

# Untertageexploration – Instrumente und Methodenentwicklung

Rüdiger Giese und Jochem Kück

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Borehole measurements or downhole logging is a powerful method to in-situ gain quasi-continuous profiles of physical, chemical and structural rock parameters with high depth accuracy. It is widely used in both academic research and commercial exploration for oil and gas, mining industry, geothermal and water engineering. The GFZ section Scientific Drilling facilitates logging in two ways, first through service and applying a set of downhole instruments and second through developing novel methods and tools. Logging support is provided to scientific projects and covers assistance with planning and logistics of downhole logging programs, logging service through operating a versatile set of own downhole sondes, including geophysical and structural logging tools, a seismic chain and a fluid sampler. In order to expand the possibilities of in-situ borehole information new tools are developed jointly with academic and industrial partners. The most advanced sonde development strives to image geological structures by using high-resolution borehole seismics to explore hydrocarbons or geothermal resources by detecting thin layers and faults. The SPWD (Seismic Prediction While Drilling) borehole prototype sonde combines seismic sources and receivers in one device to improve the resolution. Two downhole test sites, the KTB-Deep Crustal Lab in Windischeschenbach and the GFZ Underground Lab in the mine “Reiche Zeche” in Freiberg offer unique in-situ conditions for experiments and tests of the borehole equipment.*



Mit Bohrlochmessverfahren („Borehole Logging“), d.h. Messungen direkt im Bohrloch, können kontinuierliche Profile physikalischer, chemischer und struktureller Parameter des Untergrunds mit hoher Tiefengenauigkeit unter *In-situ*-Bedingungen gewonnen werden. Diese sehr leistungsfähige Methode bietet zudem die Möglichkeit, Parameter im Bohrloch zu bestimmen, die normalerweise zeitaufwendig im Labor an den erbohrten Gesteinskernen ermittelt werden, wie z. B. die natürlich vorkommende Radioaktivität, elektrische Eigenschaften, Schallwellengeschwindigkeiten, Dichte, Porosität, magnetische Suszeptibilität und die chemische Gesteinszusammensetzung. Darüber hinaus können auch Parameter erfasst werden, welche nicht oder nur unzureichend übertägig messbar sind: Tiefenprofile von Temperatur, Druck, Schwere- und Magnetfeld, orientierte Abbildungen der Bohrlochwand und die Richtung des Spannungsfelds. Mittels Wiederholungsmessungen können zudem zeitliche Variationen festgehalten werden. Neben der wissenschaftlichen Untersuchung des Untergrunds werden Bohrlochmessungen auch in der kommerziellen Exploration, vor allem für Öl, Gas, Bergbau, Wasserbau und geothermische Energie angewendet.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ betreibt die Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ eine umfangreiche Infrastruktur für Bohrlochmessungen mit Sonden, Winden, Mess-LKW und Register-einheiten, um Forschungsbohrungen eigenständig vermessen zu können. Außerdem werden neue Erkundungsmethoden und Geräte für Messungen im Bohrloch, insbesondere seismische Methoden entwickelt. Die in der Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ angesiedelte Operational Support Group des Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP, unterstützt ICDP-Vorhaben in allen Stadien eines Bohrprojekts bei Vorbereitung, Management, Ausführung sowie Datenarchivierung und -bereitstellung. Sie ist die Schnittstelle zwischen den ICDP-Gremien, den Projekten und dem GFZ.

*Links: Übersetzen zur Bohrplattform auf dem Toten Meer in Israel. Im Dead Sea Drilling Project DSDP des ICDP führte die Operational Support Group des GFZ Bohrlochmessungen an zwei Bohrlo-kationen auf dem See bis in eine Tiefe von 750 m bei bis zu 300 m Wassertiefe durch. (Foto: J. Kück, GFZ)*

*Left: The logging day shift being ferried to the drilling barge on the Dead Sea in Israel. In the Dead Sea Drilling Project DSDP of ICDP the Operational Support Group at GFZ conducted downhole logging at two sites on the lake to a depth of 750 m at water depths up to 300 m.*

