

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 16 (2011)

Heft: 1

Artikel: Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten der geoelektrischen 2D-Tomographie

Autor: Holub, Petr

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-327739>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten der geoelektrischen 2D-Tomographie Petr Holub¹

Stichworte: Geoelektrische 2D-Tomographie, Grundwasserprospektion, Rohstoffprospektion, Altlasten, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie.

Zusammenfassung

Die Anwendung der elektrischen 2D-Tomographie in der geologischen Praxis hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die anschauliche Darstellung der tomographischen Resultate ist für viele Anwender beeindruckend, muss jedoch vom praktizierenden Geophysiker sachlich erläutert werden. Die 2D-Tomographie eignet sich vor allem bei der Erkundung von kleineren und mittelgrossen Gebieten, wo es sinnvoll ist, längs von Profilen den Untergrund mehr oder weniger detailliert zu untersuchen. Dabei muss stets ein Kompromiss zwischen gewünschter Eindringtiefe und möglicher Auflösung gefunden werden, weil die beiden Parameter vom vorgängig gewählten Elektrodenabstand abhängen. In diesem Artikel werden einige typische Anwendungen aus den Bereichen Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Rohstoffprospektion und Altlasten vorgestellt. Des Weiteren werden die Möglichkeiten und Grenzen der 2D-Tomographie diskutiert.

Résumé

L'utilisation de la tomographie électrique 2D a augmenté ces dernières années dans le domaine de la géologie appliquée. La présentation des résultats de la tomographie est souvent impressionnante, cependant elle doit être accompagnée par le commentaire d'un géophysicien expliquant ces images d'une façon réaliste. Cette méthode se prête surtout à des prospections de détail dans des zones de grandeurs petites à moyenne où la surface à étudier permet une investigation du sous-sol le long des profils. Un compromis doit être trouvé entre la profondeur d'investigation désirée et une résolution suffisante, étant donné que les deux paramètres sont liés à l'écartement préalablement défini des électrodes. Dans cet article quelques applications de la tomographie électrique en hydrogéologie, géologie de l'ingénieur, prospection des graviers et environnement (site pollué) sont présentées et les possibilités et limites de la méthode sont évoquées.

Abstract

The 2D electrical imaging (resistivity imaging or tomography) has been increasingly used in the last 15 years in geophysical practice worldwide. The representation of the results is often very impressive but the geophysicist should clearly explain and comment their meaning. This method is suitable for detailed and medium-sized investigations where profile network is advantageous. Nevertheless a compromise between investigation depth and resolution must be made as these parameters depend on the electrode spacing that has to be pre-configured. This paper shows some typical applications in the fields of hydrogeology, engineering geology, resource prospecting and environmental (landfill site). Some possibilities and limits of the 2D-tomography are discussed.

¹ Geotest AG, Birkenstrasse 15, 3052 Zollikofen

1. Einführung

Die seit mehr als 15 Jahren angewandte Methode der Widerstandstomographie erobert immer mehr das Interesse der Naturwissenschaftler für ganz verschiedene Problemstellungen. Die Vorteile der Widerstandsgeoelektrik liegen vor allem im oberflächennahen Lockergesteinsbereich (bis zu 40 m Tiefe), wo sie ihre Vorzüge voll entfalten kann. Die Palette der Anwendungen reicht von der Archäologie über Altlasten, Ingenieurgeologie (u. a. Autobahnbau, Tunnelbau), Hydrogeologie, Permafrostuntersuchung, Erzprospektion und anderes mehr.

In der Archäologie und Erzprospektion wird oft 3D Tomographie praktiziert. Diese detaillierte Anwendung der Tomographie ist bei kleinräumigen Strukturen von grossem Vorteil, aber die Datenerfassung ist in der Regel sehr zeitaufwendig und kostspielig.

Die Widerstandstomographie kann bei Projekten im Zusammenhang mit der Altlastenuntersuchung und Erzprospektion vorteilhaft mit der Methode der Induzierten Polarisation (IP) ergänzt werden. Die IP-Methode ist besonders empfindlich auf Anreicherung metallischer Partikel im Untergrund. Sie wird seit langem in der Erzprospektion beispielsweise bei der Erkundung von sulfidischen Imprägnationslagerstätten erfolgreich verwendet. Die IP-Methode kann deshalb bei der Untersuchung von Deponien eingesetzt werden, trotz einem wesentlich grösseren Zeitaufwand.

In diesem Artikel zeigen wir einige Beispiele aus der Praxis und weisen auf die wichtigsten Punkte bei der Planung der Untersuchungsprojekte sowie auf die Grenzen dieser Untersuchungsmethode hin.

