

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 116 (1998)  
**Heft:** 38

**Artikel:** Moderne geophysische Methoden: neue Wege zur schnellen und kostengünstigen Erkundung des Untergrunds  
**Autor:** Maurer, Hansruedi  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-79568>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 06.01.2026

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

tueller Unternehmungen in der Schweizer Bauwirtschaft entwickelt und implementiert werden. Damit kann die begonnene Forschungsarbeit vertieft und ergänzt werden. Bearbeitet werden dabei

- agentenbasierte Systeme
- computerbasierte Zusammenarbeit im Entwurf
- gemeinsames Erarbeiten der Lösung entwurfsdefinierender Parameter
- Entwicklung grosser verteilter Datenbanken

Die anwendungsbezogenen Teilprojekte konzentrieren sich auf die Entwicklung einer geeigneten Systemumgebung für das Einrichten, Betreiben und Unterhalten von virtuellen Unternehmungen. Dazu gehören Werkzeuge für die Unterstützung der Zusammenarbeit während der Planungsphase sowie für die Simulation von Bauprozessen, Facility Management und Lebenszyklus-Kosten eines Bauwerks. Die forschungsbezogenen Teilprojekte befassen sich mit folgenden Gebieten:

- Datenbankstruktur virtueller Unternehmungen
- zweite Generation von Delegates für die Unterstützung bei der Kommunikation und dem Austausch von Informationen

- Erhöhung der Leistungen bei der Berechnung entwurfsdefinierender Parameter (Constraints Solving)
- Informationsaustausch auf der Basis von Sorts

Eine wichtige Aufgabe wird den Industriepartnern obliegen. Sie werden die erarbeiteten Lösungen austesten und beurteilen. Das dabei erworbene Wissen und die Kenntnisse über die Praktikabilität der erarbeiteten Lösungen sollen anschliessend an die Schweizer Bauwirtschaft weitergegeben werden.

### Zusammenfassung

Mit der Teilnahme des SIA an diesem Forschungsprojekt der ETHZ nimmt er die Aufgabe wahr, seine Mitglieder bei der Ausübung ihres Berufs nicht nur kurzfristig zu unterstützen, sondern auch langfristig die Möglichkeiten der Zukunft abzuklären. Es geht dabei nicht darum, fertige Lösungen anzubieten. Vielmehr soll den Mitgliedern eine Mithörkompetenz vermittelt werden, die ihnen erlaubt, die neuen Hilfsmittel einzuschätzen und für ihre Unternehmungen die richtigen Entscheide zu treffen. Der SIA bildet dabei das

### Am Projekt Beteiligte (erste Etappe)

- Hochschulen:  
ETH Zürich (Prof. Gerhard Schmitt)  
EPF Lausanne (Prof. Ian Smith)
- Bund:  
Amt für Bundesbauten
- Verbände:  
SIA  
CRB
- Industriepartner:  
Zwahlen & Mayr SA, Aigle
- Beobachter:  
Rosenthaler + Partner AG, Zürich  
NetConsult AG, Bern  
Zoelly Rüeegg Holenstein Architekten AG, Küsnacht

Bindeglied zwischen Forschung und Praxis. Das Verständnis für neue Lösungsansätze soll erhöht und das Interesse geweckt werden. Es besteht die Möglichkeit, dieses Forschungsprojekt im Internet weiterzuverfolgen (<http://caad.arch.ethz.ch/research/IuK/home/>) und damit den Know-how-Transfer von der ETH zur Praxis zu unterstützen.

Adresse des Verfassers:

Christoph Gebr, dipl. Arch. ETH/SIA, Rosenthaler + Partner AG, Informatik und Management, Baumackerstrasse 24, 8050 Zürich

Hansruedi Maurer, Zürich

## Moderne geophysikalische Methoden

### Neue Wege zur schnellen und kostengünstigen Erkundung des Untergrunds

**Neue geophysikalische Messverfahren bieten attraktive Werkzeuge für die Erkundung des Untergrunds. Durch den Einsatz moderner, digitaler Messgeräte, einer stark beschleunigten Datenaufnahme sowie neuer Auswertungsverfahren liefern diese zerstörungsfreien Methoden zuverlässige dreidimensionale Bilder des Untergrunds. Die hohe Effizienz der neuen Technologien gewährleistet nicht nur einen erheblichen Zeitgewinn, sondern auch eine markante Kostenreduktion.**

