

Geophysikalische Bildgebung zur Charakterisierung von Deponien und der internen Abfallzusammensetzung

A. Flores-Orozco, M. Steiner, J. Gallistl, & A. Ivanova

Technische Universität Wien, Geodäsie und Geoinformation – Forschungsbereich Geophysik, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Deponien sind hochkomplexe Systeme, bei denen das Abfallvolumen sowie die Abfallzusammensetzung heterogen verteilt und teilweise innerhalb weniger Meter stark variieren können. Wir präsentieren moderne geophysikalische Bildgebungsmethoden, welche die quasi-kontinuierliche Erhebung der physikalischen Eigenschaften einer Deponie ermöglichen. Insbesondere demonstrieren wir kombinierte Anwendungen von Induzierter Polarisation, Elektromagnetischer Induktion und Transienter Elektromagnetik. Die Kombination dieser geophysikalischen Methoden erlaubt es, Daten in verschiedenen Auflösungs- und Größenskalen zu bestimmen und Synergien hinsichtlich der Interpretation und Modellierung zu nutzen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die kombinierte Analyse und Interpretation der geophysikalischen Bildgebungsmethoden, im Vergleich zu klassischen Direktmethoden, zu einem verbesserten Verständnis von Deponien und deren internen Prozessen führt.

1 EINLEITUNG

Die wirtschaftliche Erschließung von Deponien, beispielsweise zur Energieerzeugung oder zur Gewinnung von Rohstoffe, erlangte insbesondere in den letzten Jahren immer größer werdende Bedeutung. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Planbarkeit solcher Vorhaben setzt Kenntnisse über die interne Zusammensetzung des Deponiekörpers (Volumen und Materialzusammensetzung) in hoher räumlicher Auflösung voraus. Diese Informationen bilden darüber hinaus die Grundlage für Risikoabschätzungen hinsichtlich möglicher Undichtigkeiten und dem Austritt von Umweltschadstoffen. Bisher wird die räumliche Charakterisierung von Deponiekörpern meist mit direkten Messungen in Boden-, Wasser- und Gasproben durchgeführt. Derartige Untersuchungen liefern direkt die benötigten Kenngrößen (z.B. das Volumen und die Schadstoffkonzentrationen), jedoch ist insbesondere die räumliche Auflösung der Ergebnisse stark von der Vorgangsweise bei der Probenahme abhängig. Darüber hinaus sind die Eigenschaften von Deponien auch signifikanten zeitlichen Variationen unterworfen, die im Zusammenhang mit saisonalen Änderungen und meteorologischen Ereignissen stehen (Ngyuen et al. 2018). Der Nachweis und die Quantifizierung dieser zeitlichen Variationen durch herkömmliche Beprobungen von Deponien stellen einen wesentlichen Kostenfaktor dar. Die Untersuchung von Deponien erfordert daher die Entwicklung von Methoden, welche eine kontinuierliche Überwachung unterschiedlicher Eigenschaften einer Deponie mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ermöglichen. Die eingesetzten Methoden sollten darüber hinaus empfindlich auf texturale Kenngrößen (z.B. die Größe der Abfallpartikel), die Abfallzusammensetzung und geochemische Parametern (z.B. der pH-Wert) reagieren.

Geophysikalische Methoden erlauben die zerstörungsfreie Abbildung des Untergrundes und dessen Eigenschaften in nahezu beliebiger zeitlicher und räumlicher Auflösung. Die bereits hohe und stetig steigende Anzahl an Publikationen, welche die Anwendbarkeit von geophysikalischen Methoden für die Beschreibung und die

Überwachung von Deponien untersuchen (Nguyen et al. 2018), bestätigt die Relevanz der Geophysik in diesem Bereich. So kann beispielweise mittels der ERT die räumliche Verteilung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund bestimmt werden. Diese wird hauptsächlich von Porosität, Sättigung, Salinität des Porenfluids, sowie dem Metallgehalt im Boden und der Temperatur bestimmt (Flores Orozco et al. 2012) und weist somit eine hohe Sensitivität hinsichtlich Kenngrößen auf, welche für die Untersuchung von Deponien von Relevanz sind. ERT-Messungen erfordern einen galvanischen Kontakt zwischen dem Boden und den Messelektroden, was die Anwendung für große Bereiche und Deponien mit Geomembran limitiert. Komplementäre, punktuell erhobene Informationen hinsichtlich der Deponieeigenschaften (z.B. Bohrungen oder Direktmessungen) ermöglichen eine präzise quantitative Interpretation der ERT-Ergebnisse.

