

## **Projekt (S)PWD – (Seismic) Prediction While Drilling: Entwicklung eines Systems für die hochauflösende seismische Vorauserkundung in Bohrungen**

**Katrin Jaksch<sup>1</sup>, Rüdiger Giese<sup>1</sup>, Matthias Kopf<sup>1</sup>, Horst Kreuter<sup>2</sup>, Matthias Reich<sup>3</sup>, Michael Sohmer<sup>3,4</sup> und Axel Wenke<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ; <sup>2</sup>GeoThermal Engineering GmbH, Karlsruhe; <sup>3</sup>TU Bergakademie Freiberg; <sup>4</sup>Herrenknecht Vertical GmbH, Schwanau

**Keywords:** Geothermiebohrung, Seismik, SWD – Seismic While Drilling, Vorauserkundung

### **Zusammenfassung**

Für den zukünftigen Energiemarkt werden umweltschonende und regenerative Verfahren zur Strom- und Wärmergewinnung immer wichtiger. Die Tiefe Geothermie kann dabei einen entscheidenden Beitrag leisten. Der wirtschaftliche Erfolg von Projekten der Tiefen Geothermie ist jedoch entscheidend von der Erschließung tiefliegender geothermischer Reservoirs abhängig. Limitierende Faktoren sind u.a. neben der aus dem Wärmespeicher erzielbaren Förderrate auch die Investitionskosten. Verbesserte Explorations- und Bohrverfahren können somit einen Beitrag in puncto Fündigkeit und Minimierung von Entwicklungskosten leisten. Bei den im Vorfeld der Erschließung von tiefliegenden geothermischen Reservoirs durchgeführten Explorationsverfahren können teils erhebliche Diskrepanzen zwischen den erwarteten und den tatsächlich erbohrten geologischen Verhältnissen mit zunehmender Tiefe auftreten. Auch mit Einsatz moderner seismischer Erkundungssysteme von der Oberfläche liegt die vertikale Tiefenauflösung nur zwischen 30 und 60 Metern.

Geophysikalische Erkundungsverfahren spielen auch während der Bohrphase ebenfalls eine zunehmend größere Rolle. Neben den insbesondere in der Erdöl- und Erdgaserkundung eingesetzten SWD- (Seismic While Drilling) und VSP- (Vertical Seismic Profile) Verfahren geht der Fokus derzeit auch hin zu seismischen Bohrlocherkundungsverfahren. Ziel des vorgestellten und vom BMU geförderten Forschungsprojektes (S)PWD ist die Verwirklichung eines seismischen Vorauserkundungssystems in Bohrungen, das in der Lage ist, Strukturen in Bohrrichtung aufzulösen. Ein solches System ermöglicht es, während des Bohrens den Bohrverlauf an die tatsächliche Geologie anzupassen und höfliche Störungszonen auch bevor diese erbohrt wurden gezielt anzusteuern. Dazu soll im Bohrstrang an einem dem Bohrmeißel nächstmöglichen Punkt ein Modul integriert werden, welches sowohl die seismischen Quellen als auch die Empfänger beinhaltet. Bei der Entwicklung des (S)PWD-Moduls müssen Aspekte wie die Energieversorgung zur Signalerzeugung, die Datenübertragung nach über Tage, sowie ein strömungsgünstiges Design, welches die Bohrspülung ungehindert passieren lässt, berücksichtigt werden.

Als ein Schritt auf dem Weg zu einem (S)PWD-Modul wurde ein erster Laborprototyp am GFZ entwickelt. Dieser wird derzeit im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg in zwei horizontalen Bohrlöchern getestet. Dabei wird sowohl das seismische Wellenfeld im Bohrloch als auch im umgebenden Gestein aufgezeichnet. Die Dimension des Messgebietes von circa 40 mal 80 Metern erlaubt die Ausbreitung des erzeugten Wellenfeldes in einem Größenverhältnis von 1:1 im Vergleich zur späteren Anwendung in vertikalen Bohrungen.