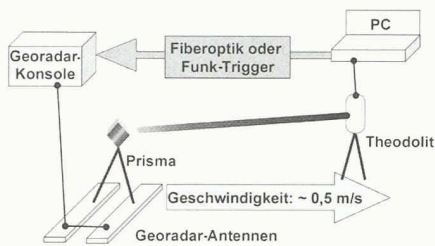
Präzise Kenntnisse der räumlichen Strukturen im Untergrund bilden die fundamentale Basis für Projektierungsarbeiten

im Bausektor. In vielen Fällen ist eine komplette Freilegung der interessierenden Strukturen entweder nicht möglich oder nicht sinnvoll. Deshalb müssen andere Erkundungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden. Eine populäre, oft angewandte Prospektionsmethode besteht im Abteufen vieler Bohrungen im Untersuchungsgebiet. Entlang der Bohrlöcher kann so die Tiefenstruktur direkt erfasst werden. Zwischen den Bohrlöchern hingegen muss der Aufbau des Erdinnern mit Hilfe von geologischen Plausibilitätsüberlegungen inter- oder extrapoliert werden.

Zur Bestimmung vieler geotechnischer Kenngrössen sind Bohrungen und In-situ-Versuche unerlässlich. Für die Erfassung der räumlichen Untergrundstrukturen sowie die Bestimmung gewisser phy-

sikalischer Parameter bieten jedoch neue geophysikalische Verfahren interessante Alternativen zur systematischen «Durchlöcherung» des Untergrunds. Ähnlich wie in der medizinischen Tomographie wird der «Patient Erde» von der Oberfläche her durchstrahlt. Die so gewonnenen Daten erlauben detaillierte Einblicke ins Erdinnere. Ein entscheidender Vorteil geophysikalischer Verfahren liegt in ihrem zerstörungsfreien Charakter; d.h., das Untersuchungsobjekt wird nie direkt angetastet. Für eine erfolgreiche geophysikalische Untersuchung gilt es jedoch entscheidende Faktoren zu berücksichtigen:

- Kleine Messgrössen: Geophysikalische Messgrössen sind äusserst klein. Typische Bodenbewegungen seismischer Wellen betragen z.B. nur einige wenige Nano- bis Mikrometer, und es werden elektrische Potentialdifferenzen im Mikro- bis Millivolt-Bereich gemessen. Dies erfordert den Einsatz von hochpräzisen Messinstrumenten. Des Weiteren ist die exakte räumliche Positionierung eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Untersuchung.



1

Automatische Positionierung am Beispiel eines Georadar-Messgeräts

- Ausreichende Datendichte: Um eine zuverlässige Auflösung der gesuchten Strukturen zu gewährleisten, müssen die geophysikalischen Daten auf einem genügend engen Raster gemessen werden. Zu grosse Messpunktabstände verringern nicht nur die räumliche Auflösung, sondern können auch künstliche Anomalien erzeugen (räumliches Aliasing), die später von echten Strukturen kaum mehr zu trennen sind.
- Geeignete Auswertungsalgorithmen: Die Geophysik verwendet indirekte Methoden; d.h., die Strukturen im Untergrund werden aufgrund ihres Einflusses auf künstlich angeregte seismische und/oder elektromagnetische Wellen erkannt. Die Extraktion von Untergrundinformation aus den Messdaten ist kein triviales Problem und erfordert den Einsatz ausgeklügelter Auswertungsalgorithmen.
- Komplizierte Strukturen: Der un tiefe Untergrund besitzt oft einen sehr heterogenen und komplizierten Aufbau. Die eingesetzten geophysikalischen Methoden müssen deshalb in der Lage sein, dreidimensionale (3D) Strukturen eindeutig aufzulösen.

Durch die rasante Entwicklung der Digitaltechnik in den letzten zehn Jahren konnten in der Realisierung neuer geophysikalischer Messgeräte entscheidende Fortschritte erzielt werden. Messgenauigkeit und -geschwindigkeit wurden in vielen Fällen um Größenordnungen gesteigert,

und durch die Anwendung neuer Auswertungsprogramme wurde eine erheblich genauere Datenanalyse möglich.

Die Gruppe für Angewandte und Umweltgeophysik der ETH Zürich hat in den vergangenen Jahren intensiv an der Entwicklung neuer Mess- und Interpretationsverfahren gearbeitet. Insbesondere wurden Technologien zur Beschleunigung der Messungen entwickelt. Dieser Artikel stellt den gegenwärtigen Stand der Arbeiten vor. Anhand einiger Fallstudien werden verschiedene Verfahren kurz vorgestellt. Diese neuen Technologien bieten dem Bauingenieur attraktive Werkzeuge, die in kürzester Zeit zuverlässige Bilder des Untergrunds zu einem attraktiven Preis liefern.

