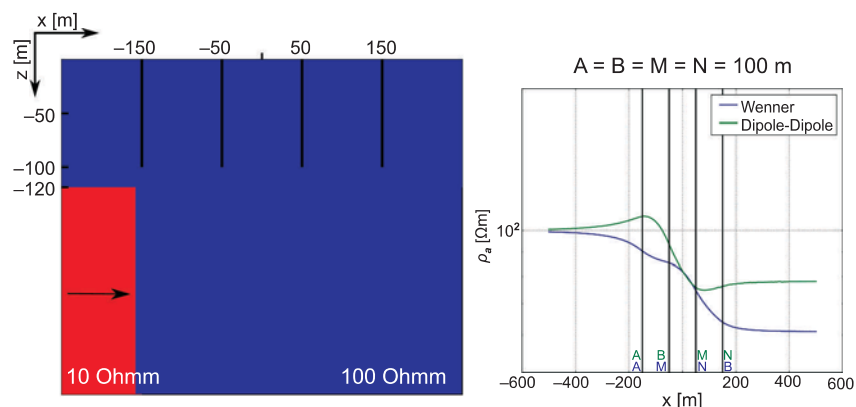
**Fig. 2.** Numerical modeling the current density between two outer steel-cased wells used for current injection while the inner wells are used for measuring the voltage

Numeryczne modelowanie gęstości prądu elektrycznego pomiędzy dwoma zewnętrznymi stalowymi studniami jako elektrodami prądowymi (studnie wewnętrzne służą jako elektrody pomiarowe)



**Fig. 3.** Numerical modelling of saltwater rise (10 Ohmm) into a freshwater bearing aquifer (100 Ohmm) and its impact on the measured apparent resistivity with a Wenner and Dipole-Dipole array of four ‘equal-length’ steel-cased wells (100 m) and an ‘unequal-length’ set of wells (100/50 m)

Numeryczne modelowanie podnoszenia się wód zasolonych (10 Ohmm) w warstwie wodonośnej wód słodkich (100 Ohmm) i jego wpływ na mierzona oporność pozorną w układzie Wenner’a i Dipol-Dipol czterech równej długości studni stalowych (100 m) oraz zestawu studni o różnej długości (100/50 m)



**Fig. 4.** Numerical modelling of lateral saltwater inflow (10 Ohm) into a freshwater bearing aquifer (100 Ohm) and its impact on the, measured apparent resistivity with a Wenner and Dipole-Dipole array of four ‘equal-length’ steel-cased wells (100 m)

Numeryczne modelowanie bocznego dopływu wód zasolonych (10 Ohm) do warstwy wodonośnej wód słodkich (100 Ohm) i jego wpływ na mierzoną oporność pozorną w układzie Wenner’a i Dipol-Dipol czterech równej długości studni stalowych (100 m)

arrays (e.g. Wenner, Dipole-Dipole) towards rising saltwater. An ‘unequal-length’ distribution with longer current injection than voltage electrodes is more sensitive towards a further rise of saltwater than an ‘equal-length’ set of electrodes if the longer wells already reach into the saltwater bearing aquifer. If the saltwater has not reached the bottoms of the wells yet an ‘equal-length’ set of electrodes (that in a way

shifts the ‘classic’ surface electrodes downwards) shows better sensitivity to rising saltwater than ‘unequal-length’ combinations of saltwater (see Fig. 3). Dipole-dipole arrays show higher sensitivity to a lateral inflow of saltwater while a vertical rise is detected with a better sensitivity by the Wenner array (see Fig. 4).

