

Trends in seismologischer Instrumentierung

Christian Haberland, Rüdiger Giese, Jan Henniges, Karl-Heinz Jäckel, Philippe Jousset, Stefan Lüth, Thomas Reinsch, Trond Ryberg¹
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Significant scientific findings are often directly related to innovations in measurement technology. For investigating the Earth's interior the invention of the seismography played the most important role. Starting with the first seismograph suitable for scientific investigations by Ewing, Gray and Milne in the 1870s and its improvement by Wiechert around 1900, seismic instrumentation was available in the beginning of the last century to reveal the layered structure of our planet. Since then, instruments were steadily improved, and controlled source experiments and seismic networks significantly contribute today to our understanding of the Earth's structure and the ongoing dynamic processes as well as to the exploration of resources as oil, gas, water and minerals. At the GFZ German Research Centre for Geosciences we work on technical innovations and apply them in experiments around the world and at a variety of scales. We develop highly portable, low-cost, high-performance seismic data recording systems, which are designed to be used in "large-N" array configurations (>1000 receivers) and on the sea floor (shallow water). Distributed acoustic sensors (DAS) based on fibre-optic cables allow extremely dense sampling of the seismic wavefields. Seismic sources and receivers integrated in borehole tools illuminate in high-resolution the subsurface during drilling operations (Seismic prediction while drilling, SPWD).



Bedeutende wissenschaftliche Erkenntnisse stehen oftmals in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung innovativer Messtechnik und Sensorik sowie ihrer Weiterentwicklung. Bei der Erforschung des Innern der Erde spielt die Erfindung des Seismographen eine herausragende Rolle. Nachdem die bis ins späte 19. Jahrhundert überwiegend verwendeten Seismoskope nur Erschütterungsanzeiger waren, ermöglichte der von Sir James A. Ewing, Thomas Gray und John Milne 1879 entwickelte und später von Ernst von Rebeur-Paschwitz und dann von Emil Wiechert um 1900 verbesserte Seismograph die quantitative Messung der durch seismische Wellen hervorgerufenen Bodenbewegungen. Diese wiederum lassen Aufschluss über den Aufbau der Erde und die in ihr ablaufenden Prozesse zu. Der Wiechertsche Horizontalseismograph (Abb. 1) war als Pendel ausgeführt, welches viskos gedämpft war und auf berußtem Papier aufzeichnete. Die große Masse von rund 1000 kg, nötig zur Überwindung der Reibung, begrenzte die Einsatzmöglichkeiten auf den reinen Observatoriumsbetrieb. Boris Borisovich Galizin entwickelte 1903 den elektrodynamischen Seismographen, bei dem eine Induktionsspannung gemessen wird, die bei der Relativbewegung einer mit der seismischen Masse verbundenen Spule in einem Magnetfeld entsteht – jenes Messprinzip, welches bis heute sogenannten Geophonen zugrunde liegt.

Bereits früh wurden die Seismographen zu globalen Beobachtungsnetzen zusammengeschlossen, die zur Entschlüsselung des Schalenbaus der Erde führten. So erfolgte die Entdeckung des Erdkerns 1906 durch Richard D. Oldham (erste Bestimmung der Tiefe der Kern-Mantel-Grenze 1913 durch Beno Gutenberg), der Kruste-Mantel-Grenze durch Andrija Mohorovičić 1909/1910, des flüssigen, äusseren Erdkerns durch Harold Jeffreys 1926 und des (festen) inneren Erdkerns durch Inge Lehmann 1936 (siehe z.B. *Shearer, 2009* und *Schweitzer, 2003*). In dieser Zeit wurden zudem Verfahren mit künstlichen seismischen Quellen wie Sprengungen insbesondere für Prospektionsaufgaben wie auch für krustenseismische Untersuchungen eingeführt. Neben der Erkundung der Struktur