In dieser Fallstudie präsentieren wir die Ergebnisse von drei weiteren geophysikalischen Methoden, mit potentieller Eignung für die Untersuchung von Deponien: (1) elektromagnetische Induktion bei kleiner Induktionszahl (EMI), (2) transiente Elektromagnetik (TEM) und (3) Bildgebung mittels induzierter Polarisation (IP). Die Kombination komplementärer Methoden erlaubt die großflächige Charakterisierung eines Deponiekörpers mit hoher Auflösung und reduziert den Einfluss von Ambiguitäten auf die Interpretation.

2 GEOPHYSIKALISCHE BILDGEBUNG UND INTERPRETATION

2.1 Untersuchungsgebiet

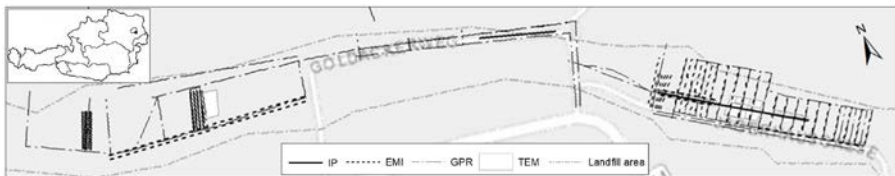


Abb: 1: Lage der Deponie Heferlbach in Niederösterreich, Österreich. Die Linien zeigen die Lage und Orientierung der geophysikalischen Messungen.

Im Zeitraum von 15.05.2017 bis 31.05.2017 wurden in verschiedenen Bereichen der Deponie Heferlbach (Abbildung 1) am Nordrand von Mannswörth in Niederösterreich geophysikalische Messungen zum Zwecke der Charakterisierung des Deponiekörpers durchgeführt. Der Deponiebereich ist ein ehemaliger Altarm der Donau (Heferlbach), der zwischen 1965 und 1972/73 auf einer Länge von ca. 950 Meter (Breite zwischen ca. 50 und 150 Meter) mit Hausmüll, Bauschutt und Aushubmaterial verfüllt wurde (Umweltbundesamt 2005). Das geschätzte Volumen der Abtablagerungen beträgt etwa 240.000 m³, wobei davon ca. 150.000 m³ auf Hausmüll entfallen (Umweltbundesamt, 2005). Die Mächtigkeit der Deponiematerialien wird auf 3 bis 4 Meter geschätzt. Technische Maßnahmen zum Grundwasserschutz sind nicht bekannt.

2.2 Elektrische Widerstandstomographie (ERT)

ERT Messungen basieren auf Vierpunktanordnungen, bei denen je ein Elektrodenpaar für die Stromspeisung und die Spannungsmessung verwendet werden. Die Division der gemessenen Spannung durch den eingespeisten Strom ergibt den sogenannten Transferwiderstand. Bei tomographischen Messungen werden zudem eine Vielzahl von Elektroden und Vierpunktanordnungen zur Messung von hunderten bis tausenden Transferwiderständen verwendet. Messungen bei größeren Elektrodenabständen führen zu einer höheren Eindringtiefe, während mit kleineren Elektro-

denabständen eine höhere Auflösung erreicht wird. Die Inversion dieser Transferwiderstände liefert Modelle des spezifischen elektrischen Widerstandes (ρ) bzw. der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit ($\sigma = 1/\rho$).