2. Klassische Messverfahren der Gleichstrom-Widerstandsgeoelektrik

Bis Mitte der 90er Jahre wurden verbreitet die geoelektrische Widerstandskartierung und die vertikalen elektrischen Sondierungen (VES, Schlumberger Verfahren) angewandt. Die beiden Verfahren wurden in der Hydrogeologie, Rohstoffprospektion (in der Schweiz vorwiegend bei der Kieserkundung) und Ingenieurgeologie jahrzehntelang recht häufig eingesetzt. Allein in der Schweiz wurden zwischen den Jahren 1960 und 2000 mehr als 15'000 VES durch verschiedene private geologische Büros und mehrere Universitäten ausgeführt (D. Chapellier: Atlas des résistivités de la Suisse, Schweizerische Geophysikalische Kommission, in Vorbereitung). Diese Messungen wurden hauptsächlich im Schweizer Mittelland und grossen alpinen Tälern realisiert. Die Interpretation der VES erfuhr in den 80er Jahren dank der Informatikentwicklung weitgehende Verbesserungen und Vereinfachungen in der Handhabung und Interpretation der Messdaten. Das Verfahren VES hat jedoch bis heute seine Bedeutung nicht verloren.

3. Methode der 2D-Tomographie und ihre Anwendungen

Bei der geoelektrischen 2D-Tomographie wird mit Hilfe von elektrischem Strom, der in den Boden eingespeist wird, der Untergundaufbau in zwei Dimensionen (nach Tiefe und in horizontaler Richtung) auf seinen spezifischen elektrischen Widerstand hin untersucht. Veränderungen im elektrischen Widerstand geben Hinweise auf eine Veränderung der Bodenbeschaffenheit. Die geoelektrische 2D-Tomographie ist eine Weiterentwicklung und Kombination aus den Methoden der geoelektrischen Kartierung und vertikalen elektrischen Sondierungen. Eine grosse Anzahl Elektroden wird entlang eines linienförmigen Messprofils in regelmässigen Abständen in den Erdboden

gesteckt. Alle Elektroden sind über mehradrige Kabel mit dem Datenerfassungs-Messgerät verbunden. In einer Messreihe über das ausgelegte Profil steuert nun das Messgerät viele verschiedene Kombinationen von zwei Sender- (Stromimpulse) und zwei Empfängerelektroden (für Potentialmessung) nacheinander an. Auf diese Art werden mehrere hundert Messungen innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne ausgeführt.

Mit Hilfe eines Computerprogramms werden die Messdaten zusammengesetzt, mit den topographischen Profildaten ergänzt und anschliessend mit einer Software (Inversionsalgorithmus mit Optimierung nach den kleinsten Quadraten) iterativ invertiert. Durch die Dateninversion entsteht ein physikalisches Untergrundmodell (2D Widerstands-Tiefensektion), das in der Regel farbig dargestellt wird. Anschliessend wird aufgrund der lokalen geologischen Kenntnisse und Erfahrungen das physikalische Untergrundmodell in ein geologisches Modell umgesetzt.

Im Gegensatz zu einer vertikalen elektrischen Sondierung, deren Ergebnis ein diskretes Schichtmodell darstellt, gibt die 2D-Tomographie weniger scharfe Grenzen des Untergrundes wieder. Weitere detailliertere Informationen zur Anwendung der 2D-Tomographie können z. B. in Loke & Barker 1996 bzw. in Marescot et al. 2003 gefunden werden.

Mit der 2D-Tomographie werden in erster Linie die gleichen Probleme angegangen, die schon mit der elektrischen Kartierung und den elektrischen Tiefensondierungen seit Jahrzehnten untersucht worden sind. Bei vielen Anwendungen hat sich jedoch die Aussagekraft der Ergebnisse gegenüber früher stark verbessert. Die Auflösung ist den beiden klassischen geoelektrischen Methoden überlegen. Mit der Tiefe nimmt die Auflösung jedoch ab. Die Grenzenbestimmung wird in grösserer Tiefe zunehmend unscharf, u. a. infolge des sogenannten 3D Effekts (d. h. infolge allfälliger geologischer Strukturwechsel senkrecht zum Profil). Wie gut ein physi-

kalisches Modell des Untergrundes einem geologischen Modell entspricht, hängt von der Komplexität des letztgenannten ab. Bei der Planung einer Untersuchung ist der Auswahl der Messkonfiguration (Wenner, Dipol-Dipol, Wenner-Schlumberger u. a.) grosse Aufmerksamkeit zu schenken. Weiter muss ein Kompromiss zwischen der angestrebten Eindringtiefe (grösserer Elektrodenabstand nötig) und Auflösung (bei kleinerem Elektrodenabstand wird die Auflösung besser) gefunden werden.

Es ist empfehlenswert, die Widerstandstomographie wenn möglich durch vertikale elektrische Sondierungen (VES) zu ergänzen, welche dank den Tomographie-Ergebnissen sinnvoll platziert werden können. Dies deshalb, weil die vertikale elektrische Sondierung ein besseres vertikales Schichtauflösungsvermögen besitzt und somit zur Interpretation der gestellten Probleme wertvolle Beiträge leisten kann.

Die häufigsten Anwendungen der Widerstandstomographie (u. a. in der Schweiz) sind im Folgenden aufgezählt.

Hydrogeologie/Umwelt

- Bestimmung der Mächtigkeit von siltig-tonigen Deckschichten, welche den Grundwasserträger schützen;
- Ermittlung der Aquifermächtigkeit;
- Suche nach Bereichen erhöhter Aquifermächtigkeit und Durchlässigkeit (z. B. alte Flussrinnen);
- Lokalisieren von optimalen Standorten für Wasserfassungen;
- Abklärung der Materialbeschaffenheit von Hochwasserschutz-Dämmen;
- Eindringen von Salzwasser in Aquifers in Meeresküstengebieten.