### Automatisierung – Preisvorteil durch Geschwindigkeit

Ein entscheidendes Hindernis für die Akzeptanz traditioneller geophysikalischer Messverfahren ist oftmals der hohe Preis für die Untersuchungen, wobei die Feldmessungen in der Regel die Hauptkosten verursachen. Die wirkungsvollsten Mittel, um diese Kosten zu verringern, sind eine Verkürzung der Messdauer sowie eine Reduzierung des Personalbedarfs. Interessanterweise ist die Zeitdauer für den eigentlichen Messvorgang meistens nicht der limitierende Faktor. Vielmehr erfordert die Positionierung der Sensoren sowie die exakte Koordinatenbestimmung der Messpunkte den grössten Zeitaufwand.

Mit einem automatischen Positionierungssystem kann eine deutliche Beschleunigung der Feldmessungen erreicht werden. Neuartige Theodoliten mit automatischer Zielnachführung eröffnen diesbezüglich neue Wege. Wie in Bild 1 schematisch dargestellt, wird dazu ein Glasprisma auf das Messgerät aufgesetzt. Wenn diese Anordnung über das Messgelände gezogen oder getragen wird, folgt der Theodolit ständig dessen Bewegungen und liefert bis zu fünfmal pro Sekunde genaue räumliche Koordinaten. Grundsätz-

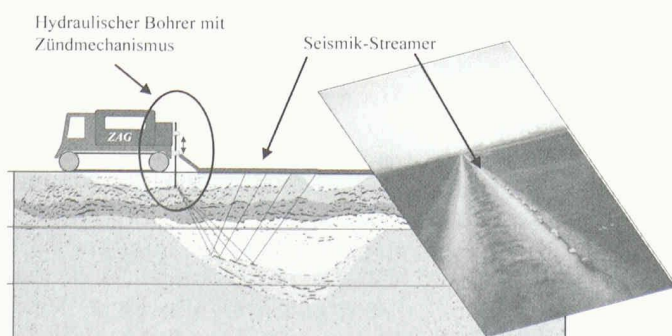
lich lässt sich ein derartiges Positionierungssystem mit jedem geophysikalischen Messgerät verbinden. An der ETH Zürich wurden bereits mehrere Schnittstellen für verschiedene Messgeräte (z.B. Georadar, Elektromagnetik und Magnetik) entwickelt.

Der Zeitgewinn, der mit der automatischen Positionierung erzielt werden kann, ist gewaltig. Eine Fläche von 25 mal 25 m kann nun in etwa zwei Stunden gemessen werden – das ist mindestens fünfmal schneller als mit konventioneller Messtechnik. Neben der Beschleunigung der Messung liefert die automatische Positionierung auch eine beträchtliche Steigerung der Genauigkeit. Schliesslich erlaubt die Automatisierung erhebliche Einsparungen an Personal. Mit konventioneller Vermessung waren oft mehr als zwei Arbeiter im Feld beschäftigt, während das automatische System von einer einzelnen Person bedient werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung des Messbetriebs wurde auch für die oberflächenbasierte Seismik (Reflexions- und Refraktions-Seismik) realisiert. Um das zeitintensive Setzen der Geophone (seismische Sensoren) zu vermeiden, wurde an der ETH Zürich ein sogenannter «Land-Streamer» entwickelt. Wie in Bild 2 dargestellt, wird hierbei eine Kette von Geophonen über das Messgebiet gezogen. Diese Geophone registrieren die seismischen Wellen, die mit Hilfe einer am Zugfahrzeug montierten Quelle erzeugt werden. Mit einer derartigen Messanordnung müssen keine Geophone mehr im Boden verankert werden, und es ist ein rascher Messfortschritt möglich. Verschiedene Tests haben gezeigt, dass die Signalqualität der Land-Streamer-Geophone der der konventionellen Geophone vergleichbar ist.