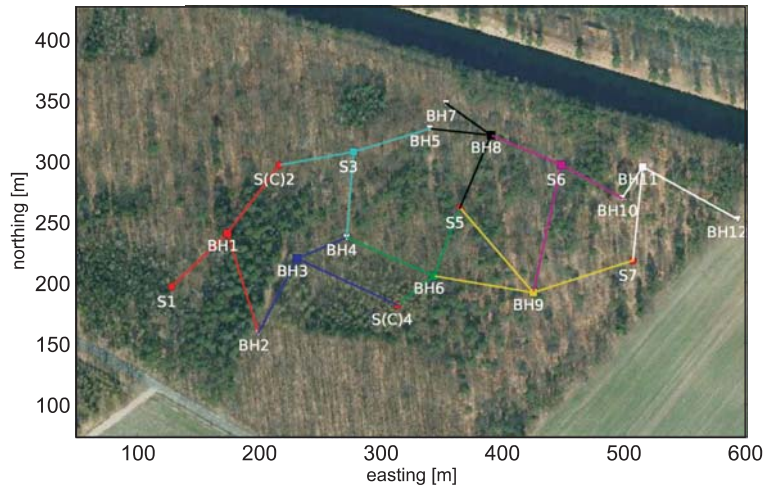
## FIRST FIELD TESTS

A very suitable test site for SAMOLEG measurements was found in the vicinity of the town Müllrose, close to the Polish border in the central eastern part of the Brandenburg federal state. The test site covers an area of roughly  $1.0 \times 0.5$  km of woodland and possesses a rather simple, nearly one-dimensional near-surface geological structure. The upper 40 m are made up from Pleistocene sand and gravels, which overlie approximately 50 m thick Miocene coal and silt layers. This uncovered surface aquifer was the target of an intensive hydrogeological exploration campaign that took place in the years 1986/1987 in order to prove the suitability for building a new water works for the town Frankfurt/Oder. During the exploration salt water with NaCl concentrations up to 1000 mg/l was discovered in the upper aquifer. The salt concentration shows a heterogeneous lateral and vertical distribution pattern. More than 40 single steel-cased groundwater measuring and production test wells were built on the site with depths ranging mostly from 5–40 m. Water samples of one deeper well whose filter screen was placed in a depth of 100 m in the Miocene aquifer below the lignite / silt layer show a comparatively low salinization of only 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . This proves that the salt water does not migrate upwards through cracks or erosion channels inside the silt / lignite but rather flows horizontally from distant sources into the test site. One well on the site is still periodically sampled by the

environmental agency of Brandenburg what allows the direct calibration of the ERT monitoring data. The chemical analysis of these water samples proves a high temporal variability of the depth of the fresh/salt water boundary on the test site which presumably depends strongly on annual precipitation and infiltration rates.

The high density of steel-cased wells, the heterogeneous distribution of salt water and a dynamic variation of salt concentration as indicated by the periodic sampling make the site ideally suited to evaluate the monitoring potential of the SAMOLEG method. In November 2012 both ‘classical’ profiling and long electrode ERT measurements were carried out on the site. A sensitivity analysis with the complete electrode model (Rücker, Günther, 2011) was carried out beforehand in order to distinguish between promising and non-promising electrode current injection and voltage measuring combinations. Some surface electrodes were added in order to obtain a more evenly distributed electrode network over the site’s surface (see Fig. 5).

The inversion of the measuring data using the BERT software (Günther *et al.*, 2006) on a triangular prism mesh shows some lateral variation of resistivity which can be directly linked to the ‘stream-like’ inflow of saltwater over the underlying silt / lignite layers (see Fig. 6). Surprisingly, even some degree of vertical resolution could be obtained