Ingenieurgeologie

- Geologische Struktur im allgemeinen (Kalibration mit Bohrungen unerlässlich);
- Hohlräume suchende;
- Ausdehnung und Mächtigkeit von feinkörnigen (setzungsempfindlichen) Schichten;

- Lokalisierung von zerklüfteten/verwitterten Felszonen (u. a. Tunnelbau).

Altlastenuntersuchung

- Ausdehnung der Altlastkörper (in Kombination mit IP-Methode);
- Untersuchung von kontaminierten Sickerwegen;
- Mächtigkeit bzw. Volumenbestimmung von Altlasten (in Kombination mit IP-Methode).

Permafrostuntersuchungen

- Detektion von Eisbildungen in Zusammenhang mit Permafrost;
- Mächtigkeitsabschätzung der oberflächennahen Auftauschicht;
- Tiefe des Felsuntergrundes, evtl. in Kombination mit der Refraktionsseismik.

Rohstoffprospektion

- Kiesprospektion: Abraummächtigkeit, Abschätzung der Kiesmächtigkeit und Materialqualität;
- Ermittlung der Verwitterungszonen in Steinbrüchen;
- Tiefe und Intensität der Verkarstung von Kalksteinvorkommen.

Archäologie

- Detaillierte Erkundung von physikalisch detektierbaren archäologischen Relikten wie Mauerreste, alte Wege usw. im oberflächennahen Untergrund;
- Die Widerstandstomographie (mit kleinen Elektrodenabständen) wird oft in Kombination mit Georadar bzw. Magnetik verwendet.

4. Anwendungsbeispiele

Alle dargestellten Beispiele wurden mit dem Gerät «Syscal R1 plus (Switch 72)» gemessen. Es wurden generell 4 Kabelsektionen mit je 18 Elektroden verwendet, so dass für die Datenerfassung insgesamt 72 Elektroden im Einsatz waren. In allen hier beschriebenen

Fällen haben wir eine Wenner-Schlumberger-Messanordnung verwendet. Die maximale Eindringtiefe betrug, je nach gewähltem Elektrodenabstand, zwischen 15 m und 35 m.

4.1 Hydrogeologie: Grundwassererkundung in Emmen

Eine klassische Anwendung der 2D-Tomographie ist die Ermittlung der Mächtigkeit der Wasser führenden Schichten in alluvialen Lockergesteinen. Im Emmenfeld, Reusstal (Gemeinde Emmen, LU) sollte ein Standort für ein neues Trinkwasserpumpwerk der Gemeinde gefunden werden. In einem etwa 16 ha grossen Gebiet wurden in zwei Untersuchungsphasen 6 Profile zwischen 284 m und 355 m Länge ausgeführt. Da der Wasserspiegel nur etwa 3–4 m unter der Terrainoberfläche liegt, war der Einfluss der trockenen Schotter unter einer dünnen Deckschicht auf die Messdaten kaum spürbar. Die Mächtigkeit der gut durchlässigen Schotter ist in den Profilen gut ersichtlich (in Fig. 1 in orange/rot wiedergegeben).

Eine Sondierbohrung (EB2) wurde gemäss der Empfehlung des Geophysikers im Norden, eine andere (EB1) war in einem Abstand von etwa 150 m im Süden (ausserhalb des abgebildeten Profils) abgeteuft. Der in der Bohrung EB2 ausgeführte Pumpversuch mit Flowmetertest ergab eine sehr grosse Durchlässigkeit (k -Wert $\approx 1E-02$ m/s) in dem orange/rot markierten Tiefenbereich. Die andere Bohrung mit einem etwas unterschiedlichen Schichtaufbau zeigte eine etwas weniger gute Durchlässigkeit.

Ein anomaler Unterbruch der gut durchlässigen Schicht beim Profilmeter 120–126 wurde in ähnlicher Form in allen untersuchten Profilen detektiert. Die genaue geologische Deutung ist nicht ganz evident. Es ist jedoch anzunehmen, dass dort der Kies viel mehr sandig-siltige Anteile enthält und die weniger durchlässigen (feiner körnige) siltig-tonigen Schichten höher liegen als im übrigen untersuchten Bereich. Möglicherweise liegt

an diesem Ort auch die darunterliegende Molasse höher, weil sich die gut korrelierbare Anomalienachse in der Verlängerung eines Molasserückens (ein etwa 700 m entfernt flacher Hügel im Westen) befindet.