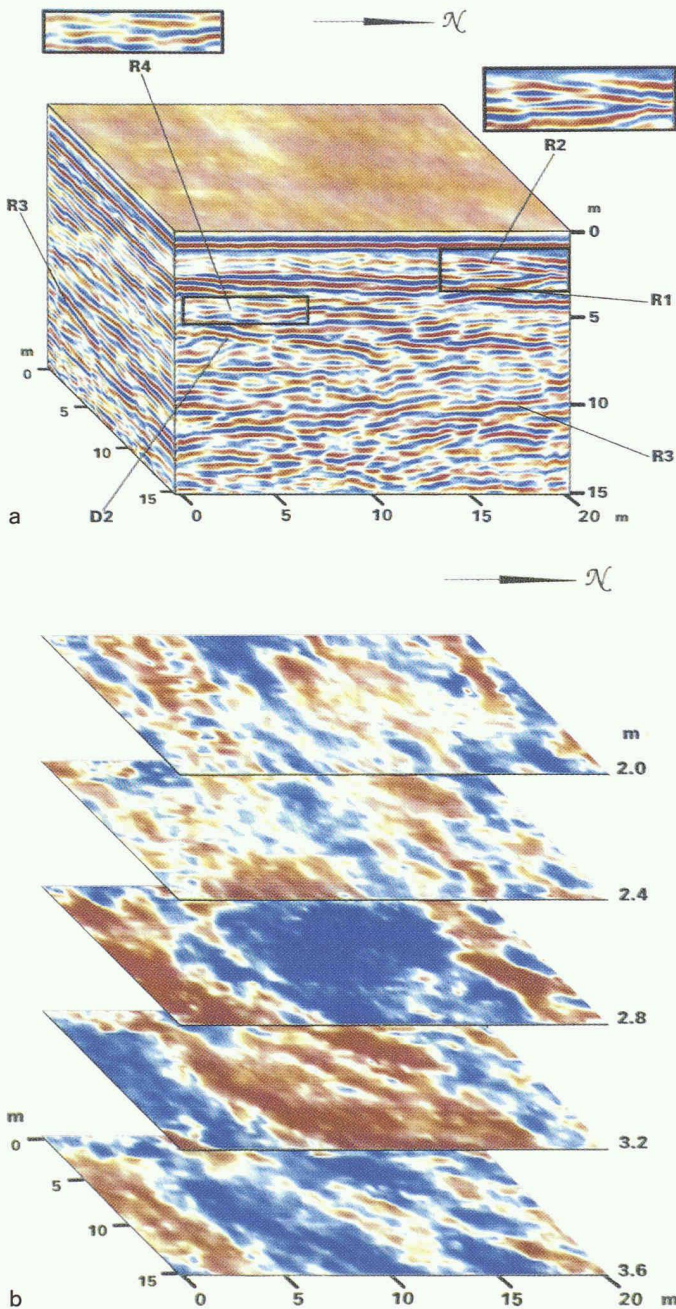
### Von den Daten zum Modell – neue Inversionsverfahren

Wie im letzten Abschnitt erläutert, können mit Hilfe automatisierter geophysikalischer Verfahren in kurzer Zeit grosse Datenmengen aufgenommen werden. Damit ist das wichtige Problem der kostengünstigen Datenakquisition gelöst. In einem nächsten Schritt müssen nun aber diese grossen Datensätze ausgewertet und interpretiert werden. In der Erdöl-/Erdgas-Exploration ist die Verarbeitung von riesigen Datenmengen eine Standardaufgabe, die mittels leistungsfähiger Computer erledigt wird. Im Ingenieurbereich hingegen ist der Einsatz solcher «Supercomputer» aus Kostengründen nicht realistisch. Deshalb müssen Auswertungsalgorithmen ge-



2

Konzept eines seismischen Land-Streamers. Die Sensoren werden zu einer Kette zusammengeschlossen und mit Hilfe eines Fahrzeugs über das Messgelände gezogen



3  
 a: 3D-Georadar-Bild eines Sedimentblocks. Die roten und blauen Farben stellen positive und negative Polaritäten des Radarsignals dar, und die Farbintensität ist proportional zur Signalstärke. R1 markiert eine subhorizontale Reflexion eines Auswaschbeckens, und R2 repräsentiert eine Internstruktur der Sedimentfüllung des Beckens. R3 ist die Reflexion am Grundwasserspiegel, und R4 bezeichnet eine Sandlinse  
 b: Fünf Horizontalschnitte durch den in 3a dargestellten Datenwürfel. Ost-West ausgerichtete Fliessstrukturen sind in 2,0 und 2,4 m Tiefe zu erkennen, während in einer Tiefe von 2,8 m die Basis des Auswaschbeckens sichtbar ist

funden werden, die auf Personalcomputern lauffähig und auf die speziellen Bedürfnisse der Baugrundprospektion zugeschnitten sind.

Wichtige Faktoren, die es zu berücksichtigen gilt, sind die grosse Heterogenität des Mediums sowie die komplexen Beziehungen zwischen den geophysikalischen Messgrößen und den physikalischen Bodenparametern. Dies erfordert die Anwendung von nichtlinearen Inversionsmethoden, d.h. mathematische Verfahren, mit denen aus den Messdaten die physikalischen Bodenparameter direkt ermittelt werden können. Die wohl populärste Anwendungen der Inversionstechnik bilden die aus der Medizin bekannten tomographischen Verfahren. In den letzten Jahren wurde in der geo-

physikalischen Fachliteratur eine Reihe von neuen Inversionsalgorithmen vorgeschlagen, die eine effiziente Datenanalyse erlauben und auf kostengünstigen Personalcomputern einsetzbar sind. Die Idee dieser Verfahren ist einfach. Anstelle des mathematisch exakten Problems werden approximative Lösungen berechnet, die nur einen Bruchteil der Rechenzeit und des Speicherbedarfs benötigen. Der erforderliche Grad der Approximation kann jedoch exakt spezifiziert werden, so dass der Informationsgehalt der gemessenen Daten voll ausgeschöpft werden kann.