Im Rahmen der Heferlbach-Kampagne wurden mehrere Profile (Abbildung 1) mit unterschiedlichen Elektrodenabständen gemessen. Abbildung 2 zeigt das Inversionsergebnis in Form des spezifischen elektrischen Widerstandes für ein repräsentatives Profil. Die Messung wurde mit 144 Elektroden (Elektrodenabstand 1 Meter) unter Verwendung einer Dipol-Dipol-Messkonfiguration durchgeführt. Die Dipollängen des Strom- und Spannungsdipols wurden hier schrittweise von 1 auf 12 Meter gesteigert, um das Signal-Rausch-Verhältnis für Messungen mit größerer Eindringtiefe zu erhöhen. Als Messsystem wurde ein Syscal Pro (von IRIS Instruments) mit 10 Kanälen verwendet, dass die gleichzeitige Messung von 10 Spannungen zu einer Stromeinspeisung ermöglicht. Für das Widerstandsmodell in Abbildung 2 wurden 4332 Transferwiderstände invertiert.

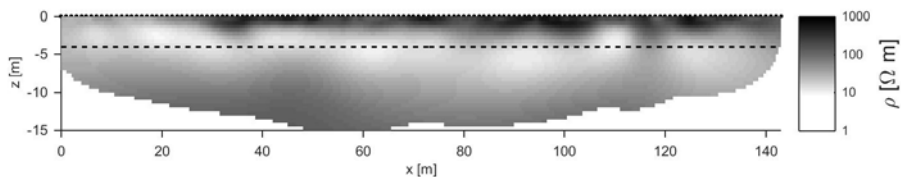


Abb. 2: Modell des spezifischen elektrischen Widerstands aus ERT Messungen entlang eines repräsentativen Profils. Die strichlierte Linie zeigt die vermutete Deponieunterkante.

Das Widerstandsmodell zeigt drei Haupteinheiten: (1) eine seichte Einheit (zwischen ~ 1 und 1.5 Meter) mit hohen elektrischen Widerständen ($\rho > 500 \Omega\text{m}$), (2) eine Zwischenschicht mit einer Mächtigkeit von ~ 4 - 5 Meter und den niedrigsten beobachteten Widerständen ($\rho < 10 \Omega\text{m}$) und (3) eine tiefe Einheit gekennzeichnet durch mittlere Widerstandswerte ($\rho \sim 80 \Omega\text{m}$). Der Übergang von hohen auf niedrige elektrische Widerstände (Übergang von der Deckschicht zur Zwischenschicht) zeigt die Oberkante des Deponiematerials an. Die Abnahme des elektrischen Widerstands kann hier durch das Vorhandensein von organischem Abfall (Flores Orozco et al. 2012) und/oder metallischen Materialien erklärt werden. Der Bioabbau von organischem Abfall wird mit einer erhöhten Produktion von Kohlensäure assoziiert, welche durch ihre hohe Salinität zu einer Verringerung des elektrischen Widerstandes führt. Demgegenüber sind metallische Materialien durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit aufgrund von Elektronenleitung gekennzeichnet, welche im Widerstandsmodell durch niedrige elektrische Widerstände zu erkennen sind. Laterale Änderungen im Widerstandsmodell weisen auf Variationen in der Zusammensetzung des Deponiematerials hin. Der Kontakt zur tiefen Einheit wurde in größerer Tiefe detektiert als erwartet (vermutete Deponieunterkante in 4 Meter Tiefe). Diese Beobachtung könnte auf ein Entweichen von hochsalinen Sickerwässern in das Material unter der Deponie hinweisen.

2.3 Kartierung mit elektromagnetischer Induktion bei kleiner Induktionszahl (EMI)

Messungen basierend auf elektromagnetischen Feldern benötigen keinen Kontakt zwischen dem Boden und dem Messgerät. Daher ist das EMI-Verfahren im Vergleich zu ERT-Messungen gut geeignet große Flächen mit geringem zeitlichen Aufwand abzudecken. Das Verfahren basiert auf Messungen mit zwei Spulen, von denen eine als Sender und die andere als Empfänger fungiert. Der Sender erzeugt durch Wechselstrom im Frequenzbereich zwischen 10 und 100 kHz ein elektromagnetisches Feld (Primärfeld). Durch das zeitlich variable primäre Magnetfeld wer-

den Wirbelströme im Untergrund erzeugt, welche wiederum ein sekundäres Magnetfeld induzieren. Der Empfänger zeichnet sowohl das Signal des primären als auch des sekundären Magnetfeldes auf, wodurch die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (σ_a) fast in Echtzeit berechnet werden kann (Everett 2012).