4.2 Ingenieurgeologie: Autobahn A9, Gedeckter Einschnitt Pfyngut, VS

Im Bereich des projektierten gedeckten Einschnitts Pfyngut der A9 westlich von Leuk und am westlichen Rand des Bachschuttkegels Illgraben sind durch die vorgängig ausgeführten Sondierbohrungen setzungsempfindliche tonige Schichten (Sumpf- und See-

ablagerungen) angetroffen worden. Die Mächtigkeit dieser feinkörnigen (elektrisch gut leitenden) Schichten variiert sowohl in der Längsrichtung des projektierten Autobahntrasses als auch quer dazu. Ziel der geoelektrischen Untersuchung war es, den räumlichen Verlauf der feinkörnigen, setzungsempfindlichen Sumpf- und Seeablagerungen in einem Tiefenbereich zwischen einigen wenigen Metern und 20 m zu ermitteln. Die feinkörnigen Ablagerungen (in Fig 2 in blau dargestellt) weisen einen sehr niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand auf und lassen sich deshalb von den grobkörnigeren Sand- und Kiesablagerungen gut

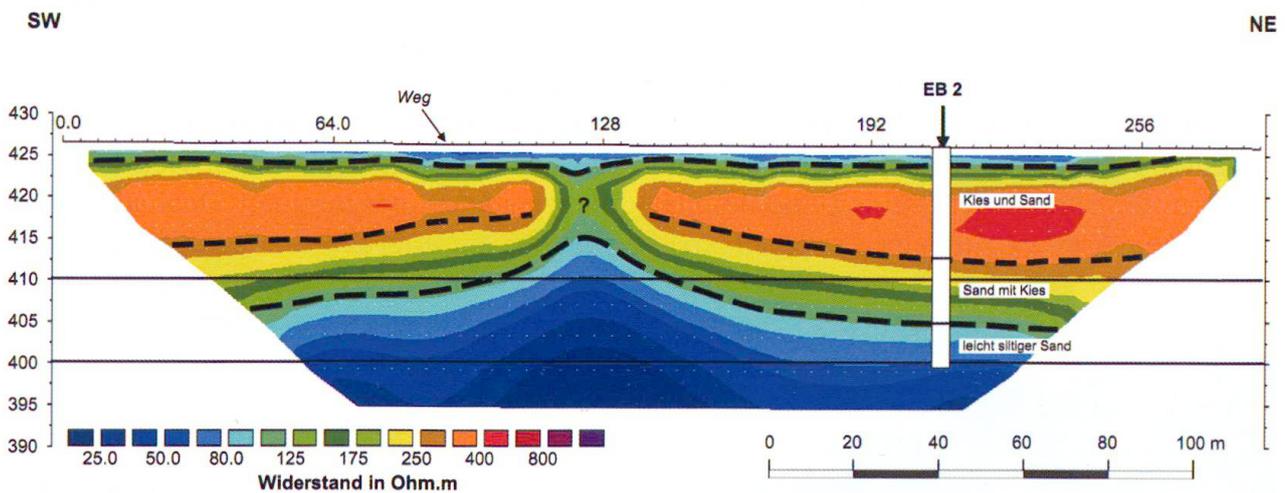


Fig. 1: Widerstands-Tomographie-Profil mit Bohrergebnis in der Lockergesteinsfüllung des Reusstals. Profillänge 284 m, Elektrodenabstand 4 m (Standort: Emmenfeld, LU).

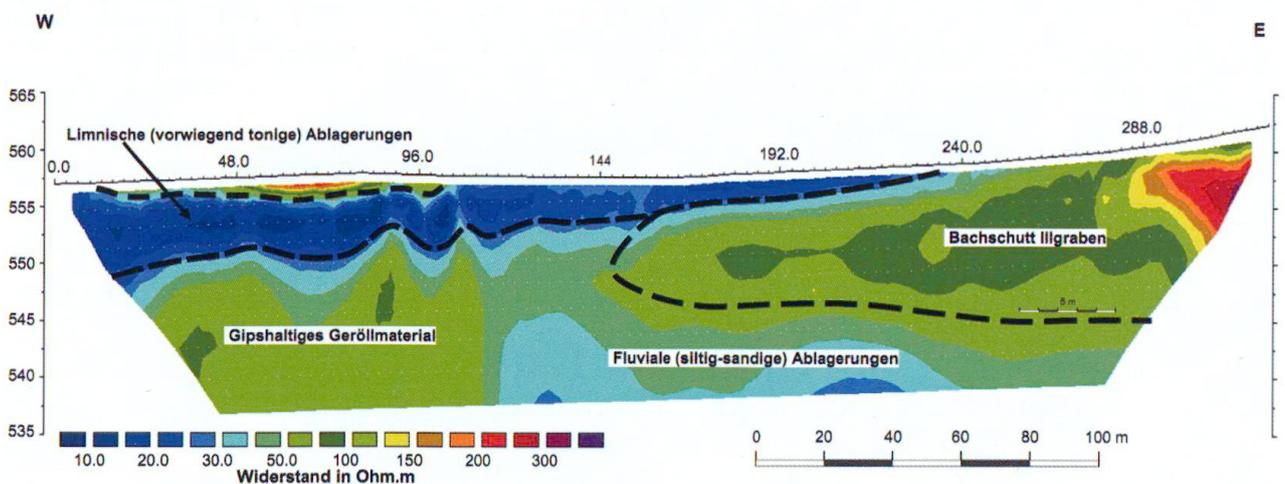


Fig. 2: Untersuchung von feinkörnigen setzungsempfindlichen Sumpf- und Seeablagerungen. Profillänge 320 m, Elektrodenabstand 3 m (Standort: Pfyngut, VS).

unterscheiden. Insgesamt wurden 1500 m Profile untersucht. Die Resultate der Geoelektrik wurden auf einem Profil mit Rammsondierungen verifiziert. Die Ergebnisse der Rammsondierungen zeigten eine recht gute Übereinstimmung mit den Resultaten der 2D-Tomographie bezüglich Mächtigkeit der setzungsempfindlichen Schicht. Da die mechanischen Sondierungen generell in einem fixen Raster platziert wurden, wären lokale Verdickungen der setzungsempfindlichen Schicht ohne die kontinuierlichen Resultate der Geoelektrik unerkant geblieben.