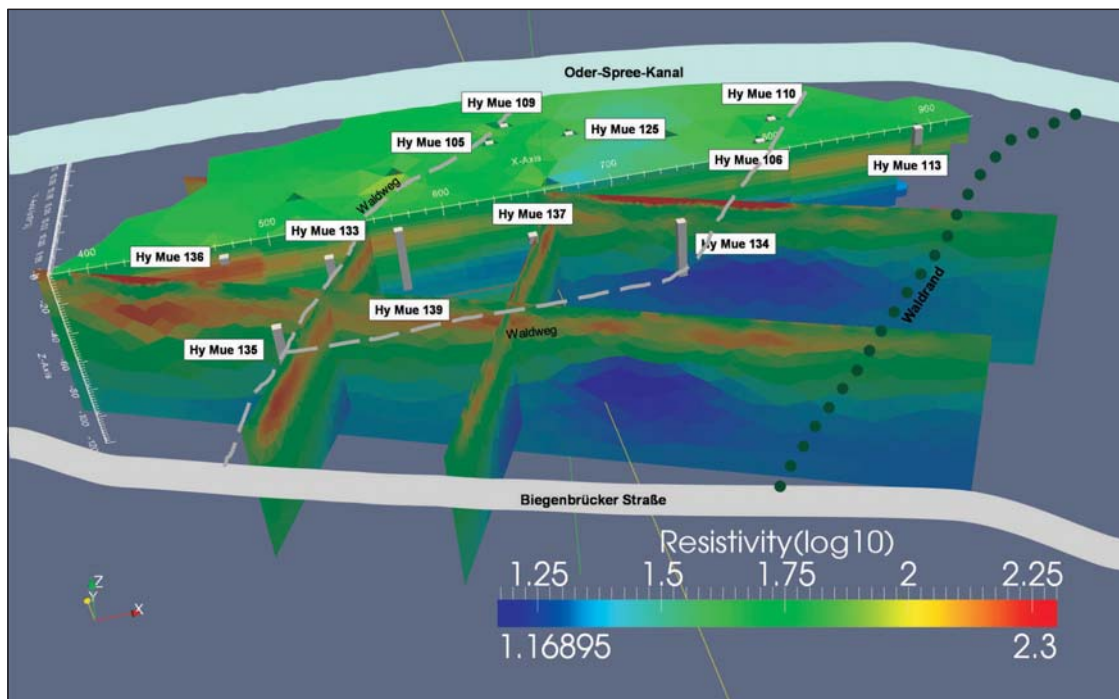


**Fig. 5.** Distribution of steel-cased groundwater wells (BH) and surface electrodes (S) used for ERT measurements on the test site Müllrose

Rozstaw stalowych studni głębinowych (BH) i elektrod powierzchniowych (S) użytych podczas tomografii elektrooporowej na polu testowym Müllrose

from the data, likely because the used long electrodes had varying lengths and some surface electrodes were added. It is planned to permanently wire the wells on the site and to perform periodical measurements in 2013 and 2014 combined

with water sampling from some of the wells in order to monitor dynamic variations of the salt water concentration and distribution.



**Fig. 6.** Inversion results of first SAMOLEG measurements on the Müllrose test site in combination with ‘classical’ surface 2D-ERT profiles. The steel-cased boreholes used for current injection and voltage measurements are drawn as grey cuboids indicating their depths

Wyniki inwersji pierwszych pomiarów metodą SAMOLEG na polu testowym Müllrose w połączeniu z profilami konwencjonalnej dwuwymiarowej tomografii elektrooporowej. Stalowe otwory użyte jako elektrody prądowe i pomiarowe zaznaczone są jako szare prostopadłości wskazujące ich głębokość

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

With the currently running research project SAMOLEG, which is granted by the German Federal Ministry of Education and Research, the project partners Bohrlochmessung – Storkow GmbH and Leibniz Institute for Applied Geophysics are evaluating the potential of old steel-cased groundwater measuring wells to serve as electrodes for monitoring saltwater intrusion in freshwater bearing aquifers using ERT. First laboratory and numerical modelling using the complete electrode model (Rücker, Günther, 2011) reveals that the sensitivity of long electrodes to detect rising saltwater strongly depends on electrode array configuration, overall elec-

trode length in relation to saltwater depth and electrode separation as well as the length difference between single electrodes used for current injection and voltage measurements. ‘Unequal-length’ electrode length combinations (i.e. groundwater measuring wells with varying depths) seem to have best sensitivity when saltwater already reached the bottom of the deeper wells. First field measurements on a test site in Eastern Brandenburg with a known shallow saltwater intrusion and a high density of steel-cased wells demonstrated the imaging potential of the method.