## Borehole Logging

Beim Wireline Borehole Logging wird eine Messvorrichtung (Bohrlochsonde) an einem Kabel zunächst in ein Bohrloch eingefahren. Dann werden die jeweiligen Messparameter mit üblicherweise aufwärts fahrender Sonde gegen die Tiefe aufgezeichnet. Neben diesen quasi-kontinuierlichen, tiefenbezogenen Messungen gibt es auch Methoden mit diskreten, stationären Positionen der Sonde im Bohrloch für zeitbezogene Aufzeichnungen oder räumliche Abbildung des Bohrlochumfelds. Die verwendeten Bohrlochsonden sind an die rauen Bohrlochbedingungen angepasste, hochkomplexe Messinstrumente. Sie besitzen einerseits miniaturisierte Messapparaturen, da sie in ein Hüllrohr mit einem Durchmesser von nur 90 mm oder weniger eingepasst werden müssen. Andererseits müssen Hüllrohr und Elektronik/Sensorik hohem Druck und hoher Temperatur widerstehen und dennoch präzise Messungen ausführen. Die Bohrlochsonden werden üblicherweise an einem Kabel, das mehrere Datenleiter enthält, in das Bohrloch gefahren.

Im Bohrloch gemessene Daten bilden eine wichtige Grundlage für die geologische Interpretation der durchbohrten Formationen, der Lithologieidentifikation und ihrer physikalischen Charakterisierung. Bohrlochmessungen sind unabdingbar bei der Auffindung und Charakterisierung von diskreten Strukturen im Bohrloch, wie Kluftsystemen, Störungszonen und fluid- oder erzführenden Zonen. Im Bohrloch ermittelte Daten dienen zudem der Tiefenkorrelation von Bohrkernen und zum Füllen von Lücken in der Kernsequenz. Sie liefern auch für die Bohrtechnik wichtige Informationen zu Bohrlochgeometrie, Temperatur und Salinität der Bohrspülung und der Zementqualität. Spezielle Bohrlochverfahren ermöglichen die untertägige Beprobung des Bohrlochfluids und der Bohrlochwand. Da die Einsatzmöglichkeiten des Borehole Loggings so vielfältig sind (Tab. 1), muss für jedes Projekt ein auf die speziellen Bedingungen und Anforderungen optimiertes Bohrlochmessprogramm erarbeitet werden.

## ICDP Operational Support Group

Die Priorität von Bohrlochmessungen und deren Anteil an wissenschaftlichen Bohrprojekten ist abhängig von den primären Zielstellungen des Projekts und dem zur Verfügung stehenden Budget und daher sehr variabel. Um nationalen und internationalen Projekten einen Mindeststandard an Loggingdaten zu ermöglichen, stellt die Operational Support Group (OSG) einen Logging-Service zur Verfügung. Dem jeweiligen Projekt werden lediglich die Kosten für Transport, Reise, Sondenversicherung und Sondenwartung in Rechnung gestellt.



**Kontakt:** J. Kück  
(jochen.kueck@gfz-potsdam.de)

Tab. 1: Wissenschaftliche Zielstellungen (linke Spalte) und die dazu verwendeten Bohrlochmessverfahren (obere Zeile)  
 Tab. 1: Scientific targets vs. contributing logging methods

Bohrlochmessverfahren	SGR/GR	Density	Porosity	Sonic	Resistivity	Magnetik	Image Logs	TEMP	Kaliber/Orien.	Mud Resist.	Flow	Druck	Fluidproben	Dipmeter	Seismik	Gravimeter	Seitenkerne
Lithologie	x	x	x	x	x										x	x	x
Mineralogie	x	x			x	x	x										x
Alteration			x	x			x									x	x
Frac-Erkennung	x			x	x		x	x	x	x	x	x		x			
Poro/Perm			x	x	x					x							x
Strukturen				x	x		x		x					x	x		x
Fluidsysteme	x		x				x	x	x	x	x	x	x				
Spannungsfeld				x			x		x					x	x		
Gasdetektion		x	x		x			x									
Kern/Log-Korrelation	x	x	x	x	x	x	x							x			x
Klima	x					x	x							x			
Bohrtechnik				x				x	x	x		x		x			