**Mehrdeutigkeit – Eindeutigkeit**

Die neuen Verfahren liefern eine numerische Lösung des geophysikalischen Inversionsproblems. Sie können jedoch

nicht das potentielle Problem der Mehrdeutigkeit geophysikalischer Daten beheben. Mehrdeutigkeit bedeutet, dass mit Hilfe vieler Untergrundmodelle die an der Oberfläche gemessenen Daten gleich gut erklärt werden können. Der Schlüssel zur Vermeidung von mehrdeutigen Lösungen ist die Anwendung mehrerer geophysikalischer Methoden. Aufgrund der verschiedenen Methoden zugrunde liegenden physikalischen Gesetze «durchleuchten» sie den Untergrund auf verschiedene Art und Weise. Ein gutes Beispiel dafür sind die Gleichstromgeoelektrik und die diffusiven elektromagnetischen Verfahren. Beide Methoden werden für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrunds verwendet. Wird lediglich eine der beiden Methoden eingesetzt, können in der Regel beliebig viele Untergrundmodelle konstruiert werden, die die gemessenen Daten gleich gut erklären. Eine kombinierte Inversion von Geoelektrik- und elektromagnetischen Daten hingegen liefert ein eindeutiges Resultat.

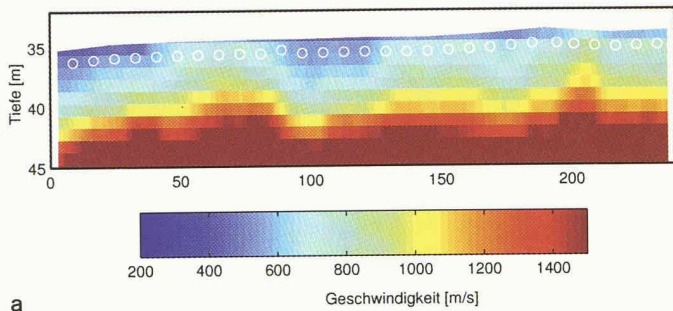
Die Tatsache, dass eine einzelne geophysikalische Methode selten die vollständige Lösung liefert, ist eine der wichtigsten Erkenntnisse der geophysikalischen Grundlagenforschung der letzten Jahre. Welche Kombinationen in welchen Fällen am effizientesten eingesetzt werden können, ist Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsvorhaben an der ETH Zürich.

**Fallstudien**

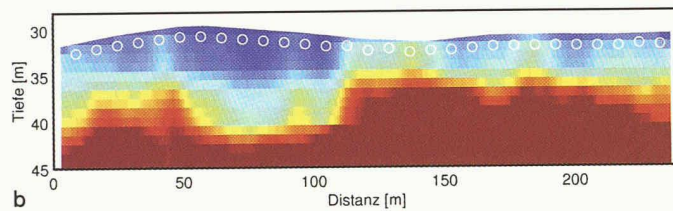
Die folgenden drei Fallstudien sind Beispiele von Experimenten, die die Gruppe für Angewandte und Umweltgeophysik der ETH Zürich in den letzten Jahren durchführte. Diese Beispiele sollen die Möglichkeiten moderner geophysikalischer Erkundungsverfahren demonstrieren, aber auch potentielle Probleme sowie mögliche Lösungsansätze aufzeigen.

**Abbildung der 3D-Struktur eiszeitlicher Sedimente**

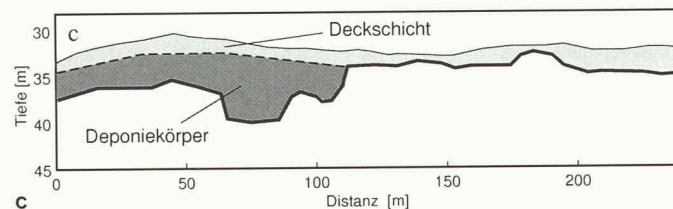
Bedingt durch den dynamischen Ablagerungsprozess zeigen eiszeitliche Sedimente meist eine komplexe interne Struktur. Da diese Sedimente einen erheblichen Anteil der Trinkwasser-Ressourcen in der Schweiz speichern, sind detaillierte Kenntnisse dieser Strukturen wichtig. Die hier beschriebene Untersuchung wurde in der Nordschweiz durchgeführt. Ein 300 m<sup>2</sup> grosses Gebiet wurde in einem Raster von 0,25 mal 0,5 m mit Georadar vermessen. Diese relativ neue Technologie liefert Information über räumliche Variationen der elektrischen Untergrundeigenschaften. Georadar ist deshalb besonders gut für hy-



a



b



c

4 Tomografische Tiefenschnitte im Gebiet einer Altlast, berechnet aus refraktionsseismischen Daten. Die Schnitte zeigen die ungestörte Struktur ausserhalb (a) und (b) teilweise innerhalb der Deponie (0 bis 120 m). Eine Interpretation des in (b) gezeigten Tomogramms ist in (c) abgebildet

drologische Studien geeignet (das Auftreten von Wasser erzeugt markante Änderungen der elektrischen Eigenschaften). Mit Hilfe von Georadar können jedoch auch verschiedene Lithologien unterschieden sowie interne Strukturen einzelner Sedimentpakete erkannt werden.