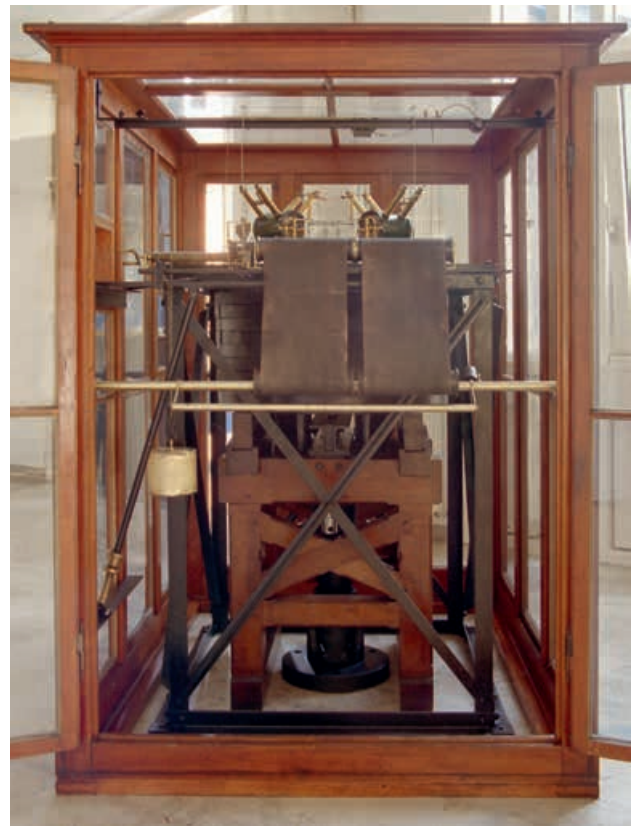


Abb. 1: Der im Foyer des GFZ ausgestellte Horizontalseismograph von Emil Wiechert war in Potsdam von 1903 bis 1954 im Einsatz (Foto: E. Gantz, GFZ)

Fig. 1: The Horizontal Wiechert Seismograph, on display in the GFZ foyer, was in operation in Potsdam from 1903 to 1954

des Erdinnern dienten seismische Netzwerke auch dem Studium von Erdbeben. Charles F. Richter entwickelte im Jahr 1935 das nach ihm benannte Maß für die Stärke von Erdbeben.

Seitdem wurden die Geräte ständig weiterentwickelt. Moderne Seismometer arbeiten nach dem Force-Balance-Prinzip, d.h. die auf die seismische Masse wirkenden Kräfte werden mittels einer geeigneten elektronischen Rückkopplung kompensiert. Hierdurch werden die Eigenschaften der Seismometer wesentlich verbessert (Linearität, Breitbandigkeit), da der Frequenzgang weitgehend unabhängig vom mechanischen System eingestellt werden kann. Dies ermöglicht weiterhin eine Verkleinerung der Sensoren, da durch eine hohe Güte des Masse-

Links: Moderne seismische Registriergeräte sind so klein, dass 300 Einheiten problemlos mit drei Geländewagen in Alukoffern auf dem Dach transportiert werden können – wie hier während eines Einsatzes in Namibia. (Foto: C. Haberland, GFZ)

Left: Modern seismic recording instruments are very compact so that 300 of such units packed in alu-boxes on the roof can easily be transported by three cars as seen here during a seismic experiment in Namibia.



Kontakt: C. Haberland
(christian.haberland@gfz-potsdam.de)

¹ Mitverfasser in alphabetischer Reihenfolge

Feder-Schwingers ihr Eigenrauschen auch bei kleinen Massen und Eigenperioden gering gehalten werden kann. Gleichzeitig sind solche Sensoren robuster und können mobil eingesetzt werden. Somit können auch lokale Erdbeben und Detailstrukturen beispielsweise von Gebirgen, Subduktionszonen oder Scherzonen mit temporären seismischen Netzen untersucht werden (z.B. *Haberland et al., 2014*).