Die Untersuchungstiefe wird durch den Abstand zwischen Sender- und Empfängerspule sowie durch die für die Erzeugung des Primärfeldes verwendete Kreisfrequenz (ω) bestimmt.

Im Rahmen der Heferlbach-Kampagne wurden EMI-Messungen mit einem GF Instruments CMD-MiniExplorer durchgeführt. Dieses System arbeitet mit einer Frequenz von 30 kHz und verwendet drei Empfängerspulen in unterschiedlichen Abständen zur Senderspule. In Abhängigkeit von der Orientierung der Spulen kann σ_a simultan in 0,5, 0,9 und 1,8 Meter (vertikaler Dipol) bzw. in 0,3, 0,6 und 1,2 Meter (horizontaler Dipol) bestimmt werden. Eine Inversion der Daten wäre nötig, um den vertikalen Kontakt zwischen den elektrischen Einheiten korrekt zu lösen. In dieser Studie werden die EMI-Daten nicht invertiert verwendet, um laterale Variationen der elektrischen Eigenschaften zu bestimmen. Die EMI-Messungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, Variationen der elektrischen Eigenschaften in den oberflächennahen Bodenschichten zu kartieren, welche auf Versickerungszonen von Oberflächenwasser in den Deponiekörper hinweisen. Des Weiteren können aus den EMI-Karten Lage und Form von Rohr- und Leitungssystemen rekonstruiert werden. Diese Informationen sind essentiell für die Planung der ERT-Messungen.

Exemplarische EMI Daten, welche in der Nähe des ERT Profils aufgenommen wurden, sind in Abbildung 3 für die σ_a in 2 Meter Untersuchungstiefe dargestellt. Abbildung 3 zeigt eine starke Variation in der Verteilung von σ_a , insbesondere von West nach Ost gesehen. Des Weiteren sind zeigen Bereiche mit sehr hohen σ_a ($\sigma_a > 50$ mS/m) die Lage von Belüftungsrohren oder ähnlicher Infrastruktur an.

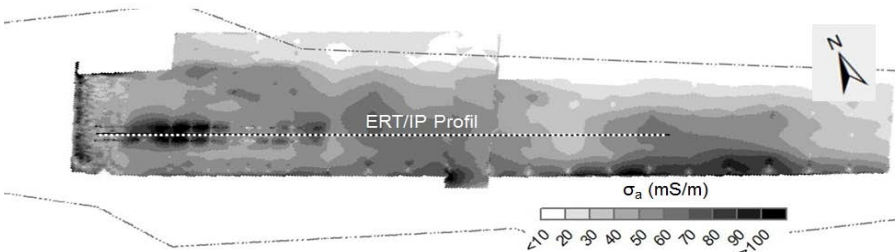


Abb. 3: EMI Bild der σ_a in 2 Meter Tiefe für Daten, die um den Bereich des ERT / IP Profils aufgenommen wurden.