**Weitere Informationen zum ICDP-Downhole Logging:**

**Service:**

<http://www.icdp-online.org/support/service/downhole-logging>

**Bohrlochgerätepark:**

<http://www.icdp-online.org/support/equipment/downhole-logging>

Die OSG betreibt einen an die häufigsten in ICDP-Projekten vorkommenden Bohrlochbedingungen angepassten Bohrlochgerätepark, finanziert von ICDP, dem GFZ und aus Drittmitteln. Die Slimhole-Sonden mit maximal 52 mm Durchmesser sind für sehr hohe maximale Temperatur- und Druckbedingungen von 150 °C/80 MPa oder mehr ausgelegt. Fast alle Sonden können zwecks Tiefenkorrelation kombiniert mit einer Sonde zur Messung der natürlichen Radioaktivität (GR-Sonde) gefahren werden. Zwei elektrisch betriebene Logging-Winden sind speziell für den Einsatz der Slimhole-Sonden ausgelegt und decken mit Kabellängen von 2000 m und 600 m den Großteil der ICDP-Bohrloch-tiefen ab. Zusätzlich stehen noch zwei schwere Oilfield-Logging-Winden mit Kabellängen von 3500 m und 4500 m zur Verfügung. Die gesamte Slimhole-Logging-Ausrüstung wiegt nur 400 bis 800 kg und kann auf sieben bis zwölf Transportboxen verteilt werden. Damit ist ein schneller und kostengünstiger Lufttransport auch in entlegene Gebiete möglich. Die OSG hat seit 1999 in mehr als 20 Projekten Bohrlochmessungen in 17 Ländern durchgeführt (Abb. 1).

**Beispiel: Elgygytynsee in Sibirien**

Typische Daten aus einem OSG-Logging-Einsatz bei der ICDP-Bohrung am Elgygytynsee in Sibirien sind in Abb. 2 dargestellt (Gebhard et al., 2013). Hier werden jeweils die Untertagesmessungen der Bohrlochwand (Logging) mit den an den Bohrkernen gewonnenen Daten (Core) verglichen. Dadurch können zum einen die Bohrkern der korrekten Tiefe zugeordnet werden und zum anderen die Daten aus den Kern- und Bohrlochwandmessungen abgeglichen werden. Der See entstand vor 3,6 Mio. Jahren durch einen Meteoriteneinschlag im heutigen Nordostsi-

birien, der einen Krater mit 18 km Durchmesser hinterließ. Hier lagerten sich kontinuierlich Sedimente ab, die ein einmaliges Klimaarchiv darstellen. Die Bohrung durchörterte die Sedimente und das darunter liegende Impaktgestein. Der Übergang von den lakustrinen Sedimenten zu den Impaktgesteinen des Grundgebirges zeigt sich deutlich in den Logs des elektrischen Widerstands (Resistivity) und Kalium (Potassium) aber auch bei den Charakteristika der magnetischen Suszeptibilität (MSUS). Bohrkern-daten sind die Dichte (Density) und die magnetische Suszeptibilität oberhalb 143 m (hellblau), alle anderen Kurven in Abb. 2 sind Bohrlochmessdaten. Eine Clusteranalyse der dargestellten Loggingdaten differenziert drei Einheiten (Cluster 1, 2, 3), wobei Cluster 1 das Grundgebirge darstellt. Bohrtechnische Probleme unterhalb etwa 150 m führten zu sehr lückenhaftem Kerngewinn, vgl. das Dichte-Log. Die kontinuierlichen Bohrlochdaten können diese Lücken füllen. Die aus der Analyse der natürlichen Radioaktivität abgeleiteten Logs Potassium, Uran und Thorium werden nicht vom Stahlrohr gestört. In den Sedimenten können die stark variierenden MSUS-Daten direkt als Klima-Proxiedaten verwendet werden und zeigen unterschiedliche Ablagerungs- und damit Klimabedingungen an. Zum Beispiel zeigt niedrige MSUS, dass Magnetit aufgelöst wurde und das Tiefenwasser aufgrund fehlender Durchmischung sauerstofffrei war; der See war dauerhaft zugefroren, d.h. das Klima war eiszeitlich kalt. Bei hoher MSUS muss Magnetit erhalten geblieben sein und ein sauerstoffreiches Tiefenwasser vorgeherrscht haben infolge Durchmischung des Sees; das Klima war wenigstens zeitweilig so mild, dass der See nicht dauerhaft zugefroren war, also eine Zwischeneiszeit herrschte. Dieses Beispiel zeigt, dass der Einsatz von GFZ-Bohrlochsonden einen wichtigen Beitrag bei der Auswertung von Forschungsdaten leisten kann.



