

Seismische Datengewinnung – moderne Messsysteme verbessern die Abbildung des tiefen Untergrunds

Christian Haberland und Trond Ryberg
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Most of our knowledge of the Earth's interior results from seismological observations. The measurements are based on the fact that different rock types show different physical properties, and that seismic waves (e.g., from earthquakes or explosions) travelling through the Earth can be observed at the surface and be used to infer the internal architecture. Early seismological observations revealed the layered structure of the Earth, and today scientists are working on imaging the regional and local structural variations to better understand the geological processes and dynamics forming the Earth. However, seismic methods are also utilized to reveal the shallow parts bearing important resources such as hydrocarbons, water, or mineral deposits.

In every case, the challenge for these seismic methods is to provide ever detailed images of the subsurface. One important step toward this aim is to increase the number of observations which can often be achieved by increasing the number of recording instruments. Recent technological advances in the field of A/D-converters, GPS receivers, and data storage led to the development of very compact autonomous recorders with a significantly reduced power consumption. Now, more instruments can be transported and installed with less personnel and costs, which results in significantly denser spatial sampling of the seismic wave field, thus eventually yielding better resolved subsurface images.



Moderne Vorstellungen über den Aufbau der Erde basieren in erster Linie auf Befunden seismologischer Studien. Das Grundprinzip der Messungen beruht auf unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Gesteinstypen. So ändert sich z. B. die Geschwindigkeit von Erdbebenwellen, wenn sie bei ihrem Weg durch den Erdkörper unterschiedliche Gesteinsschichten durchlaufen. Seismische Messungen an der Erdoberfläche erlauben daher Rückschlüsse auf die tieferen Strukturen der Erde.

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gelang Emil Wiechert, Beno Gutenberg und Andrija Mohorovičić mit geophysikalischen Studien an Erdbebenwellen ein erster Blick ins Erdinnere. Daraus entwickelte sich die Theorie, dass die Erde einen schalenförmigen Aufbau hat. Bis heute dienen Erdbebenbeobachtungen dazu, diesen Schalenbau in weiteren Details zu verstehen sowie regionale strukturelle Variationen und Heterogenitäten näher zu untersuchen, die Hinweise auf die ablaufenden geologischen Prozesse (Gebirgsbildung, Subduktion, Vulkanismus etc.) und die Entstehungsgeschichte der Erde geben (z. B. Haberland et al., 2009; Mohsen et al., 2012). Darüber hinaus liefern diese Beobachtungen Informationen zu Erdbebenort und -zeit sowie Herdmechanismus und Bruchvorgang und leisten so einen wesentlichen Beitrag zur Gefährdungsanalyse und zur Erdbeben- und Tsunami-Frühwarnung.

Seismologische Verfahren lösen die unterirdischen, dem Auge verborgenen Strukturen aber nicht nur im globalen Maßstab auf, sondern dienen auch dazu, unbekannte Strukturen in den obersten Metern bis Kilometern mit hoher Genauigkeit abzubilden. So werden künstliche seismische Quellen beispielsweise von Explosionen oder Vibroseisanregungen routinemäßig für die Exploration von Grundwasser, Kohlenwasserstoffen und mineralischen Rohstoffen bzw. Reservoirs eingesetzt (z. B. Baumann-Wilke et al., 2012). Aktive seismische Verfahren (Refraktions-/Reflexionsseismik) sind die wichtigsten Messverfahren in der Grundlagenforschung zur Erkundung der Struktur der Kruste und des oberen Erdmantels (Prodehl & Mooney, 2012, und Referenzen darin; Mechie et al., 2012).

Links: Neue, kompakte seismische Registrierstation in der Wüste Namibias. Die Station in der Nähe der angolanischen Grenze ist Teil eines 300 km langen seismischen Profils zur Erforschung des namibischen Kontinentalrands. (Foto: Ch. Lendl, GFZ)

Left: New, compact seismic recording equipment in the Namibian desert. This station at the Namibian-Angolan border is part of a 300 km long seismic profile to study the Namibian passive continental margin.

Herausforderung: höhere Auflösung, mehr physikalische Parameter

In allen Fällen – bei der Beobachtung von Signalen natürlicher Erdbeben oder künstlichen seismischen Quellen, auf der globalen wie der lokalen Skala, in den obersten Metern wie an der Kern-Mantel-Grenze – besteht die Herausforderung für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler darin, immer höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds zu erarbeiten und die geologischen Strukturen detailliert aufzuzeigen (Abb. 1).