4.3 Altlastuntersuchung: Sanierungsprojekt En Colliare, Penthaz, VD

Im Rahmen eines Sanierungsprojektes der komplexen Altlast En Colliare in der Gemeinde Penthaz nördlich von Lausanne sollten möglichst genaue Kenntnisse über Ausdehnung und Volumen einzelner Deponieteile gewonnen werden. Aufgabe der geoelektri-

schen Untersuchung war es, die Ausdehnung und Mächtigkeit von diversen Altlastanteilen, verteilt auf drei Stellen in einer ehemaligen Kiesgrube, zu bestimmen (Dubath 2010). Alle im Jahre 2006 durchgeführten Messungen wurden als Kombination der 2D-Widerstands- und Induzierten Polarisation (IP)-Tomographie vorgenommen. Die Mächtigkeit der verschiedenen Altlast-Sektoren variierte gemäss vorhandener Unterlagen zwischen etwa 7 m und 35 m. Je nach vermuteten Altlastmächtigkeiten wurden Elektrodenabstände zwischen 2 m und 5 m verwendet. Die Widerstandstomographie zeigte mangels genügendem Widerstandskontrast keine klare Abgrenzung des Deponiekörpers. Mit Hilfe der IP-Tomographie konnten dagegen die Deponieausdehnung und Mächtigkeit der beiden kleineren Altlasten klar ermittelt werden. Das durch die Altlast durchsickernde Oberflächenwasser sowie das Grundwasser wurden seit vielen Jahren immer stärker verunreinigt. Deshalb wurde eine Umgruppierung der beiden kleineren



Fig. 3: Grenze zwischen einem der drei Deponiekörper und dem umliegenden Lockergestein.

Altlasten im Rahmen der Sanierung beschlossen. Die zwei kleineren Altlasten wurden gemäss dem neuen Sanierungskonzept im Jahre 2009 ausgebaggert und auf einen neuen Platz auf eine neu erstellte Isolationschicht beim grössten Altlastkörper (Volumen ca. 650'000 m³) aufgebracht. Während der Freilegung des Deponiekörpers (Fig. 3, Aufnahme vom September 2009) konnten die Resultate der geoelektrischen Messungen direkt verifiziert werden.

Der Deponiekörper Fosse (Fig. 4) ist mit den erhöhten IP-Werten (chargeability von mehr als 8 mV/V) charakterisiert. Die kleine Anomalie rechts im Profil gehört bereits zum

Deponieteil Morlataire, der mit einem anderen Profil untersucht worden war.

Es gibt Deponien, wo nur mittels Widerstands-Tomographie die Ausdehnung oder mögliche Sickerwege von verunreinigtem Deponiewasser innerhalb bzw. ausserhalb der Deponie detektiert werden können. Nach unserer Erfahrung ist es in den meisten Fällen jedoch die IP-Methode, welche Ausdehnung und Mächtigkeit des Deponiekörpers besser abschätzen kann. Dies trifft besonders im Falle einer tonig-siltigen Umgebung der Deponie zu, wo kaum ein genügender Widerstands-kontrast vorhanden ist.