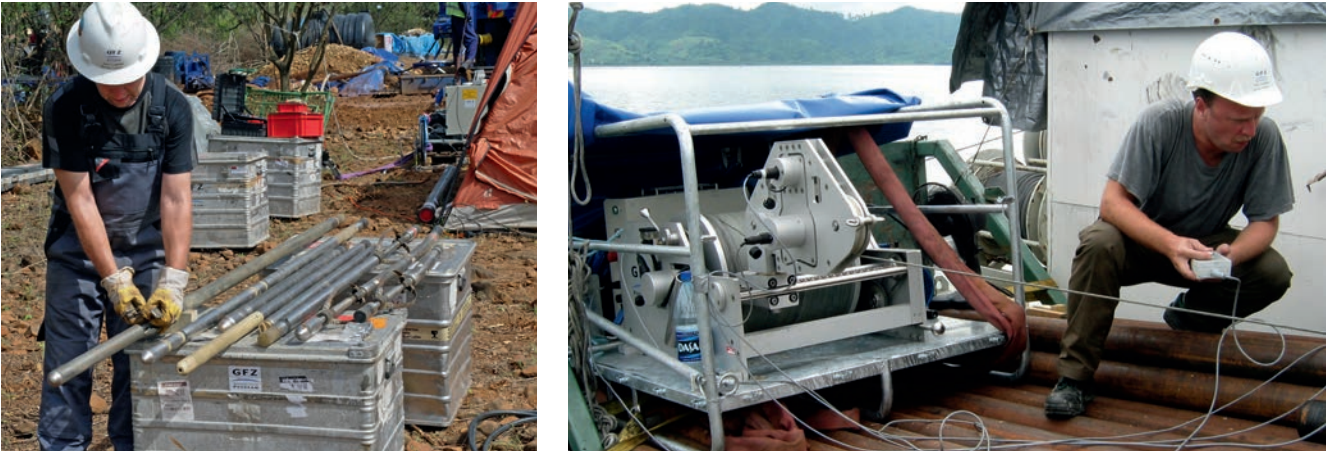


Abb. 1: OSG-Slimhole-Sonden (links) und Winde (rechts) bei Messeinsätzen in Afrika (Fotos: J. Kück, GFZ)

Fig. 1: OSG lightweight slimhole sondes (left) and winch (right) at logging campaigns in Africa

## Methoden- und Sondenentwicklung

Die Bohrlochinstrumente des GFZ müssen auch Anforderungen gerecht werden, die sich z. B. bei der Suche nach wasserführenden Klüften in geothermischen Explorationsbohrungen ergeben. Die GFZ-Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ entwickelt daher neue Methoden und Geräte für spezielle Einsätze. Für die Tests der Neuentwicklungen stehen dem GFZ zwei Testlokationen zur Verfügung, in denen die Meßsensorik getestet wird und die Druck- und Temperaturfestigkeit sowie der Betrieb am langen Messkabel bei rauher Fahrt im Bohrloch unter *In-situ*-Bedingungen nachgewiesen werden können.