Dank des Einsatzes des automatischen Positionierungs-Systems (Bild 1) wurde die gesamte Fläche in weniger als zwei Stunden von einem «Ein-Mann-Team» ver-

messung. Datenverarbeitung und Darstellung der Resultate benötigten eine weitere Stunde. Bild 3 zeigt die Resultate dieser Untersuchung. Im 3D-Datenwürfel (Bild 3a) können deutlich verschiedene Reflexions-Horizonte ausgemacht werden. Sie stellen Schichtgrenzen innerhalb der eiszeitlichen Sedimentpakete dar. In Bild 3b ist ein Ausschnitt des Datenwürfels (2 bis 3,6 m) in verschiedenen Tiefen aufgeschnitten worden. Diese Horizontal-

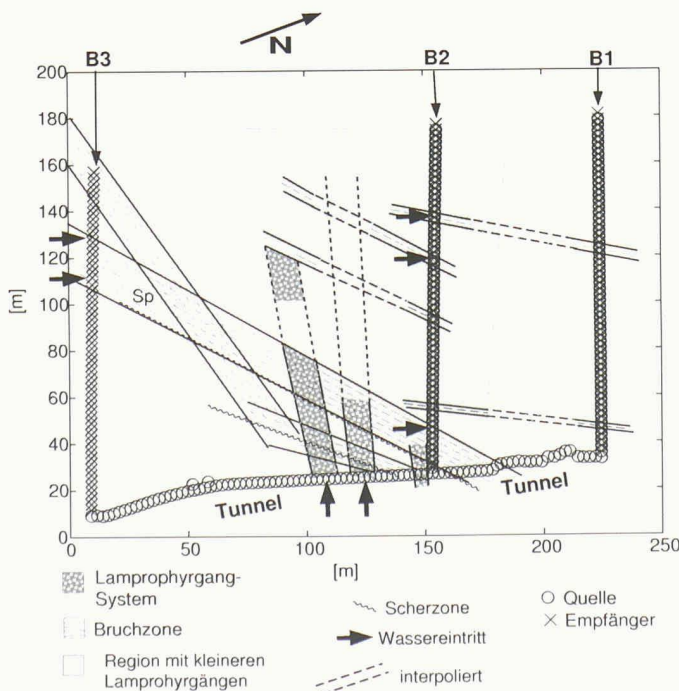
schnitte zeigen klare Ost-West-ausgerichtete Muster, die durch eiszeitliches Schmelzwasser entstanden waren. Sie bestimmen die heutige Fließrichtung des Grundwassers. In einer Tiefe von etwa 3 m erkennen wir zudem ein Auswaschbecken, das durch den Zusammenfluss von zwei oder mehreren eiszeitlichen Schmelzwasserkanälen entstanden ist.

Die Resultate dieser Untersuchung haben gezeigt, dass es möglich ist, komplizierte 3D-Strukturen mit Hilfe von Georadar in kürzester Zeit detailgetreu abzubilden. Das Abteufen mehrerer Bohrungen wäre unverhältnismässig teuer gewesen, und eine kleinräumige Struktur wie das Auswaschbecken hätte nicht erkannt werden können. Ähnliche Fragestellungen wie in diesem Projekt treten oftmals bei Baugrunduntersuchungen auf. 3D-Georadar kann deshalb für den Bauingenieur wertvolle Informationen liefern.