Die Einführung der Digitaltechnik in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts bedeutete einen Durchbruch zu signifikant verbesserter Registrierung, Übertragung und Speicherung der aufgenommenen Daten. Das Global Positioning System (GPS) erlaubt heute die genaue Synchronisierung der einzelnen Stationen; in naher Zukunft könnten miniaturisierte Atomuhrmodule diese Aufgabe übernehmen. Ebenfalls miniaturisierte Beschleunigungssensoren (mikro-elektro-mechanische Systeme, MEMS), die beispielsweise auch in Airbags und Smartphones eingebaut sind, werden zunehmend in der Explorationsseismik eingesetzt. Neben den inertialen Sensoren können auch Stainmeter zur Messung seismischer Wellen benutzt werden. Diese bisher wenig eingesetzten Geräte könnten durch neue optische und faseroptische Technologien (s.u.) erheblich an Bedeutung gewinnen.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Entwicklung und Weiterentwicklung von innovativer seismischer Sensorik sowie mit der effizienten Registrierung und Speicherung der Daten, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu erzielen. Nachfolgend werden einige Neuentwicklungen vorgestellt.

Kompakte, mobile Feldseismographen für „Large-N“-Anwendungen

Eine wichtige Zielstellung der Seismologie ist, immer höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds zu erstellen, um die Strukturen und damit verbundene geologische Prozesse besser zu verstehen. Dafür ist es – neben verbesserten Analyseverfahren – erforderlich, das Wellenfeld möglichst dicht räumlich und zeitlich abzutasten. Mit der dichten Abtastung lassen sich grundsätzlich methodisch andere Auswerteverfahren wie z.B. die Helmholtztomographie, Wellenfeld-Gradiometrie und Arrayverfahren (basierend auf kohärenten Wellenfeldbeobachtungen) anwenden. In der Explorationsseismik werden schon heute Messungen mit bis zu 100 000 Empfängern durchgeführt, die in relativ begrenzten Messgebieten teilweise kabelbasiert arbeiten. Bei größerskaligen Untersuchungen (beispielsweise der Erdkruste) oder bei Erdbebenuntersuchungen kommen autonome seismische Stationen zum Einsatz, die temporär installiert werden. Derzeit erfolgen diese Untersuchungen mit relativ wenigen seismischen Sensoren (Zehner bis wenige Hundert; also deutlich weniger als in der Explorationsseismik). Am GFZ werden kompakte und robuste Datenrekorder entwickelt (CUBE-Datenrekorder; siehe auch *Haberland und Ryberg, 2012*), die

sich durch einen besonders geringen Stromverbrauch auszeichnen, kostengünstig sind und an die eine Vielzahl von Sensoren angeschlossen werden können. Dies erleichtert die Logistik, verringert die Transportkosten (siehe Foto Seite 68), erhöht die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stationen und reduziert den Personalaufwand für die Installation erheblich (siehe z.B. *Ryberg et al., 2015*). Somit können sehr viele Geräte („Large-N“) bei Experimenten zu wissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt werden. Gerade im Zusammenspiel mit modernen Breitbandsensoren, die ebenfalls einen sehr geringen Stromverbrauch aufweisen und kompakt sind, ermöglichen diese Geräte innovative Analysemethoden und tragen damit zu neuen Einblicken in Untergrundstrukturen sowie in Erdbeben- und Vulkanprozesse bei.