Das KTB-Tiefenlabor des GFZ mit einer 4000 m und einer 9100 m tiefen Bohrung, ist eine weltweit einmalige Forschungsstätte für unterschiedlichste Experimente, Tests und Messungen unter *In-situ*-Bohrlochbedingungen (siehe Infografik auf Seite 10 in diesem Heft). Die einfache Zugänglichkeit der umfangreichen Infrastruktur ermöglichen tiefe und/oder lange Bohrlochexperimente zu geringen Kosten. Die Nutzung der Infrastruktur einschließlich der Bohrungen ist kostenlos für wissenschaftliche Forschungsprojekte, während für kommerzielle Nutzer, wie z. B. Servicefirmen und Sondenhersteller, Nutzungskosten abhängig von Dauer und Einfahrtiefe anfallen (<http://www.gfz-potsdam.de/scientific-services/labore/ktb-tiefenlabor>).

Das GFZ-Untertage-Labor „Reiche Zeche“ im gleichnamigen Forschungs- und Lehrbergwerk der TU Bergakademie Freiberg ermöglicht vor allem Tests von seismischen Instrumenten unter kontrollierten Bedingungen. Das Messfeld liegt in 150 m Tiefe in einem von drei Strecken umgebenen Gneisblock von rund 50 m Breite und 100 m Länge. Entlang der Strecken sind 30 Dreikomponenten-Geofonanker im Abstand von 5 bis 9 m in Bohrungen installiert. Zusammen mit zwei horizontalen 8 1/2“ Bohrungen (B1, B2) und einer 70 m tiefen, vertikalen 8 1/2“ Bohrung (B3) durch das Zentrum des Blocks, ermöglicht dies eine dreidimensionale Erfassung von Wellenfeldern (Abb. 3).

## Seismic Prediction While Drilling SPWD

Lagerstätten für Erdöl und Erdgas sowie Heißwasser zur Gewinnung geothermaler Energie findet sich häufig in geringmächtigen Schichten und Störungszonen. Deren Erkundung durch 2D- und 3D-Seismik von der Erdoberfläche aus stellt auf Grund der Dämpfung hoher Frequenzen und somit einer beschränkten Auflösung eine große Herausforderung dar. Eine deutliche Verbesserung der räumlichen Auflösung von Strukturen im Umfeld von Bohrungen soll im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Projekts „Seismic Prediction While Drilling“ (SPWD) erreicht werden. Die in diesem Projekt entwickelte Bohrlochsonde vereint seismische Quellen und Empfänger in einem Gerät. Daher ist die Entfernung zu den Reflektoren gegenüber anderen seismischen Bohrlochmessverfahren wie VSP (Vertical Seismic Profiling) und SWD (Seismic While Drilling) stark verringert und es können höhere Signalfrequenzen bis zu einigen Kilohertz für die Erkundung von Strukturen im Meterbereich eingesetzt werden. In der neuen SPWD-Sonde bilden vier leistungsstarke magnetostruktive Aktuatoren die seismische Vibrationsquelle (Abb. 4). Durch eine individuelle Steuerung der Aktuatoren kann eine Fokussierung der seismischen Energie durch Interferenz der Wellen in eine definierte Raumrichtung erfolgen. Dies erhöht die Erkundungsreichweite der Sonde und verbessert die Einseitigkeit der räumlichen Abbildung von Strukturen. Die SPWD-Bohrlochsonde ermöglicht somit einen optimalen seitlichen Blickwinkel auf steilstehende Störungen. Sie besteht aus einer Elektronikeinheit, zwei Empfängereinheiten mit jeweils einem Dreikomponenten-Geofon, zwei Spanneinheiten, einer Aktuatoreinheit und einer Hydraulikeinheit. Die Empfängereinheiten, die Quelle und die Spanneinheiten sind mit Stempeln ausgerüstet, die hydraulisch ausgefahren werden, um die Sonde an die Bohrlochwand anzukoppeln und zu zentrieren. Die SPWD-Bohrlochsonde ist rund 7,5 m lang, 750 kg schwer und hat einen Durchmesser von 1587 mm (6 1/4“). Sie wird am Loggingkabel eingesetzt.