## REFERENCES

- DAILY D.W., RAMIREZ A.L., NEWMARK R., MASICA K., 2004 — Low-cost tomographs of electrical resistivity, *The Leading Edge* **23**: 472–480.
- GÜNTHER T., RÜCKER C., SPITZER K., 2006 — Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion, *Geophys. J. Int.* **166**: 506–517.
- RÜCKER C., GÜNTHER T., 2011 — The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model, *Geophysics* **76**(4), F227–F238.
- RÜCKER D.F., LOKE M.H., LEVITT M.T., NOONAN G.E., 2010 — Electrical-resistivity characterisation of an industrial site using long electrodes, *Geophysics* **75**: 95–104.

## STRESZCZENIE

Monitorowanie zasolenia wód podziemnych na większych obszarach przy zastosowaniu wyłącznie otworowych metod geofizycznych jest zbyt kosztowne. Idealne byłoby połączenie metod powierzchniowych o małej rozdzielczości, dających możliwość szybkiego pomiaru obszarów wielkopowierzchniowych, z uszczegółowiającymi pomiarami w odwiertach o wysokiej rozdzielczości pionowej. Poprzez cykliczną powtarzalność pomiarów można w ten sposób odgraniczyć obszary, w których dochodzi do zmian mineralizacji wód podziemnych. Na tych obszarach mogą wówczas zostać zainstalowane punkty pomiarowe, które za pomocą otworowych technik monitoringowych (m.in. profilowania indukcyjnego PI) oraz poboru próbek wody, będą dokładniej kontrolowane. Sprawdzoną powierzchniową metodą geofizyczną do określania oporności elektrycznej gruntu jest metoda elektrooporwa. Jednak podczas monitoringu zasolenia wód podziemnych przy głębokościach ok. 200–300 m, klasyczne układy pomiarowe musiałyby charakteryzować się rozstawem rzędu 1200–2000 m, co poważnie utrudniłoby praktyczne zastosowanie metody w wymagającym terenie. Ponadto, wraz z głębokością znacznie spada czułość metody, tj. jej zdolność do rejestracji zmian oporności. Jednym ze sposobów uzyskania większej głębokości pomiaru przy jednoczesnym małym nakładzie, jest zastosowanie tzw. długich elektrod, sięgających do monitorowanych warstw wodonośnych. Takimi długimi elektrodami mogą być zarurowane

otwory hydrogeologiczne, stalowe piezometry oraz studnie głębinowe. Do tego celu mogą posłużyć także inne podziemne przewodniki, jak np. rurociągi wody pitnej i przemysłowej, rury okładzinowe w odwiertach eksploatacyjnych ropy naftowej i gazu ziemnego, pręty uziemiające, stalowe ściany oporowe, grodzie, itp. Biorąc pod uwagę wpływ budowy geologicznej danego obszaru, opór elektryczny byłby miarą zasolenia wody w warstwie wodonośnej między studnią a piezometrem. Dzięki systematycznym pomiarom można by w ten sposób uzyskać informacje o zmianie mineralizacji wód podziemnych w funkcji czasu.

Głównym celem proponowanego projektu badawczego jest opracowanie systemu monitoringu, który określi optymalną równowagę pomiędzy niezbędną rozdzielczością przestrzenno-czasową a nakładami finansowo-logistycznymi. Pierwsze pomiary terenowe we wschodniej Brandenburgii na polu testowym o znanej, płytko zalegającej intruzji wód zasolonych oraz gęstej sieci stalowych studni i piezometrów potwierdziły zakładany potencjał metody. Natomiast badania laboratoryjne oraz modelowanie numeryczne przy użyciu kompletnego modelu elektrodowego ujawniają, że czułość długich elektrod do wykrycia podnoszącej się granicy wód zasolonych znacznie zależy od konfiguracji rozstawu, długości elektrod oraz odległości pomiędzy poszczególnymi elektrodami.