Für die Signalerzeugung werden im Bohrloch simultan gesteuerte Aktuatoren verwendet, die Vibrationen im Frequenzbereich von 500 bis 5000 Hz erzeugen. Erste Ergebnisse der seismischen

Messungen zeigen eine sehr gute Qualität des aufgezeichneten seismischen Wellenfeldes. Im direkten Wellenfeld sind deutlich Kompressionswelle (P-) und zwei Scherwellen ( $S_V$ ,  $S_H$ ) zu erkennen, die auf ein durch Anisotropie des Freiburger Gneises hervorgerufenen Scherwellensplitting hinweisen. Um den Laborprototypen auf die vorausschauende Erkundung von Strukturen anzupassen, soll Lage und Orientierung der der Bohrung gegenüberliegenden Strecke im Messgebiet erfasst werden. Die Seismogramme der Geophone des Laborprototypen zeigen Reflexionen von der in Bohrlochrichtung liegenden Strecke, auch die Rückseite des Streckenquerschnitts ist zu erkennen. Derzeitige Messungen untersuchen die Fokussierung des seismischen Wellenfeldes in Bohrlochrichtung. Über die im Messgebiet verteilten Geophonanker kann das angeregte seismische Wellenfeld und damit die Abstrahlcharakteristik der seismischen Quelle des Laborprototypen untersucht werden. Erste Messungen zeigen, dass bei seismischen Anregungen mit schmalbandigen Frequenzbereichen eine Fokussierungswirkung erreicht werden kann.

## 1. Einleitung

Die Nutzung von geothermalen Systemen zur Energiegewinnung und Wärmeversorgung hat in Deutschland in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Das größte Problem bei der Nutzung der Tiefen Geothermie sind jedoch neben der Fündigkeit der Bohrungen auch die hohen Investitionskosten zur Erschließung des zu nutzenden geothermalen Systems. Abhängig von der nötigen Bohrtiefe und der Art des geothermischen Reservoirs müssen bei einem solchen Projekt derzeit oft zweistellige Millionenbeträge investiert werden, bevor bekannt ist, ob die Thermalwasserbohrung ein Erfolg war. Die kostenintensiven Posten bilden dabei neben der vorangehenden Exploration und den anschließenden Fördertests zur Bestimmung der Förderkapazitäten hauptsächlich die Bohrarbeiten. Nicht zu vergessen sind eventuell Kosten zur Ertüchtigung und Erschließung des geothermischen Reservoirs, die teils eine geplante Wirtschaftlichkeit in Frage stellen können.

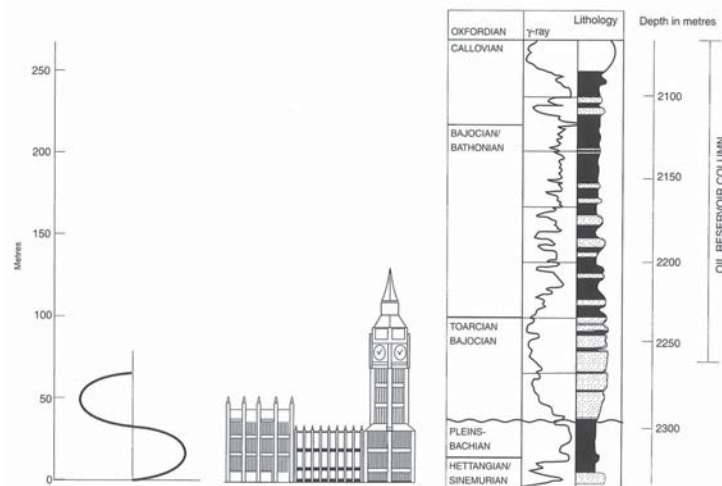


Abb. 1: Die verschiedenen Größen von seismischer Wellenlänge bei einer seismischen Exploration im Vergleich mit der Stratigraphie zeigt die Grenzen der Seismik bei der Auflösung von Zielhorizonten auf (aus Emery, Myers, 1996).