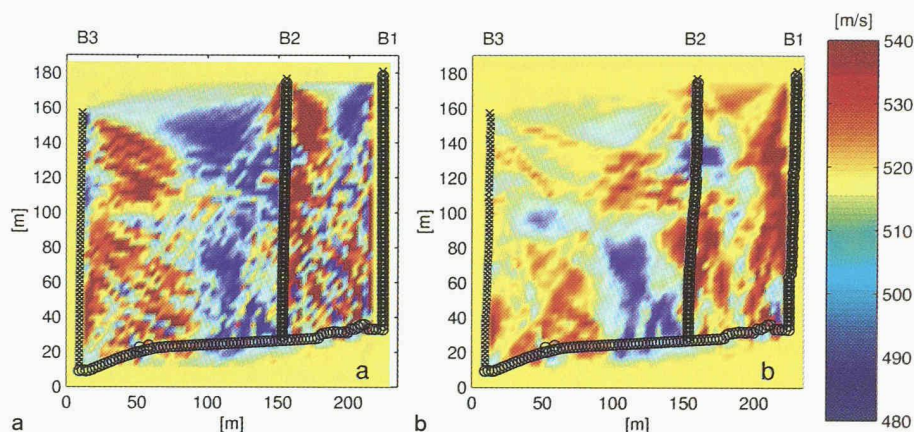
**Erkundung einer Altlast**

Altlasten sind unrühmliche Zeugen der jüngeren Vergangenheit. In der Schweiz existieren rund 50 000 Verdachtsstandorte. Das ergibt bei einer bewohnbaren Fläche von 30 000 km<sup>2</sup> einen Durchschnitt von 1,7 Standorten pro km<sup>2</sup>. Von den 50 000 bekannten Verdachtsstandorten stellen 3000 bis 4000 ein signifikantes Umweltrisiko dar und müssen saniert werden. Für eine erfolgreiche und effiziente Sanierung müssen die seitliche Ausdehnung sowie die Tiefe der Mülldeponien bekannt sein. Des Weiteren sind detaillierte Kenntnisse der umliegenden Sedimente ein wichtiger Faktor für die Beurteilung des potentiellen Kontaminationsrisikos. Leider sind viele Deponien nur ungenügend dokumentiert, und durch die Rekultivierung der Deponieflächen nach deren Schliessung ist eine direkte Kartierung des Deponiekörpers unmöglich. Im hier beschriebenen Beispiel einer ehemaligen Mülldeponie im Kanton Aargau wurden verschiedene geophysikalische Methoden eingesetzt, um Ausdehnung und Hinweise auf den Inhalt der Deponie zu bestimmen und die Struktur der umgebenden Sedimente zu erkunden.

Die laterale Ausdehnung des Deponiekörpers konnte mit Hilfe von magnetischen oder elektromagnetischen Methoden rasch und zuverlässig bestimmt werden. Die Magnetikdaten lieferten zusätzlich Hinweise auf den Anteil metallischer Objekte in der Deponie. Die Tiefenlage der Deponieunterkante wurde mit einem neuentwickelten refraktionsseismischen Tomographieverfahren bestimmt. Die tomographischen Querschnitte (Bild 4) zeigen zum einen die seismischen Geschwindigkeiten im ungestörten Terrain (Bild 4a)



5 Schematische Übersicht und geologische Information im Bereich des tomographischen Experiments im Felslabor Grimsel



6

Tomographische Rekonstruktionen der in Bild 5 dargestellten Felder. a: Standard-Tomographie, b: Verbesserte Tomographie mit Berücksichtigung der Koordinatenabweichungen

und im Bereich der Altlast (Bild 4b und 4c), so dass der Deponiekörper deutlich sichtbar wird. Mit Hilfe der lateralen Ausdehnung (Magnetik, Elektromagnetik) und der Tiefenausdehnung (Refraktionstomographie) wurde ein Deponievolumen von 175 000 m<sup>3</sup> abgeschätzt.

Schliesslich wurde die Struktur der umliegenden Sedimente mit einem seismischen 3D-Experiment erkundet. Die hervorstechendsten Merkmale des aus diesen Messungen konstruierten Datenwürfels bildeten linsenartige Zonen erhöhter Reflektivität in den obersten 100 m. Diese Zonen repräsentieren entweder riesige Felsblöcke oder linsenförmige Ablagerungen von kiesigen Sedimenten.

Diese Altlastenstudie hat deutlich gezeigt, dass eine einzelne Methode nicht die gewünschten Antworten liefern kann. Magnetische und elektromagnetische Verfahren liefern präzise laterale Ausdehnungen, bieten aber keine Tiefeninformation. Die neue Refraktions-Seismik-Methode hingegen liefert Deponietiefen, charakterisiert aber die laterale Ausdehnung nur ungenügend. Weder Magnetik, Elektromagnetik noch die Refraktions-Seismik waren in der Lage, Strukturen in grösseren Tiefen aufzulösen, was aber mit reflexionsseismischen Messungen gelang.

#### Charakterisierung kristalliner Gesteine

Im Rahmen des Forschungsprogramms für die Lagerung von radioaktiven Abfällen betreibt die Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ein Felslabor in der Nähe des Grimselpasses. Hier wurde eine ganze Reihe von geophysikalischen Experimenten durchgeführt. Ziel all dieser Untersuchungen war die hochauflösende, zerstörungsfreie Erkundung kristalliner Gesteine. Insbesondere galt es, Schwächezonen im Gestein einwandfrei zu bestimmen.