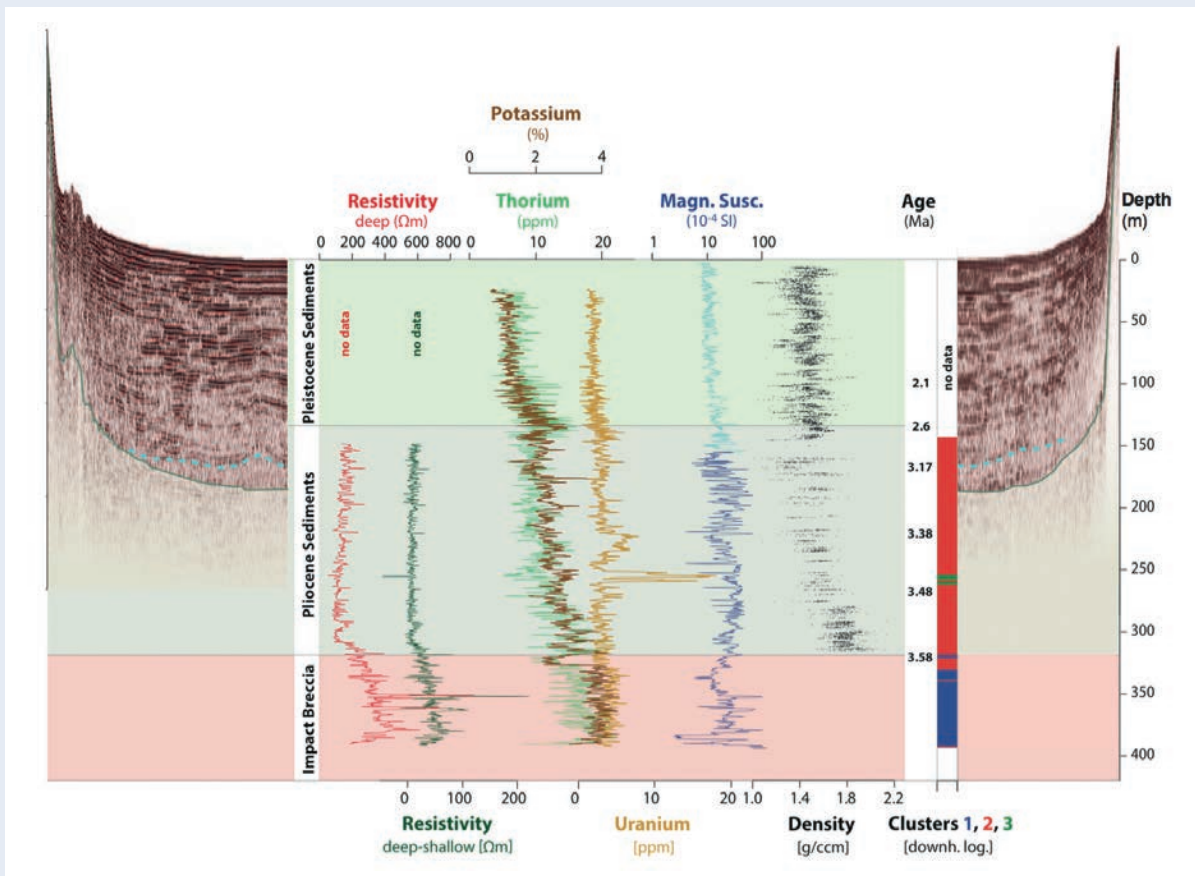


Abb. 2: Charakteristische Logging- und Kerndaten, dargestellt über dem reflexionsseismischen Profil aus dem ICDP-Bohrprojekt am Elgygytgynsee. Der Übergang von den lakustrinen Sedimenten zum impact-bezogenen Grundgebirge zeigt sich deutlich in den Logs des elektrischen Widerstands (Resistivity) und Kalium (Potassium) aber auch bei der Charakteristika der magnetischen Suszeptibilität (MSUS) (nach Gebhardt et al., 2013).