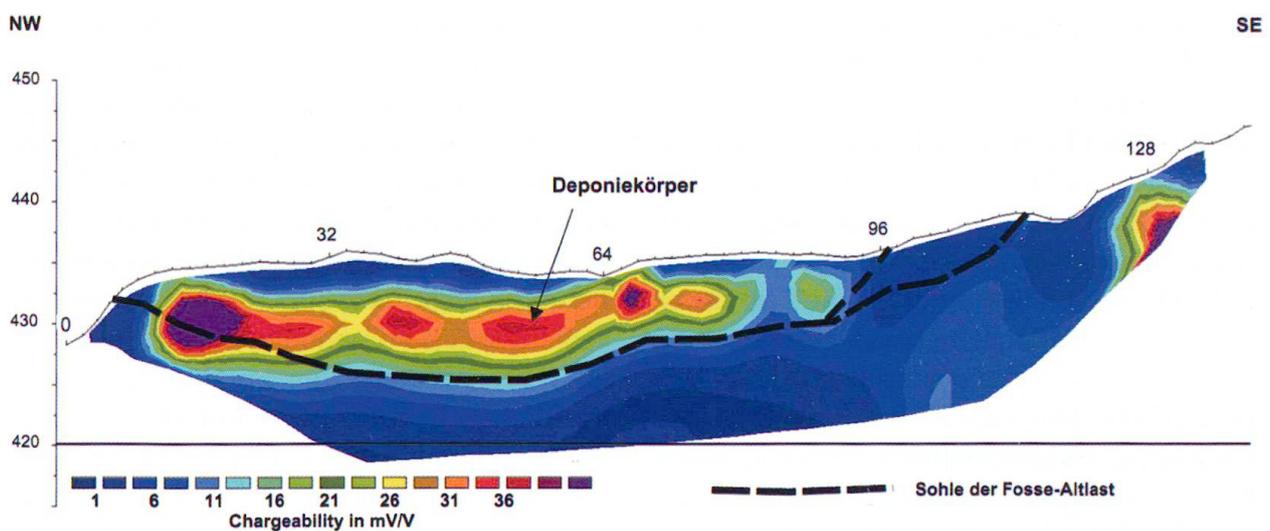


Fig. 4: Altlastuntersuchung mit 2D-Tomographie (Induzierte Polarisation). Profillänge 140 m, Elektrodenabstand 2 m (Standort: En Colliare, Penthaz, VD, Altlastkörper Fosse).

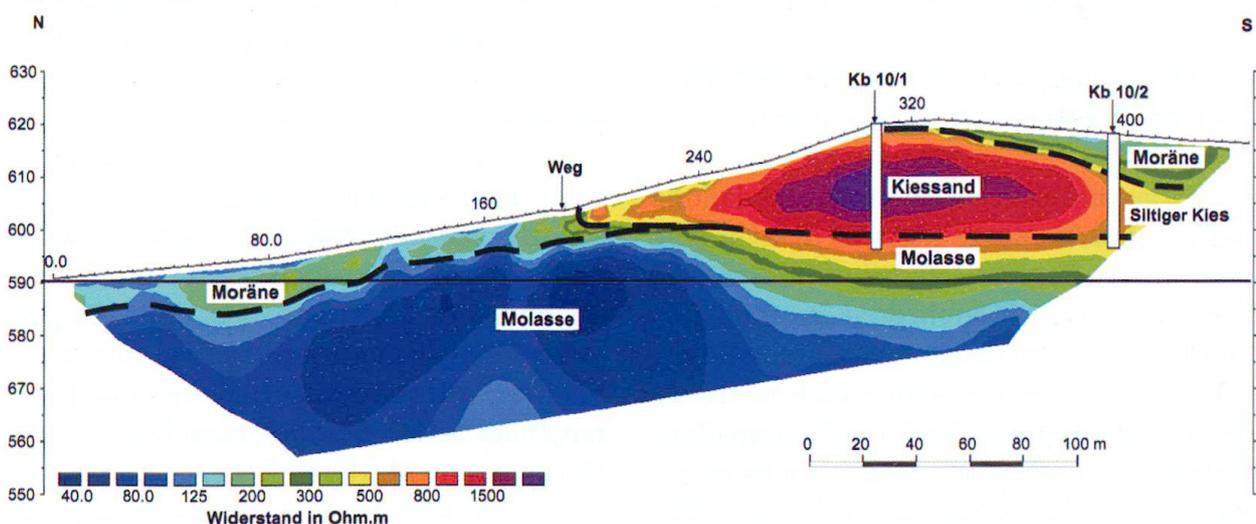


Fig. 5: Kiesprospektion mit 2D-Tomographie. Profillänge 445 m, Elektrodenabstand 5 m (Standort: Mädersforst, BE).

4.4 Rohstoffprospektion: Deponie Mädersforst

Im Rahmen der Suche nach einem geeigneten Deponiestandort für das Tunnelausbruchmaterial aus dem projektierten Eisenbahntunnel Rosshäusern-Mauss (BLS Linie Bern-Neuchâtel) wurden im Gebiet Forst in der Nähe einer bestehenden Kiesgrube geoelektrische Voruntersuchungen ausgeführt. Zweck war, die Erkundung der Ausdehnung des Kieskörpers im Hinblick auf die Planung eines kombinierten Kiesabbaus und einer Wiederauffüllung mit dem Ausbruchmaterial aus dem Tunnel. Ein 2D-tomographisches Profil in N-S Richtung durch das Untersuchungsgelände ist in Fig. 5 wiedergegeben. Anschliessend wurden drei Sondierbohrungen abgeteuft, zwei davon direkt auf dem dargestellten Profil. Die Mächtigkeit der oberflächennahen Moräne stimmt gut mit dem Bohrerergebnis überein. Die Unterkannte des Kieskörpers ist gemäss Bohrerergebnis mit der gestrichelten Linie dargestellt. Sie liegt etwas höher als ursprünglich gemäss der Resultate der 2D-Tomographie vermutet wurde. In den beiden Bohrungen Kb 10/1 und Kb 10/2 wurde unter der Kiesschicht direkt der Molassefels angetroffen. In der Bohrung Kb 10/2 war das Kiesmaterial mehr sandig-siltig ausgebildet als in der Bohrung Kb 10/1, wie aufgrund der Geoelektrik (kleinere elektrische Widerstände des Kiesmaterials) zu erwarten war.