Ein wichtiger Bestandteil dieser Untersuchungen bildete ein horizontales seismisches Tomographie-Experiment. Der Versuchsaufbau ist in Bild 5 dargestellt. Seismische Wellen wurden entlang eines Labortunnels und in einem Bohrloch (B3) angeregt, und die Geophone wurden in die Bohrlöcher B1, B2 und B3 verteilt. Erste Analysen der registrierten Daten lieferten Tomogramme, die nur schwer mit der erwarteten Geologie zu erklären waren (Bild 6a). Im hinteren (vom Laborstollen entfernten) Teil der Bohrlöcher sind ausgeprägte positive und negative Anomalien zu erkennen, und entlang des Bohrlochs B2 finden wir eine abrupte Änderung der seismischen Geschwindigkeiten.

Eine mögliche Ursache für die unbefriedigenden Resultate lag bei den Ungenauigkeiten der Quellen- und Empfängerkoordinaten in den Bohrlöchern. Es ist zwar einfach, die Koordinate entlang der Bohrlöcher zu messen. Eine präzise Bestimmung der Bohrlochkrümmungen hingegen ist mit der heutigen Messtechnik nur schwer möglich.

Eine Modifikation des Auswerteprogramms führte zu deutlichen Verbesserungen der Resultate. Hier wurde bei der tomographischen Inversion berücksichtigt, dass die Bohrlochkoordinaten nicht genau bekannt waren. Konsequenterweise wurde nicht nur für die unbekannt seismischen Geschwindigkeiten zwischen den Bohrlöchern invertiert, sondern es wurde gleichzeitig versucht, auch die Quellen- und Empfängerkoordinaten zu berechnen. Diese gekoppelte Inversion lieferte die erhofften Verbesserungen (Bild 6b). Die Artefakte im hinteren Bereich der Bohrlöcher sind verschwunden. Auch die Diskontinuität entlang Bohrloch B2 ist nicht mehr sichtbar, wie das aufgrund der geologischen A-priori-Information zu erwarten war. Die verbleibenden Anomalien in Bild 6b repräsentieren stark zerklüf-

#### Dank

Die hier vorgestellten technischen und methodischen Neuentwicklungen sowie die präsentierten Fallstudien sind das Resultat intensiver Forschungsarbeiten der Gruppe für Angewandte und Umweltgeophysik der ETH Zürich. Frank Lehmann, Michiel van der Veen, Peter Wild, Heinrich Horstmeyer, Eva Lanz, Milan Beres und Prof. Alan G. Green möchte ich an dieser Stelle für die Bereitstellung ihrer Forschungsergebnisse sowie für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts danken. Bei Prof. Dr. Sarah Springman und Lukas Arenson vom Institut für Geotechnik der ETH Zürich bedanke ich mich ebenfalls für die Durchsicht des Manuskripts sowie für viele hilfreiche Tipps zur Verbesserung der sprachlichen «Kompatibilität» zwischen Geophysikern und Ingenieuren.

#### Schlussfolgerungen

Technische und methodische Entwicklungen in der angewandten Geophysik begründen eine neue Ära der Erkundung des unteren Untergrunds. Die neuen Verfahren liefern nicht nur präzisere Information, sondern können dank der schnellen Datenakquisition zu einem attraktiven Preis angeboten werden.

Die Anwendung mehrerer geophysikalischer Methoden liefert oftmals den Schlüssel zu vertrauenswürdigen Resultaten. Bis jetzt war eine geophysikalische Vermessung eines Gebiets mit mehreren Methoden aus finanziellen Gründen kaum denkbar. Auch hier eröffnet die beschleunigte Datenaufnahme neue Möglichkeiten. Je nach Fragestellung kann das Untersuchungsgebiet in kurzer Zeit problemlos mit mehreren Verfahren erkundet werden.

Adresse des Verfassers:

Hansruedi Maurer, Dr. sc. nat., Institut für Geophysik, ETH Höggerberg, 8093 Zürich

#### Weitere Information

Die hier vorgestellten neuen technischen und methodischen Mittel werden laufend verbessert und verfeinert. Die neuen Produkte sind jedoch mittlerweile derart ausgereift, dass sie auf kommerzieller Basis angeboten werden können. Informationen dazu sowie weitere Unterlagen zu den geophysikalischen Erkundungsverfahren bei: Gruppe für Angewandte und Umweltgeophysik, Institut für Geophysik, ETH Höggerberg, 8093 Zürich, Internet: <http://www.aug.geophys.ethz.ch>, E-mail: [maurer@augias.ig.erdw.ethz.ch](mailto:maurer@augias.ig.erdw.ethz.ch)