Fig. 2: Borehole and core data (ICDP site 5011-1) printed over the seismic reflection profile from the ICDP project Lake El'gygytgyn Drilling Project. The transition from lacustrine sediments to impact-related bedrock is evident in the resistivity and potassium logs and also in the characteristics change of the magnetic susceptibility log (MSUS). Core data: density and MSUS above 143 m (light blue curve), all other curves are from downhole logging (after Gebhardt et al., 2013).

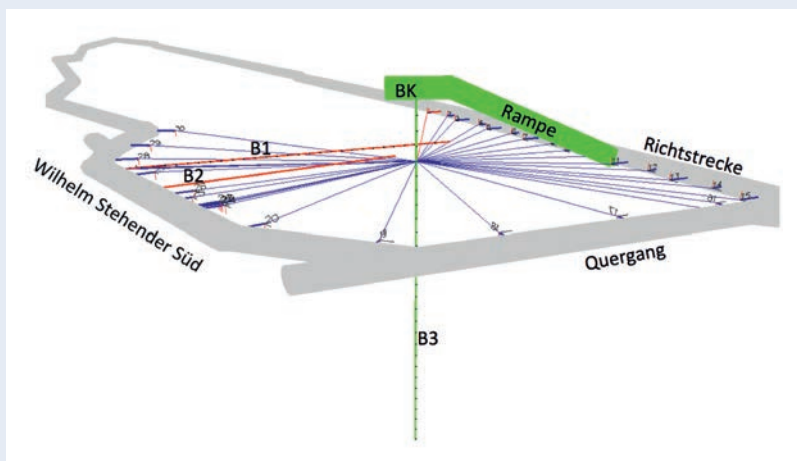


Abb. 3: Perspektivansicht des GFZ-Untertage-Labors in Freiberg. Die horizontalen Bohrungen B1 und B2 sind 30 m und 20 m lang. Für die 70 m tiefe vertikale Bohrung B3 wurde eine 40° geneigte Rampe und eine Bohrkammer (BK) 10 m über der Messebene aus dem Gestein gesprengt. Blau dargestellt sind die Verbindungslinien zwischen einem Anregungspunkt in B3 in 10 m Tiefe und den 30 Dreikomponenten-Geofonen entlang der Strecken.

Fig. 3: Perspective view of the GFZ-Underground-Lab in Freiberg. The horizontal boreholes B1 and B2 are 30 m and 20 m long. To drill a 70 m deep vertical borehole a 40 degree incline ("Rampe") and a chamber (BK) 10 m above the measurement plane were excavated by drilling and blasting. Blue lines mark the rays between a borehole source point at 10 m depth and the 30 3-component geophones.



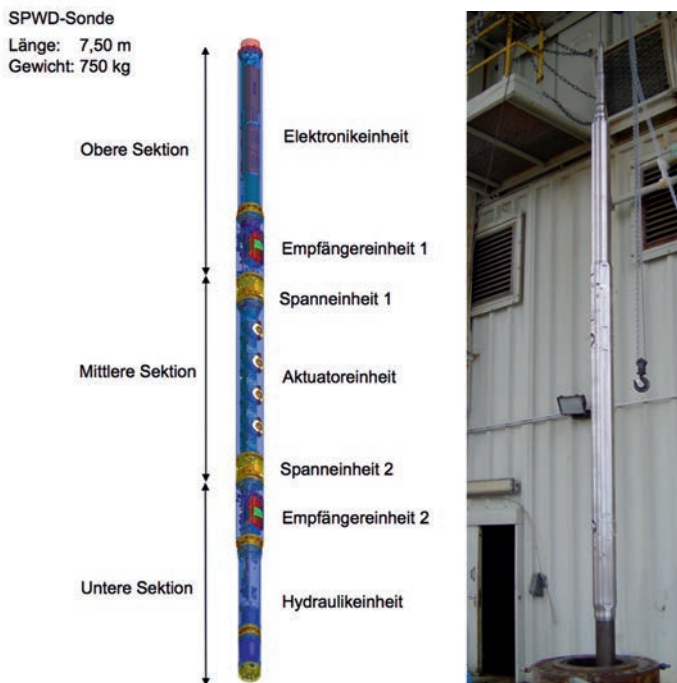


Abb. 4: Aufbau der SPWD-Bohrlochsonde. Links: Konstruktionszeichnung mit den Hauptfunktionseinheiten. Rechts: SPWD-Sonde freihängend über dem Bohrkopf der KTB-Hauptbohrung