Eine Möglichkeit, Abbilder zu verbessern, bieten neue, innovative Analysemethoden. So verwendet beispielsweise die Wellenformtomographie Aufzeichnungen über ein längeres Zeitintervall (im Gegensatz zu nur einem Laufzeitwert bei klassischen Verfahren) und erzielt damit höher aufgelöste Bilder (Pratt, 1999; Hole et al., 2005). Neben solchen verbesserten Datenanalyseverfahren kommt der Erhöhung der Anzahl der Messungen eine wichtige Bedeutung zu, zumal einige Verfahren eine hohe Signaldichte methodenbedingt voraussetzen. Diese kann entweder durch die Anzahl der seismischen Quellen und/oder der seismischen Stationen (Kanäle) erhöht werden, in manchen Fällen auch durch eine längere Registrierzeit. Das Ziel ist dabei, das Wellenfeld räumlich genauer zu erfassen – eine Voraussetzung dafür, die geologischen Strukturen besser aufzulösen. Zudem führt eine höhere Beobachtungsdichte zu einer signifikanten Rauschunterdrückung (Heath, 2008). Letztlich verbessert die Mehrfachmessung die Möglichkeit, Fehlfunktionen einzelner Stationen oder Komponenten auszugleichen.

Bei der Explorationsseismik ist seit Jahren der Trend zu einer steigenden Anzahl eingesetzter Registrierstationen zu beobachten. Typischerweise verdoppelt sich hier die Anzahl der verwendeten Kanäle (pro Messtrupp) etwa alle zwei Jahre (Heath, 2008). Heute werden in einigen Fällen Untersuchungen mit mehr als 100 000 aktiven Kanälen durchgeführt, um den Untergrund, z. B. ein Reservoir, petrophysikalisch und lithologisch zu charakterisieren.

In der Explorationsseismik werden auf lokaler Skala überwiegend kabelbasierte Systeme eingesetzt, bei denen die Daten einzelner Empfänger über Kabel oder Funk (in Nahe-Echtzeit) weitergeleitet werden. Großskalige oder lokale/regionale temporäre seismologische Studien decken Profile von mehreren 100 km bzw. Flächen von mehreren 10 000 km² ab und weisen Stationsabstände größer 100 m (bis mehrere 10er km) auf. Die Anzahl der verwendeten Geräte bei diesen nichtkommerziellen Anwendungen ist mit typischerweise unter 1000 Kanälen häufig sehr viel geringer als in der Explorationsseismik. In diesen großskaligen Untersuchungen kommen daher fast ausschließlich



Kontakt: Ch. Haberland
(haber@gfz-potsdam.de)