Die Nutzung der Tiefen Geothermie beschränkt sich in Deutschland derzeit auf die Geothermieregionen Molassebecken in Süddeutschland, das Norddeutsche Becken und den Oberrheingraben. Durch Erkundungen und Bohrungen für die Erdöl- und Erdgasindustrie in den zurückliegenden Jahrzehnten sind die Geothermieregionen in Deutschland weitgehend in ihrem Aufbau der geologischen Schichten bekannt. Bei Vorerkundungen im Rahmen der jüngeren

Geothermie-Projekte können diese Erkenntnisse bei der Standortsuche berücksichtigt werden. Vor Beginn einer Bohrung zur Nutzung der Tiefen Geothermie steht die Bohrplanung, die auf den gewonnenen geologischen Informationen und durchgeführten geophysikalischen Explorationen basiert. Im Gegensatz zu früheren Explorationen mittels 2D-Seismik, werden heutzutage 3D-seismische Erkundungen eingesetzt, die ein räumliches Bild der zu nutzenden Horizonte liefern können.

Trotz ausgiebiger Erkundungen können die erbohrten geologischen Schichten von den vorher erkundeten Zielhorizonten stark abweichen. Abweichungen bei den Messungen, unpräzise Zeit-Tiefen-Modelle und vertikale Auflösungen 3D-seismischer Erkundungen im Bereich von mehreren Dekametern können zu größeren Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlich vorhandenen geologischen Verhältnissen führen. Die potentiellen Zielhorizonte können verfehlt bzw. im Laufe der seismischen Auswertung nicht erkannt werden (siehe Abb. 1). Bei Geothermieprojekten im Molassebecken und im Oberrheingraben werden meist Störungssysteme aufgefahren, welche im Vorfeld nur unzureichend seismisch erfasst werden können. Im Norddeutschen Becken wiederum weisen Aquifere mit hohen Durchlässigkeiten häufig nur Schichtmächtigkeiten von wenigen Dekametern auf. Der Einsatz eines Instrumentes, welches die Geologie vor dem Bohrkopf während des Bohrens hochauflösend erfassen kann, ist sinnvoll, da hiermit der geplante Bohrverlauf an die tatsächliche Geologie angepasst werden und das Fündigkeitsrisiko minimiert werden könnte.

## 2. Stand der Technik

Zur Erkundung der geologischen Verhältnisse während des Abteufens von Bohrungen wurden verschiedene seismische Methoden entwickelt. Mit der Exploration von Erdöl- und Erdgasvorkommen sind basierend auf VSP - Vertical Seismic Profile gezielt Verfahren entwickelt worden, die während des Bohrens zum Einsatz kommen. Seit 1986 kommt SWD - Seismic While Drilling zur Verwendung. Als Weiterentwicklung von VSP wird seit 2000 VSP-WD - Vertical Seismic Profile While Drilling zur Erkundung verwendet (Neville et al., 2004). Die bisher entwickelten Systeme sind teils komplex und befinden sich noch nicht routinemäßig im Einsatz.

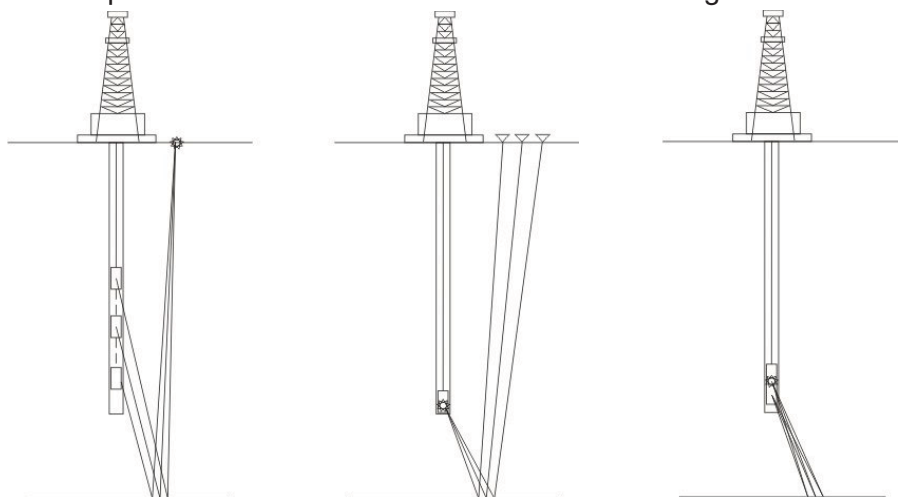


Abb. 2: Vergleich der verschiedenen Verfahren VSP, SWD, SPWD (v. l. n. r.)