Ortsverteilte akustische Messungen (Distributed acoustic sensing, DAS)

Distributed Acoustic Sensing (DAS) ist eine neue Technologie, bei der eine optische Faser, wie z.B. aus der Telekommunikation bekannt, als Sensor zur Aufzeichnung akustischer Signale eingesetzt wird. Grundlage hierbei ist das Prinzip der optischen Zeitbereichsreflektometrie (optical time-domain reflectometry, OTDR), wodurch Messdaten entlang der optischen Faser mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung registriert werden können. Mit gegenwärtig verfügbaren Techniken können Abtastraten von z.B. 1kHz bei 1m Datenpunkt Abstand entlang von Sensorkabeln mit einer Länge von bis zu 40km realisiert werden, was völlig neue Möglichkeiten für geophysikalische Anwendungen eröffnet. Zudem haben die erforderlichen Sensorkabel einen einfacheren Aufbau als konventionelle



Abb. 2: Installation eines faseroptischen Kabels (gelb) während des Einbaus der Verrohrung in der Bohrung RN-34 im Reykjanes-Geothermiefeld, Island (Foto: M. Poser, GFZ)

Fig. 2: Installation of a fiber-optic cable (yellow) during running of the casing of the RN-34 well within the Reykjanes geothermal field, Iceland

Schwingungsaufnehmer und sind deutlich robuster, was einen einfacheren und kostengünstigeren Einsatz auch unter rauen Umgebungsbedingungen ermöglicht (Abb. 2).

Als Messgröße werden Dehnungsänderungen entlang der optischen Faser aufgezeichnet. Im Zuge der Dateninterpretation können diese entweder direkt verwendet, oder auch in die konventionell aufgezeichneten Geschwindigkeiten umgerechnet werden. Erste geophysikalische Messungen in Bohrlöchern sind für explorationsseismische Anwendungen mit vertikalen seismischen Profilmessungen (VSP) durchgeführt worden. Feldversuche mit DAS-VSP am GFZ-Pilotstandort Ketzin haben gezeigt, dass die aufgezeichneten Signale generell mit konventionellen Geophonen vergleichbar sind, jedoch ein geringeres Signal/Rausch-Verhältnis aufweisen (Daley et al., 2013). Erfolgt der Einsatz mit fest hinter der Verrohrung eingebauten Messkabeln, kann eine verbesserte Datenqualität gegenüber einem Sensor erzielt werden, der konventionell im Steigraum des Bohrlochs abgehängt wird. Mit dieser Methode konnte beispielsweise ein hochaufgelöstes seismisches 3D-Imaging im Nahbereich der Bohrungen in Ketzin mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden (Götz et al., 2015).

Um die Anwendbarkeit für seismologische Untersuchungen an der Erdoberfläche zu erproben, wurden DAS-Daten entlang eines 15 km langen Telekommunikationskabels im isländischen Reykjanes-Geothermiefeld erfasst (Reinsch et al., 2015). Erste Auswertungen zeigen, dass hierbei sowohl die Signale natürlicher als auch künstlicher seismischer Quellen erfolgreich aufgezeichnet werden konnten. Derzeit laufende Auswertungen dieser Daten, in Kombination mit Daten eines Netzwerks seismischer Breitbandstationen, das in Zusammenarbeit mit ÍSOR (Iceland GeoSurvey) eingerichtet wurde, zielen darauf ab, ein besseres Abbild des geothermischen Reservoirs zu ermöglichen (Jousset et al., 2014).

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am GFZ haben zum Ziel, die DAS-Methode weiterzuentwickeln, um unterschiedliche Signalcharakteristiken anzugleichen, das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern und die bei den Messungen erzeugten, sehr großen Datenmengen zu prozessieren. Bei dem bislang üblichen Messkabelaufbau besteht eine ausgeprägte direktionale Sensitivität in Richtung der Längsachse der Kabel, wodurch Einschränkungen gegenüber etablierten Drei-Komponenten-Sensoren bestehen. Messungen in Bohrungen mit fest eingebauten Sensorkabeln stellen bislang den hauptsächlichen Anwendungsbereich dar. Mit dem am GFZ entwickelten hybriden Bohrlochmesssystem (Henninges et al., 2012) sind auch faseroptische Messungen mit einem temporär abgehängten Kabel, ähnlich wie bei einer Wireline-Bohrlochmessung möglich, wodurch die Anwendungsmöglichkeiten der DAS-Methode deutlich erweitert werden.