4.5 Rohstoffprospektion: Kiesvorkommen Region Zell, LU (Zeller Schotter)

Im Rahmen der regionalen Abbauplanung der z. T. bereits ausgebeuteten Kiesvorkommen in der Region Zell-Ufhusen-Ruefswil wurden ab 1986 in mehreren Etappen geoelektrische Untersuchungen durchgeführt. Anfangs wurden ausschliesslich vertikale elektrische Sondierungen (VES) eingesetzt, welche u. a. mächtige (gegenwärtig abgebaute) Kiesablagerungen im Gebiet Zeller Allmend südlich von Zell nachgewiesen haben. Anschliessend wurden Sondierboh-

rungen abgeteuft, welche die folgende Schichtverteilung zeigten: unter einer dünnen Deckschicht folgt eine etwa 20–25 m mächtige Kiesschicht, die als Obere Zeller Schotter (OZS) bezeichnet wird. Diese Oberen Zeller Schotter sind von einer tiefer liegenden mächtigen Kiesschicht (Untere Zeller Schotter, UZS) durch fein- bis mittelkörnige Ablagerungen (Mittlere Zeller Schotter, MZS) getrennt. Die MZS sind durch einen Wechsel von siltigen Sanden bis sandigen Kiesen, oft mit einem hohen Anteil an feinkörnigen Verlandungssedimenten (Müller & Schlüchter 1997) charakterisiert. Das gegen oben zunehmend feiner körnige Material der MZS konnte in einer Bohrung mittels Gamma Ray und Neutron-Neutron Logs «geophysikalisch» dokumentiert werden. Infolge ihrer beschränkten Mächtigkeit innerhalb des gesamten Schotterkomplexes konnten die MZS mit den VES jedoch nicht eindeutig erfasst werden. Aufgrund der Bohrerergebnisse wurde eine Reinterpretation der VES mit einer elektrisch gut leitenden Zwischenschicht (MZS) vorgenommen.

Im Jahre 2006 wurden im Hügелgebiet im nördlichen Lutherntal 2D-tomographische Untersuchungen durchgeführt. Dank 3600 m 2D-Tomographie-Profilen, ergänzt mit einigen VES und unter Berücksichtigung bestehender Bohrerergebnisse, konnten die vorhandenen Kiesreserven im Hinblick auf die regionale Gesamtplanung von Kiesabbau und Rekultivierung räumlich eingegrenzt werden. Zur Verifizierung wurden ergänzende Bohrungen vorgeschlagen.

Das in Fig. 6 dargestellte Profil wurde in einer Hanglage (hangparallel) ausgeführt, so dass die oberflächennahe Kiesschicht (OZS) mit der Messung nur z. T. erfasst wurde und die darunter liegenden MZS und UZS geoelektrisch getrennt ermittelt werden konnten. Die Widerstände der Oberen und Unteren Zeller Schotter liegen zwischen 800 und 1500 Ωm , die Mittleren Zeller Schotter weisen Widerstände von lediglich 100 bis 500 Ωm auf. Weiter ist im Profil links der Kontakt zur Molasse erkennbar.

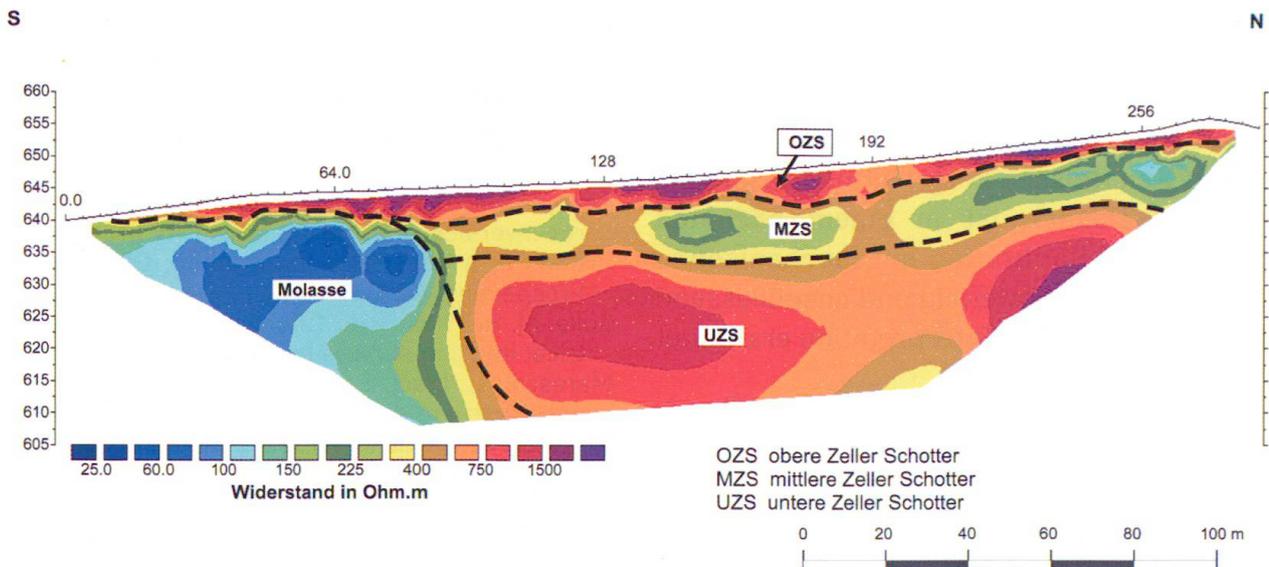


Fig. 6: Kiesprospektion mit 2D-Tomographie. Profillänge 284 m, Elektrodenabstand 4 m (Standort: vorde-res Lutherental, Zell, LU).