2.4 Transiente Electromagnetik (TEM)

TEM-Sondierungen liefern Informationen über die vertikalen Variationen der elektrischen Eigenschaften an einem bestimmten Punkt. Bei dieser Messmethode wird ein Kabel in Form eines Rechteckes oder eines Kreises auf der Oberfläche so platziert, dass eine Spule gebildet wird. Das Kabel kann dabei sowohl als Senderspule als auch als Empfängerspule verwendet werden. Für die Messung wird für kurze Zeitspannen (10 – 100 ms) Gleichstrom an die Spule angelegt wodurch ein primäres Feld erzeugt wird. Ähnlich zur bereits beschriebenen EMI-Methode führt dieses Primärfeld zur Induktion eines sekundären Magnetfeldes. Die Spule an der Oberfläche zeichnet die Amplitude dieses sekundären Feldes und deren zeitliche Variationen auf. Da der elektrische Widerstand des Untergrundes die Diffusion dieses sekundären Magnetfeldes beeinflusst, kann die Abnahme des sekundären Magnetfeldes nach der Stromabschaltung verwendet werden, um vertikale Variationen des spezifischen elektrischen Widerstands zu modellieren. Im Allgemeinen gilt, je länger die Erfassungszeit der Abklingkurve ist, desto größer ist die (theoretisch) erreichbare

Sondierungstiefe. In späteren Zeiten kann das Signal-Rausch-Verhältnis jedoch sehr schlecht sein, was den Einsatz einer stärkeren Stromquelle und/oder einer größeren Spule erfordert. Für weitere Details siehe Christiansen et al. (2009).

Im Rahmen der Heferlbach-Kampagne wurden Messungen mit einer Stromstärke von 1 A durchgeführt, wobei eine quadratische Schleife mit einer Seitenlänge von 5 Meter verwendet wurde. Für die Spule wurden fünf Windungen verwendet, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Messungen der Abklingkurve wurden im Bereich zwischen 4 und 1000 μs durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die TEM-Sektion nach der Inversion der unabhängigen 1D-Sondierung. Die Evaluierung der TEM-Ergebnisse zeigt, dass eine eindeutige Übereinstimmung mit den ERT-Ergebnissen (siehe Abbildung 2) besteht. Konsequenterweise zeigt Abbildung 4 drei Schichten, wobei die leitende Schicht (d.h. niedrige Werte für ρ) zwischen 2 und 6 Meter Tiefe den Deponiekörper kennzeichnet. Die Abnahme der elektrischen Widerstandswerte kann dabei durch eine Zunahme der Salinität des Porenfluids erklärt werden. Wie auch bei der Widerstandstomographie können die niedrigen Werte des spezifischen elektrischen Widerstands unterhalb der erwarteten Tiefe der Deponie (~ 4 Meter) durch den Transport hochsaliner Deponiesickerwasser und extremer Veränderungen des Grundwasserspiegels erklärt werden.

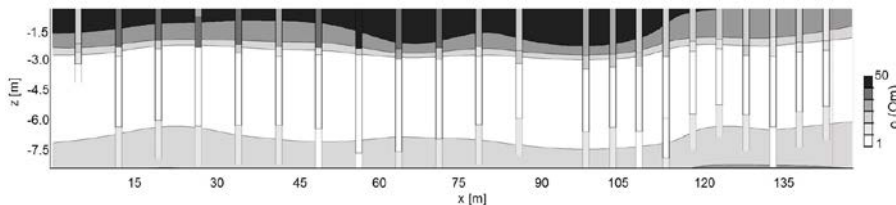


Abb. 4: TEM Sektion in Form des spezifischen elektrischen Widerstands (ρ) auf Basis der TEM Sondierungen entlang des ERT / IP Profils.

2.5 Bildgebung mittels induzierter Polarisation (IP)

Die IP ist eine Erweiterung der ERT-Methode, die es ermöglicht Informationen über die elektrische Leitfähigkeit (Energieverlust) und die kapazitiven Eigenschaften des Untergrundes (Energiespeicherung) zu erhalten. Die IP-Messungen im Rahmen der Heferlbach-Kapagne wurden im Zeitbereich durchgeführt. Bei der Zeitbereich-IP wird neben den Messungen der Widerstände (Spannungs-Strom-Verhältnis) auch der transiente Spannungsabfall nach der Stromabschaltung gemessen. Dies erfolgt typischerweise in Form eines Integrals der Abklingkurven über ein vordefiniertes Zeitfenster und liefert die sogenannte integrale Aufladbarkeit (für weitere Details siehe Flores Orozco et al. 2018). IP-Messungen wurden unter Verwendung des Syscal Pro Systems (IRIS Instruments) mit einer Rechteckwellen-Stromeinspeisung und einer Pulslänge von zwei Sekunden aufgenommen. Die integralen Aufladbarkeitsmessungen wurden unter Verwendung von 20 Fenstern während des Spannungsabfalls zwischen 240 und 1840 ms nach der Stromabschaltung durchgeführt. Um einen besseren Vergleich der Bildgebungsergebnisse zu ermöglichen, wurden IP-Daten an den genau gleichen Elektrodenpositionen aufgenommen, die auch für die ERT Messungen verwendet wurden.