Vereinfacht lassen sich die das Bohrloch in die Seismik integrierenden Methoden in zwei Gruppen einteilen: seismische Quelle im Bohrloch mit Empfängern über Tage oder seismische Quelle an der Oberfläche mit Installation von Empfängern im Bohrloch. Bei SWD erfolgt die Installation der Empfänger über Tage, die Vibrationen des Bohrmeißels während des Bohrens dienen als Quellsignal

(siehe Abb. 2). Die Qualität der seismischen Signale wird nicht nur vom Bohrmeißeltyp und von der Festigkeit des Gesteins, sondern auch von Distanz zwischen Signalgeber und Empfänger beeinflusst. Selbst bei besten Voraussetzungen wie harten Gesteinsformationen oder guten Bohrbedingungen kann es zu ungenügenden Ergebnissen kommen. Die Signalfrequenzen liegen unter 100 Hz und erlauben eine Tiefenauflösung, die im Bereich der Oberflächenseismik liegt.

Üblicher sind die Verfahren, bei denen die seismischen Impulse an der Oberfläche mit Signalgebern, wie Vibratoren, Schallkanonen oder Sprengladungen, erzeugt werden. Bei einer Integration in den Bohrstrang werden die Signale von der Bottom Hole Assembly (BHA) aufgezeichnet. Die Messungen werden in den Bohrpausen (zum Beispiel beim Nachsetzen von Gestänge) durchgeführt und untertage auf einer Speichereinheit in der BHA festgehalten. Aufgrund der großen Datenmengen können die Daten mit den heutigen technischen Möglichkeiten nicht in Echtzeit nach über Tage übertragen werden. Das Tiefenauflösungsvermögen liegt im Bereich von 20 bis 40 m, da im Gegensatz zur 3D-Seismik die seismischen Quellen den Laufweg Oberfläche Reflektor nur einmal zurücklegen.

### 3. (S)PWD – Seismic Prediction While Drilling

Ziel des (S)PWD-Projektes ist die Entwicklung eines neuartigen seismischen Erkundungssystems, das seismische Quellen und Empfänger im Bohrstrang integriert und eine hochauflösende Erkundung unterhalb des schon erbohrten Bereiches also in Bohrrichtung erlaubt. Dies soll durch eine Einbindung in die Bottom Hole Assembly (BHA) in Bohrmeißelnähe erreicht werden. Ein Vorteil gegenüber den anderen seismischen Bohrlochverfahren sind die deutlich kürzeren Laufwege der Schallwellen. Mit der Verwendung vergleichsweise hochfrequenterer Quellen soll das System Strukturen bis in den Meterbereich auf Entfernungen von 50 bis 100 Meter vor dem Bohrmeißel sicher erkennen. Zu diesem Zweck wurde ein Laborprototyp entwickelt, der seit dem Frühjahr 2009 im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg getestet wird.

#### 3.1 Untertagelabor im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“

Im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg nutzt das GFZ seit über 10 Jahren die Möglichkeit, seismische Quellen- und Empfängersysteme zu testen, wie auch zur Entwicklung des seismischen Vorauserkundungssystem ISIS im Tunnelvortrieb (Giese et al., 2007).