Für die Anwendung der DAS-Methode kommen u. a. bereits vorhandene Telekommunikationsglasfaserkabel in Frage, wodurch

weltweit bereits ein viele Millionen Kilometer langes Netzwerk an potenziell nutzbaren Messkabeln zur Verfügung steht. Sie ermöglichen räumlich und zeitlich hochauflösende seismakustische Messungen und können durch weitere F&E-Arbeiten in naher Zukunft zu verbesserten Beobachtungsmöglichkeiten bei der Bohrloch- und Oberflächenseismik beitragen. Insbesondere die Langzeitüberwachung von schwer zugänglichen Strukturen (z. B. Tunnel und unterirdische Speicher) lässt sich durch permanent installierte Glasfaserkabel leichter realisieren als mit konventionellen, mobilen seismischen Empfängern (Geophone, Piezo-Aufnehmer, etc.)

Seismic prediction while drilling (SPWD)

Die Ansprüche an die Erkundung des Untergrunds steigen mit zunehmender Tiefe an. Dies gilt sowohl für die Prospektion von Lagerstätten als auch für die Erkundung von Strukturen im Umfeld von Untertagebauwerken. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Erkundung zu verbessern, besteht darin, seismische Messungen in unmittelbarer Nähe zu den geologischen Strukturen aus Bohrungen und Tunneln heraus durchzuführen. Auf diese Weise können Signalfrequenzen von einigen Hundert Hertz bis in den Kilohertz-Bereich für die Prospektion eingesetzt werden. Dies stellt aber hohe Anforderungen an die Messtechnik, da große Erschütterungen, hohe Drücke und Temperaturen sowie der sehr begrenzte Raum für eine Installation eine kompakte und robuste Bauweise der Messgeräte notwendig macht.

Basierend auf den Erfahrungen in der Entwicklung von seismischer Messtechnik für Tunnelanwendungen wurden am GFZ Messsysteme für die Anwendung in trockenen horizontalen und vertikalen Explorationsbohrungen bis 2000 m Tiefe entwickelt. Diese SPWD-Sonden (Seismic Prediction While Drilling) vereinen die Empfänger und die seismische Quelle, bestehend aus vier magnetostriktiven Vibratoren, in einem Gerät (Jaksch et al., 2010). Die Vibratorsignale können unabhängig voneinander gesteuert werden, so dass eine Verstärkung der seismischen Wellen durch Interferenz in definierten Raumrichtungen ermöglicht wird. Dies erlaubt eine Vergrößerung der Erkundungsreichweite und führt zu einer Verbesserung der räumlichen Auflösung geologischer Strukturen.

Tests mit den SPWD-Bohrlochsonden sind ein wichtiger Baustein in der Entwicklung und Anpassung der Sonden an die untertägigen Einsatzbedingungen. Das GFZ besitzt mit dem KTB-Tiefenlaboratorium in Windischeschenbach und dem Untertage-Labor in Freiberg günstige Bedingungen für anwendungsnahe Testmessungen. Abbildung 3 zeigt den Einsatz der SPWD-Sonde für horizontale Bohrungen in der Eisenerzmine von Kiruna, Schweden.



Abb. 3: Test einer SPWD-Sonde in der Eisenerzmine von Kiruna, Schweden. Links: Einbau der Sonde in die Erkundungsbohrung. Rechts: Die SPWD-Sonde, bestehend aus seismischer Sektion (Vordergrund) und Elektronik-Sektion für die Signalerzeugung, Datenaufzeichnung und Übertragung zur Oberfläche (Hintergrund; Foto: R. Giese, GFZ)

Fig. 3: SPWD-sonde in the Kiruna iron ore mine. Left: Insertion of the seismic unit of the sonde into well. Right: The complete SPWD-sonde consisting of the seismic unit (foreground) and the electronic unit for signal generation, data recording and transmission (background)