Abbildung 5 zeigt die Phasenverschiebung (φ) des komplexen spezifischen elektrischen Widerstands. Die Phasenverschiebung (φ) spiegelt die Stärke elektrochemischer Polarisationsprozesse wieder, die an der Grenzfläche zwischen Porenfluid und mineralischer Gesteinsmatrix ablaufen (Bücker et al. 2017). Um Redundanzen zu vermeiden, werden die Bildgebungsergebnisse für den komplexen spezifischen elektrischen Widerstand ($|\rho|$) hier nicht gezeigt, da sie den ERT-Ergebnissen (Abbil-

dung 2) entsprechen. Die IP-Bildgebungsergebnisse zeigen einen Bereich zwischen etwa 1 und 4 Meter Tiefe, welcher durch ungewöhnlich hohe Phasenwerte ($|\varphi| > 25$ mrad) gekennzeichnet ist. Der Anstieg der gemessenen Polarisierungseffekte lässt sich auf Veränderungen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers zurückführen, insbesondere den Redoxzustand des Grundwasserleiters. Hohe Polarisierungseffekte kennzeichnen jenen Bereich, der eindeutig mit der Geometrie der Mülldeponie in Zusammenhang steht, wobei laterale Variationen mit Änderungen in der Verteilung und Zusammensetzung der Abfälle zusammenhängen.

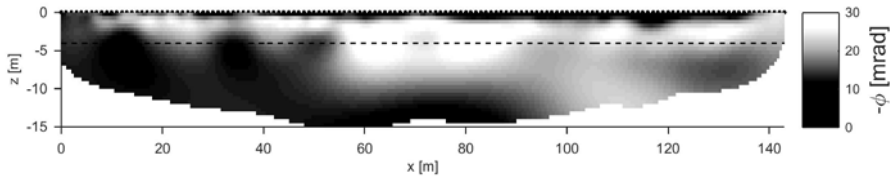


Abb. 5: Bildgebungsergebnisse für IP-Messungen, ausgedrückt als Phasenverschiebung (φ) des komplexen spezifischen elektrischen Widerstands, aufgenommen entlang des ERT Profils. Die strichlierte Linie repräsentiert die erwartete Tiefe der Deponieunterkante.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Unsere Studie zeigt, dass Deponieuntersuchungen durch die kombinierte Anwendung von elektrischen und elektromagnetischen geophysikalischen Methoden verbessert werden können. Während EMI-Methoden es erlauben, Informationen über laterale Variationen der elektrischen Eigenschaften zu gewinnen, können mittels TEM-Sondierungen, Informationen über vertikale Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes mit der gleichen Auflösung erhalten werden wie sie auch die etablierte ERT-Methode liefert. Darüber hinaus ermöglichen die Ergebnisse der IP-Bildgebung eine verbesserte Interpretation, da diese primär auf Änderungen der Geometrie des Porenraumes, verursacht durch das Vorhandensein unterschiedlicher Abfallarten (Bauschutt und Hausmüll), reagiert. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen ein schwächeres IP-Signal, aufgrund des vorhandenen Deponiesickerwassers. Dies ermöglichte eine verbesserte Abgrenzung der Deponiestruktur und Interpretation der ERT- und TEM-Ergebnisse.