5. Möglichkeiten und Grenzen der geoelektrischen Tomographie

Aus Sicht der praktischen Durchführbarkeit können geoelektrische Messungen im Flachland fast überall problemlos durchgeführt werden. In Funktion der gestellten Aufgabe und gewünschter Eindringtiefe wird eine Messanordnung (Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipol-Dipol, Pol-Dipol) gewählt und der Elektrodenabstand festgelegt. In den meisten Fällen ist eine grössere als die gewünschte Eindringtiefe empfehlenswert, da Erfahrungen zeigen, dass der Auftraggeber die Untersuchungstiefe oft als zu klein einschätzt, was sich auf die Messresultate negativ auswirken kann. Die Ausrichtung der Profile soll dabei die geologischen Vorkenntnisse des zu untersuchenden Geländes berücksichtigen. In einem Tag können mit einem Standard-Elektrodenabstand von 5 m bis zu 1 km Profil oder etwas mehr untersucht werden. Allerdings ist bei der Planung von geoelektrischen Untersuchungen stets auf allfällige unterirdische Metalleitungen zu achten.

Im Hochgebirge (z. B. bei Permafrostuntersuchung) muss eine besondere Sorge dem Kontakt zwischen den Elektroden und dem

Untergrund gewidmet werden. Oft müssen längere Elektroden mit befeuchteten Schwämmen verwendet werden. Deshalb sind die Vorbereitungen im Gebirge viel zeitaufwendiger als im flachen offenen Gelände. Entsprechend geringer ist im Gebirge die tägliche Arbeitsleistung.

Die Darstellung der tomographischen Resultate erfolgt generell in Form von Widerstandsgradienten-Profilschnitten. Bei relativ einfacher Problemstellung ist diese Darstellung ausreichend, denn sie gibt verhältnismässig gut die geologische Situation wieder. In vielen komplexeren Problemen, bedingt durch seitlich wechselhaften Schichtaufbau des Untergrundes bzw. eine Zunahme des Feinmaterials unterhalb einer mächtigen grobkörnigen Schicht, wird das tomographische Ergebnis nicht entsprechend detailliert wiedergegeben.

Die Lage des Grundwasserspiegels im Lockergestein spielt ebenfalls eine wesentliche Rolle, weil der trockene Kiessand einen 3 bis 5 mal (bzw. mehr) höheren elektrischen Widerstand als der wassergesättigte auf-

weist. In allen solchen Fällen sollte eine erste Interpretationsvariante vom Geophysiker bzw. zusammen mit dem Projekt leitenden Geologen anhand der lokalen geologischen Kenntnissen vorgelegt und diskutiert werden. Danach ist in einem nächsten Schritt eine Kalibration mit mechanischen Sondierungen notwendig und anschliessend kann eine definitive Interpretation erarbeitet werden.

Bei einer komplizierten Oberflächentopographie sowie in einem stark wechselhaften Untergrund können ebenfalls Verzerrungen in der bildgebenden Darstellung entstehen. Dann ist grosse Vorsicht beim Interpretieren derprozessierten Messdaten nötig. Deshalb sollten Profillinien möglichst senkrecht zu den mutmasslichen geologischen Strukturen platziert werden. Ein sogenannter 3D-Effekt (Artefakt) kann jedoch bei wechselnden Untergrundverhältnissen senkrecht zum Tomographie-Profil entstehen. Dies kann insbesondere mit der zunehmenden Eindringtiefe der Fall sein, deshalb dürfen solche verdächtigen Artefakte nicht überinterpretiert werden. Bis zu einem gewissen Punkt kann man diesem Problem entgegenwirken, in dem man eine Mehrzahl von parallelen Profilen (Pseudo 3D-Messung) untersucht, was jedoch zu erhöhten Kosten bei den Feldarbeiten führt.

Je nach Problemstellung und vorhandenen Platzverhältnissen im Untersuchungsgelände sollen ergänzende vertikale elektrische Sondierungen durchgeführt werden. Wichtig ist, dass im Falle positiver Ergebnisse eine Verifizierung der geoelektrischen Resultate durch Sondierbohrungen oder durch Baggerschlitz vorgenommen wird. Erst dann können die geoelektrischen Resultate verlässlicher quantitativ interpretiert werden.

Literatur

- Dubath, M. A. 2010: L'assainissement de l'ancienne décharge de Colliare (Penthaz, VD). Bulletin de l'ARPEA (Journal Romand de l'Environnement) 243, 35–39.
- Loke, M. H. & Barker, R. D. 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44/1, 131–152.
- Loke, M. H. 1996-2010: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (www.geoelectrical.com).
- Marescot, L., Liaci, S. & Chapellier, D. 2003: Etude géoélectrique des cours d'eau interglaciaires à l'Ouest de la ville de Fribourg. *Eclogae geol. Helv.* 96/2, 261–273.
- Müller, B. U. & Schlüchter, C. 1997: Zur Stellung der Zeller Schotter in der Alpenen Eiszeiten-Chronologie und ihre stratigraphische Beziehung zu den Schieferkohlen von Gondiswil. *Eclogae geol. Helv.* 90/2, 211–227.