Unterwasser-Geophonstationen

Fortschritte bei technischen Komponenten wie A/D-Wandlern, Speicherchips und Computerprozessoren, die zur Entwicklung der oben vorgestellten kompakten Datenrekorder führten, ermöglichen auch neue Instrumente für den Unterwassereinsatz. Die im Datenlogger CUBE (s.o.) verwendeten elektronischen Komponenten erweisen sich als sehr leistungsfähig, so dass ein Einsatz auf dem Meeresgrund, d.h. ohne GPS-Empfang, möglich ist. Am GFZ entwickelte, leistungsfähige und kostengünstige Unterwasser-Geophonstationen (Shallow ocean bottom seismographs, S-OBS) für den Flachwassereinsatz (Abb. 4) zeigen in Tests exzellente Resultate. Die Stationen wurden in einem Pilotprojekt in Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut (AWI) zum Studium der submarinen Permafrosterstreckung in der Arktis erfolgreich eingesetzt (*Overduin et al., 2015*). Mithilfe dieser Stationen konnten unter Verwendung minimalinvasiver, passiver seismischer Verfahren im ökologisch sensitiven Gebiet des Lenadeltas (Nordpolarmeer), einem der größten Flussdeltas der Erde, klimarelevante Informationen der submarinen Permafrostschicht bestimmt werden.

Ausblick

Die aufgeführten Beispiele technischer Innovationen spiegeln vor allem den derzeitigen Trend in der Seismologie wieder, die Wellenfelder räumlich und zeitlich dichter bzw. näher am Objekt abzutasten, um eine immer höhere Auflösung des Untergrunds zu erhalten und neue Analysemethoden zu ermöglichen. Da bei diesen Ansätzen enorme Datenmengen entstehen, bestehen die größten Herausforderungen in naher Zukunft in einer effizienten Datenaufbereitung und -prozessierung.

Literatur

- Daley, T., Freifeld, B., Ajo-Franklin, J., Dou, S., Pevzner, R., Shulakova, V., Kashikar, S., Miller, D., Götz, J., Hennings, J., Lüth, S. (2013): Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. - *The Leading Edge*, 32, 6, pp. 699–706.
- Götz, J., Lueth, S., Hennings, J., Reinsch, T. (2015): Using a Fibre Optic Cable as Distributed Acoustic Sensor for Vertical Seismic Profiling at the Ketzin CO₂ Storage Site. - *Proceedings, 77th EAGE Conference and Exhibition (Madrid, Spain 2015)*.
- Haberland, C., Bohm, M., Asch, G. (2014): Accretionary nature of the crust of Central and East Java (Indonesia) revealed by local earthquake travel-time tomography. - *Journal of Asian Earth Sciences*, 96, pp. 287–295.
- Haberland, C., Ryberg, T. (2012): Seismische Datengewinnung: moderne Messsysteme verbessern die Abbildung des tiefen Untergrunds. - *System Erde*, 2, 2, pp. 32–37.
- Hennings, J., Brandt, W., Erbas, K., Moeck, I., Saadat, A., Reinsch, T., Zimmermann, G. (2012): Downhole monitoring during hydraulic experiments at the in-situ geothermal lab Gross Schönebeck - 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford, USA 2012).