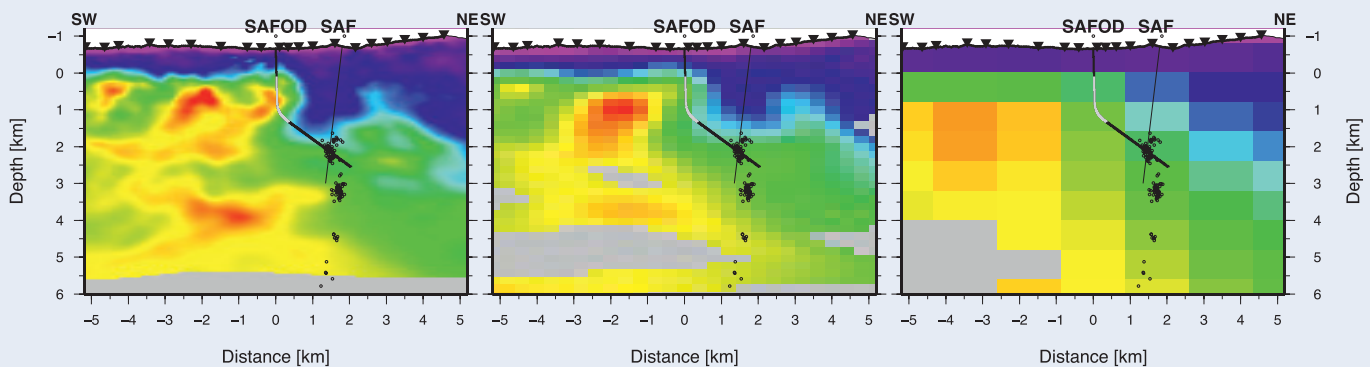


Abb. 1: Abbildungsleistung tomographischer Verfahren in Abhängigkeit von der Empfängerdichte. Für dieses Beispiel wurde der Originaldatensatz (aktive Seismik an der San Andreas-Verwerfung; Ryberg et al., 2012) sukzessive künstlich verringert, um den Effekt der Beobachtungsdichte zu zeigen (seismische Geschwindigkeiten sind farbkodiert). Links: Tomographische Inversion des Originaldatensatzes (Empfängerabstand 25 m). Mitte: Tomographische Inversion mit dezimiertem Datensatz, der einem Empfängerabstand von 125 m entspricht. Rechts: Tomographische Inversion mit dezimiertem Datensatz, der einem Empfängerabstand von 500 m entspricht. Die asymmetrische Geschwindigkeitsstruktur ist auf allen Bildern deutlich zu erkennen – die Feinstruktur, besonders in Relation zur Position der Bohrung, jedoch nur auf dem linken Bild (geringste Empfängerabstände).

Fig. 1: Spatial resolution of tomographic methods as a function of observation density. For this example the original dataset (controlled source seismic experiment at the San Andreas fault, California; Ryberg et al., 2012) was artificially decimated to simulate less dense observations. Seismic velocities are color-coded. Left: Tomographic inversion of the original dataset (receiver spacing 25 m). Middle: Tomographic inversion of decimated dataset reflecting a receiver spacing of 125 m. Right: Tomographic inversion of decimated dataset reflecting a receiver spacing of 500 m. The asymmetric velocity structure is visible at all images, however, the fine structure, particularly in relation to the drill hole position, can only be assessed in the left image (highest observation density – smallest receiver spacing).

autonome Registereinheiten zum Einsatz, bei denen die Daten gespeichert und am Ende des Experiments ausgelesen werden.

Herausforderung an Logistik

Die größten Herausforderungen bei dem Einsatz einer größeren Anzahl von Sensoren in temporären Experimenten liegen in der Logistik. Ab einem bestimmten Volumen und Gewicht der Instrumente steigen der Logistikaufwand und die Transportkosten enorm an. Zudem ist der Stromverbrauch der Messgeräte eine besonders kritische Größe, da er gegebenenfalls die Verwendung großer und schwerer Batterien (und möglicherweise weiterer externer Stromversorgung, z. B. durch Solarpaneele) erforderlich macht. Bei kabelbasierten Systemen wird zudem das Gewicht der Kabel bei größeren Empfängerabständen überproportional groß (Lansley et al., 2008).

Neue Gerätegeneration

Fortschritte bei den technischen Komponenten wie Computer-Prozessoren, AD-Wandlern, Speicherchips und GPS-Empfängern machten die Entwicklung besonders kompakter und robuster autonomer Datenrekorder möglich, die sich durch einen extrem niedrigen Stromverbrauch (= kleinere Batterien) und vergleichsweise günstigen Preis bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit auszeichnen (Abb. 2). Diese Geräte ermöglichen, dass – verglichen mit älteren Geräten – ein Registriertrupp eine viel größere Zahl von Stationen/Kanälen in gleicher Zeit aufbauen kann, Logistik- und Transportkosten durch das geringere Gewicht gemindert werden und damit letztlich eine größere Anzahl von Stationen/Kanälen zur Verfügung steht. Gegenüber kabelbasierten Geräten kommt es zu geringeren Ausfällen (beispielsweise durch Kabelbeschädigungen). Die Geräte lassen sich auch an logistisch schwierigen Stellen aus der Luft (z.B. Hubschrauber) oder unkompliziert in innerstädtischen Bereichen aufbauen (z.B. Lansley, 2012).



Abb. 2: Vorbereitung von 300 seismischen Rekordern für Untersuchungen von Erdkruste und oberem Mantel am Kontinentalrand Namibias (Januar 2012). Die Geräte wurden sukzessive an 2000 Messpunkten entlang eines 200 km langen Profils aufgebaut. (Foto: Ch. Haberland, GFZ)

Fig. 2: Preparation of 300 seismic recorders for investigations of crust and upper mantle at the Namibian passive continental margin (January 2012). These instruments were successively deployed at 2000 locations along a 200 km long profile.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wurden in den letzten Jahren solche kompakten 3-Kanal-Datenrekorder entwickelt, die sowohl in aktiven seismischen Experimenten als auch in temporären seismologischen Untersuchungen von Erdbeben (bis Perioden von 20 Sekunden) eingesetzt werden (Abb. 3). Diese Entwicklung mündete 2011 in einer Firmenausgründung am GFZ, die die Geräte fertigt und vertreibt. Über den Geophysikalischen Gerätepool Potsdam (GIPP) des GFZ steht eine Vielzahl dieser (und anderer) Geräte für die wissenschaftliche Community bzw. geowissenschaftliche Forschungsprojekte kostenfrei zur Verfügung (näheres siehe S. 37).