Fig. 4: Configuration of the SPWD-prototype. Left: Technical drawing with the main units. Right: SPWD prototype hanging above the well head of the KTB main hole

Nach Umbau und Endmontage wurde die SPWD-Bohrlochsonde im Dezember 2013 mit ersten seismischen Testmessungen im GFZ-Untertage-Labor Reiche Zeche in der 70 m tiefen Vertikalbohrung B3 erfolgreich getestet (Abb. 5). Hier konnten die abgestrahlten Wellen der SPWD-Bohrlochsonde durch die im Untertage-Labor fest installierten Geofone dreidimensional erfasst werden. Die durchgeführten Tests dienten der Überprüfung der Sonderelektronik zur Steuerung der Vibratoren und Registrierung der Empfänger. Dazu wurden Messungen bei unterschiedlichen Anregungslängen und Frequenzen durchgeführt. Bei jeder Messung werden neben den Geofondaten auch die in den Stempeln der Vibratoren integrierten piezoelektrischen Sensoren und das berechnete Pilotsignal zur Steuerung der Quellen aufgezeichnet.

In 2014 werden Messungen zur Kalibrierung der SPWD-Bohrlochsonde und zur Abbildung von bekannten Störungszonen und der Strecken im Bereich des Untertage-Labors durchgeführt. Für die Analyse der erzielten Wellenfokussierung werden die Daten der Geofonsensoren entlang der Strecken genutzt. Der Einfluss von lokalen Inhomogenitäten im Gneis auf die registrierten Amplituden wird mit Hilfe von Geschwindigkeits- und Dämpfungsmodellen aus Tomografmessungen korrigiert (Lüth et al., 2014). Nach der Erprobung und Kalibrierung im Untertage-Labor soll die Sonde in Bohrungen bis 2000 m Tiefe zur strukturellen Erkundung eingesetzt werden. In einem weiteren Entwicklungsschritt ist die Fertigung eines Logging-While-Drilling-Prototyps vorgesehen. Dazu werden die Komponenten des SPWD weiter miniaturisiert und in einen Bohrstang für die Erkundung direkt während des Bohrens eingesetzt.



Abb. 5: Blick in die Bohrkammer des GFZ-Untertage-Labors Reiche Zeche während des Einfahrens der SPWD-Sonde in die Bohrung B3 (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Fig. 5: View into the chamber while the SPWD-prototype is running into the borehole B3

## Literatur

- Gebhardt, A. C., Francke, A., Kück, J., Sauerbrey, M., Niessen, F., Wennrich, V., Melles, M. (2013): Petrophysical characterization of the lacustrine sediment succession drilled in Lake El'gygytgyn, Far East Russian Arctic. - *Climate of the Past*, 9, 4, 1933-1947. DOI: <http://doi.org/10.5194/cp-9-1933-2013>
- 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*, 9, 41-43. DOI: <http://doi.org/10.2204/iodp.sd.9.07.2010>
- Lueth, S., Bohlen, T., Giese, R., Heider, S., Hock, S., Jetschny, S., Polom, U., Wadas, S., Reclin, A. (2014): Seismic Tomography and Monitoring in Underground Structures: Developments in the Freiberg Reiche Zeche Underground Lab (Freiberg, Germany) and Their Application in Underground Construction (SOUND) - In: Weber, M., Münch, U. (Eds.), *Tomography of the Earth's Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring: Advanced Technologies in Earth Sciences*, Cham: Springer International Publishing, 115-133. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-319-04205-3\\_7](http://doi.org/10.1007/978-3-319-04205-3_7)
- Melles, M., Brigham Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - *Science*, 337, 6092, 315-320. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1222135>