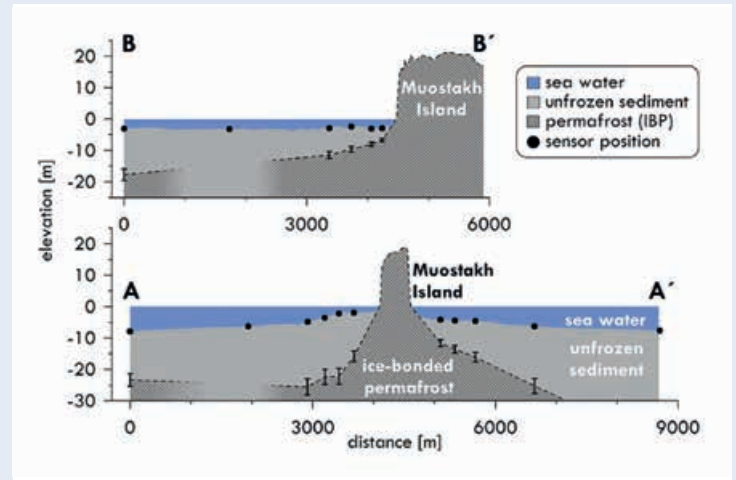


Abb. 4: Einsatz neuerartiger Flachwasser-Seismometer (S-OBS) zur Erforschung des submarinen Untergrunds. Links: Ausbringen der Instrumente bei einem Test in der deutschen Nordsee mit dem AWI-Forschungsschiff „Mya“ (S-OBS sind die Metallzylinder, zusammen mit Ankergewicht (rote Beutel) und gelber Boje) (Foto: C. Haberland, GFZ). Rechts: Ergebnisse des Messeinsatzes in der sibirischen Arktis (Laptevsee), bei dem die Tiefenlage und Erstreckung des submarinen Permafrosts ermittelt wurde (Overduin et al., 2014; Wiederverwendung der Abbildung rechts mit freundlicher Genehmigung des Verlags John Wiley and Sons)

Fig. 4: Operation of new shallow water seismometers (S-OBS) to investigate the polar sea shelf. Left: Deployment of the instruments from AWI-RV “Mya” during a test in the North Sea (S-OBS are the metal cylinders, complemented by an anchor weight (red bag) and a yellow buoy). Right: Results of an experiment in the Siberian Arctic (Laptev Sea), in which the depth and areal extent of submarine ice-bounded permafrost was investigated (Overduin et al., 2014; reproduction of right figure with kind permission by John Wiley and Sons)

Jaksch, K., Giese, R., Kopf, M., Jurczyk, A., Mikulla, S., Weisheit, S., Groh, M., Krüger, K. (2010): Seismic Prediction While Drilling (SPWD): Looking Ahead of the Drill Bit by Application of Phased Array Technology. - Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring, 9, pp. 41–44.

Jousset, P., Ágústsson, K., Verdel, A., Blanck, H., Stefánsson, S. A., Trygvason, H., Erbas, K., Deon, F., Erlendsson, Ö., Guðnason, E., Specht, S., Hersir, G. P., Halldórsdóttir, S., Weemstra, C., Franke, S., Bruhn, D., Flóvenz, Ó. G., Friðleifsson, G. Ó. (2014): Imaging geothermal systems associated with oceanic ridge: first analysis of records from a dense seismic network deployed within and around the Reykjanes high-temperature area, SW-Iceland - Abstracts, AGU 2014 Fall Meeting (San Francisco, USA 2014).

Overduin, P. P., Haberland, C., Ryberg, T., Ohrnberger, M., Kneier, F., Jacobi, T., Grigoriev, M. N. (2015): Submarine permafrost depth from ambient seismic noise. - Geophysical Research Letters, 42, 18, pp. 7581–7588.

Reinsch, T., Hennings, J., Götz, J., Jousset, P., Bruhn, D., Lüth, S. (2015): Distributed Acoustic Sensing Technology for Seismic Exploration in Magmatic Geothermal Areas - Proceedings, World Geothermal Congress 2015 (Melbourne, Australia 2015).

Ryberg, T., Haberland, C., Haberland, T., Weber, M., Bauer, K., Behrmann, J. H., Jokat, W. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - Geology, 43, 8, pp. 739–742.

Schweitzer, J. (2003): Early German contributions to modern seismology. - In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology: project of the Committee on Education, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, (International Geophysics Series ; 81B), Amsterdam [u.a.]: Academic Press, 58 pp. (auf CD-ROM).

Shearer, P. M. (2009): Introduction to Seismology, 2. ed., Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press, 412 p.