Die Verringerung von Gewicht und Volumen und demzufolge die Vorteile bei Transport und Installation machen sich auch bei kleineren Experimenten positiv bemerkbar: sie können mit geringeren Kosten und Personalaufwand durchgeführt werden – dies ist vor allem bei kleinen Forschungsprojekten wichtig. Zudem ermöglichen die vielen kontinuierlich registrierenden,

autonomen Stationen die Anwendung innovativer Abbildungsverfahren, die auf einer Langzeitmessung des seismischen Hintergrundrauschens (*ambient noise*) basieren. Verbunden mit allen Vorteilen der neu entwickelten Hardware können mit diesem Abbildungsverfahren sehr dichte Profile bzw. Flächen vermessen werden (z. B. Ryberg, 2011).

Auch bei der industriellen Exploration finden die kabellosen (autonomen) Systeme immer mehr Verbreitung (z. B. Heath, 2008, 2012; Mougnot, 2010; Dean, 2012), da mit ihnen der Datentransfer bei den sehr hohen Kanalzahlen realisiert werden kann.



Abb. 3: Die Registrierstationen – wie hier in der namibischen Wüste – können fast vollständig eingegraben werden, um beispielsweise Störungen durch Tiere zu minimieren. (Foto: Ch. Haberland, GFZ)

Fig. 3: The instruments, as here in the Namibian desert, can be buried almost completely – for example to minimize disturbances by animals.

Ausblick

In den kommenden Jahren wird die neue Gerätegeneration, die u. a. eine sehr viel größere Anzahl von Beobachtungsstationen in den einzelnen Experimenten ermöglicht, höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds liefern und somit zu einem besseren Verständnis der geologischen Strukturen und der ablaufenden Prozesse beitragen. Die schnelle Verfügbarkeit der Daten wird bei vielen Experimenten und Monitoring-Anwendungen auch weiterhin wichtig sein. Neben der Entwicklung innovativer Auswertemethoden werden sich zukünftige Forschungsarbeiten am GFZ mit einem effizienten Datentransfer, mit der Entwicklung neuer Sensoren und Rekorder sowie mit einer Optimierung des Managements von Experimenten befassen.

Danksagung

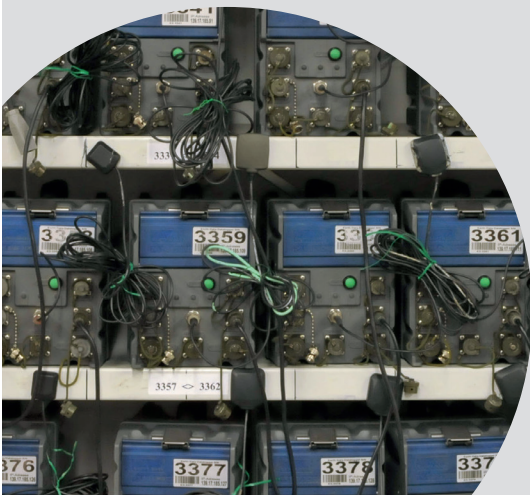
Viele Kollegen haben die Entwicklung der neuen Datenrekorder maßgeblich vorangetrieben, allen voran Mike Höning, Karl-Heinz Jäckel, Jens Bribach, Christof Lendl und Albrecht Schulze.