LITERATUR

- Bücker, M., Flores Orozco, A., Kemna, A. (2018) Electrochemical polarization around metallic particles – Part 1: The role of diffuse-layer and volume-diffusion relaxation. *Geophysics* 83(4), E203-E217
- Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K. (2009) The transient electromagnetic method. In: Kirsch R. (eds) *Groundwater Geophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg, p.p. 179-226
- Everett, M.E. (2012) Theoretical developments in electromagnetic induction geophysics with selected applications in the near surface. *Surveys in geophysics*, 33(1), 29-63
- Flores Orozco, A., Gallistl, J., Bücker, M., Williams, K. H. (2018) Decay curve analysis for data error quantification in time-domain induced polarization. *Geophysics* 83 (2), E75 – E86
- Flores Orozco, A., Kemna, A., Oberdörster, C., Zschornack, L., Leven, C., Dietrich, P., Weiss, H. (2012) Delineation of subsurface hydrocarbon contamination at a former hydrogenation plant using spectral induced polarization imaging, *J. of Cont. Hydrology* 136-137, 131-144.
- Nguyen, F., Ghose, R., Isunza Manrique, I., Robert, T., Dumont, G. (2018). Managing past landfills for future site development: A review of the contribution of geophysical methods. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Enhanced Landfill Mining*, pp. 27-36
- Umweltbundesamt (2005) Bericht 58, Altablagerung Heferlbach. Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§13 und §14 Altlastensanierungsgesetz), Wien.

Geophysical Imaging for an Improved Delineation of the Internal Structure and Composition of Landfills

A. Flores-Orozco, M. Steiner, J. Gallistl, & A. Ivanova

Vienna University of Technology, Geodesy and Geoinformation – Geophysics Research Division, Vienna, Austria

Within the last years there has been a growing interest in the economical exploitation of landfills, either for energy production or the mining of raw-materials. Additionally, detailed subsurface characterization in the vicinity of landfills is also critical for environmental protection, for instances to detect the release and migration of leachates. Today landslide characterization heavily relies on direct measurements conducted in soil, water and gas samples. However, landfills are highly complex systems, with the distribution and composition of waste varying largely, sometimes within only a few meters. Such heterogeneities exert an important control in groundwater flow and circulation. Hence, the ex-situ investigations might be strongly limited considering the large spatial and temporal variability in landfills. To overcome this, we present here the combined application of emerging electrical and electromagnetic methods, namely: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Electromagnetic Induction (EMI) mapping, Transient Electromagnetic (TEM) soundings, and Induced Polarization (IP) imaging. Such methods permit to gain information about the spatial variations of the electrical conductivity, which is in turn primarily controlled by the porosity, the saturation and the salinity of the fluid filling the pores. All of these parameters are highly relevant for the characterization of landfills. Moreover, other parameters relevant in landfill investigations, such as metal content and temperature, also play a significant role in subsurface electrical properties.

The ERT method is used to delineate the general geometry of landfill and leachates. However, the interpretation of ERT results proved to be challenging considering that different subsurface materials may produce a similar response. For instances, highly conductive anomalies may be related to an increase in both metal content and the salinity of the pore-water. To overcome this, we investigated the applicability of the IP imaging method to delineate changes in the geochemical composition of groundwater and changes of waste composition. The IP is an extension of the ERT method, which provides information about the electrical resistivity and capacitive properties of the subsurface. Results presented here demonstrated a strong IP response associated with waste in solid-phase. Thus, IP imaging results permitted to discriminate between waste and leachates and an improved delineation of the landfill structure. Furthermore, contactless EMI and TEM methods revealed consistent results to those resolved through ERT and IP. Furthermore, EMI and TEM methods permitted to extend our investigations, as those methods permitted to map larger areas in shorter acquisition times. EMI methods demonstrated to be well suited to delineate lateral changes in the near subsurface, as required to identify infrastructure as well as surface textural changes controlling surface run-off and infiltration. Additionally, TEM soundings resolved for vertical variations in the electrical properties, permitting the validation of the ERT results.

Our results demonstrate that the combination of different electrical and electromagnetic techniques permits to obtain data across multiple-scales, and can be used to compensate for drawbacks of the independent methods.