GIPP – Geophysikalischer Gerätepool des GFZ

Neben den seit vielen Jahrzehnten betriebenen Observatorien und permanenten Beobachtungsnetzen bilden temporäre Experimente, die typischerweise Tage bis Monate dauern, einen zentralen Bestandteil geophysikalischer Forschung. Für diese Experimente hält der Geophysikalische Gerätepool Potsdam (GIPP) des GFZ eine große Anzahl mobiler Feldinstrumente vor, die auch Arbeitsgruppen an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen für die akademische Forschung kostenfrei zur Verfügung stehen. Zu dem Gerätepool gehören magnetotellurische (elektromagnetische) und seismologische Sensoren und Datenrekorder sowie eine Vielzahl von Peripheriegeräten, die überwiegend bei Landexperimenten zum Einsatz kommen. Einige weitere Geräte dienen amphibischen Experimenten. Übliche Einsatzzeiten liegen zwischen zwei Wochen und zwei Jahren. Der GIPP wurde im Jahr 1992 in Betrieb genommen und hat seitdem rund 200 geowissenschaftliche Projekte mit Geräten ausgerüstet. Der Erfolg dieser Infrastruktur dokumentiert sich in einer großen Anzahl Publikationen und Dissertationen, die auf Daten GIPP-unterstützter Experimente basieren. Die mit GIPP-Geräten aufgezeichneten Daten werden am GFZ gespeichert und stehen einer weiteren Nutzung zur Verfügung. Die Verwaltung, Benutzerschulung, Pflege und Weiterentwicklung des Gerätepools wird durch das GFZ finanziert. Die Bereitstellung der Geräte erfolgt kostenfrei für alle Forschungseinrichtungen.

Weitere Informationen:

<http://www.gfz-potsdam.de/gipp>



Literatur

- Baumann-Wilke, M., Bauer, K., Schovsbo, N. H., Stiller, M. (2012): P-wave traveltimes tomography for a seismic characterization of black shales at shallow depth on Bornholm, Denmark. - *Geophysics*, 77, 5, EN53-EN60, 10.1190/geo2011-0326.1.
- Dean, T. (2012): Land seismic: the 'quiet' revolution. - *Preview*, 157, 38–41, 10.1071/PVv2012n157p38.
- Haberland, C., Rietbrock, A., Lange, D., Bataille, K., Dahm, T. (2009): Structure of the seismogenic zone of the southcentral Chilean margin revealed by local earthquake traveltimes tomography. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B01317, 10.1029/2008JB005802.
- Heath, B. (2008): Land seismic: the move towards the mega-channel. - *First Break*, 26, 2, 53-58.
- Heath, B. (2012): Seismic of tomorrow: configurable land systems. - *First Break*, 30, 6, 93-102.
- Hole, J. A., Zelt, C. A., Pratt, R. G. (2005): Advances in Controlled-Source Seismic Imaging. - *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 86, 18, 177–184, 10.1029/2005EO180001.
- Lansley, M., Laurin, M., Ronen, S. (2008): Modern land recording systems: How do they weigh up? - *The Leading Edge*, 27, 7, 888–894, 10.1190/1.2954029.
- Lansley, M. (2012): Cabled versus cable-less acquisition: making the best of both worlds in difficult operational environments. - *First Break*, 30, 1, 97–102.
- Mechie, J., Zhao, W., Karplus, M. S., Wu, Z., Meissner, R., Shi, D., Klemperer, S. L., Su, H., Kind, R., Xue, G., Brown, L. D. (2012): Crustal shear (S) velocity and Poisson's ratio structure along the INDEPTH IV profile in northeast Tibet as derived from wide-angle seismic data. - *Geophysical Journal International*, 191, 2, 369-384, 10.1111/j.1365-246X.2012.05616.x.
- Mohsen, A., Asch, G., Kind, R., Mechie, J., Weber, M. (2012 online first): The lithosphere-asthenosphere boundary in the eastern part of the Dead Sea Basin (DSB) from S-to-P receiver functions. - *Arabian Journal of Geosciences*, 10.1007/s12517-011-0503-4.
- Mougenot, D. (2010): Land cableless systems: use and misuse. - *First Break*, 28, 2, 55–58.
- Pratt, R. G. (1999): Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 1: Theory and verification in a physical scale model. - *Geophysics*, 64, 888–901, 10.1190/1.1444597.
- Prodehl, C., Mooney, W. (2012): Exploring the Earth's Crust - History and Results of Controlled-Source Seismology, (Memoir / Geological Society of America ; 208), Boulder, 764 p.
- Ryberg, T. (2011): Body wave observations from cross-correlations of ambient seismic noise: A case study from the Karoo, RSA. - *Geophysical Research Letters*, 38, L13311, 10.1029/2011GL047665.
- Ryberg, T., Hole, J. A., Fuis, G. S., Rymer, M. J., Bleibinhaus, F., Stromeyer, D., Bauer, K. (2012): Tomographic Vp and Vs structure of the California Central Coast Ranges, in the vicinity of SAFOD, from controlled-source seismic data. - *Geophysical Journal International*, 190, 3, 1341-1360, 10.1111/j.1365-246X.2012.05585.x.