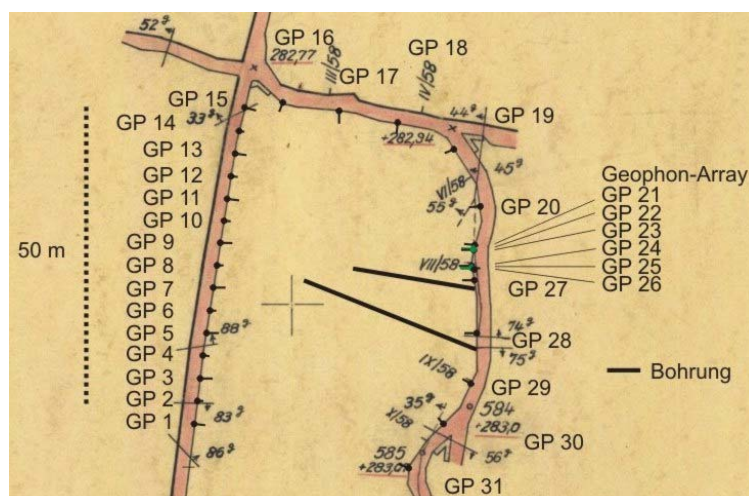


Abb. 3: Messlokation des GFZ im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg, (nach Koop, 1962)

Das Untertagelabor des GFZ umfasst einen Gebirgsblock von circa 40 m Breite und mehr als 100 m Länge (siehe Abb. 3). Das GFZ-Untertagelabor ist entlang der den Gebirgsblock umgebenden Strecken mit 31 3-Komponenten-Geophonankern zur Registrierung des seismischen Wellenfeldes ausgestattet. Die Anker sind ein bis zwei Meter tief im Gestein verklebt.



Abb. 4: Die bei den Bohrungen gewonnenen Bohrkerne des 20 Meter langen Bohrlochs weisen eine kompakte und homogene Struktur auf.

Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes (S)PWD wurde das Untertagelabor vom GFZ erweitert. Zwei horizontale Bohrungen mit einem Durchmesser von 8½" und Längen von 20 und 30 m wurden erstellt. Die Bohrungen wurden nach dem wahrscheinlichsten Reflektor, der gegenüberliegenden Strecke ausgerichtet. Dabei kam ein Bohrverfahren zur Auswahl, welches den Gewinn von Bohrkernen zulässt, um zusätzliche Aussagen zur Geologie entlang des Bohrlochs zu erhalten.



Abb. 5: Links eine der umliegenden Strecken des GFZ-Untertagelabors mit den Kammern an den Bohrlochpositionen (Foto: Grund). Die Hohlräume der Strecken bilden einen deutlichen seismischen Kontrast zum anstehenden Gestein. Das untere Bild zeigt einen Blick in eins der beiden Bohrlöcher.



Das anstehende Gestein am Untertagelabor ist der Freiburger Graugneis (Bayer, 1999), welcher in seinen Ausprägungen vor Ort nur geringe Varietäten aufweist. Es gibt ausgeprägte Störungssysteme, die die Freiburger Geologie prägen. Zwei im Bereich des Untertagelabors durchlaufende Störungen mit Kluftweiten von mehreren Zentimetern bis Dezimetern, können für die Bohrlochseismik mögliche Reflektoren darstellen. Diese Störungen sind mit quarzitisch-spatigen Gängen oder mit tonigem Material verfüllt und weisen stellenweise Wasserwegsamkeiten mit geringen Wasseraustritten auf.

### 3.2 Der Laborprototyp

Abgestimmt auf den Durchmesser der Bohrlöcher wurde am GFZ ein Laborprototyp (siehe Abb. 6) entwickelt und gebaut. Dieser beinhaltet vier Aktuatoren zur seismischen Signalerzeugung. Die Anordnung der Aktuatoren ermöglicht die Verwendung als kaskadierende Quelle im Bohrloch. Des Weiteren sind zur Registrierung des seismischen Wellenfeldes im Bohrloch vier 3-Komponenten-Geophonköpfe integriert. Die beiden Geophonköpfe einer Geophonkomponente sind jeweils um 180° zueinander gedreht angeordnet. Die Aktuator- und Geophonkomponenten des Laborprototypen sind zueinander axial in 15°-Schritten verstellbar, um verschiedenste Anordnungen zu ermöglichen. Die seismischen Quellen und Geophonköpfe werden zur Messung radial an die Bohrlochwandung gepresst. Dabei zentriert sich der Laborprototyp im Bohrloch.

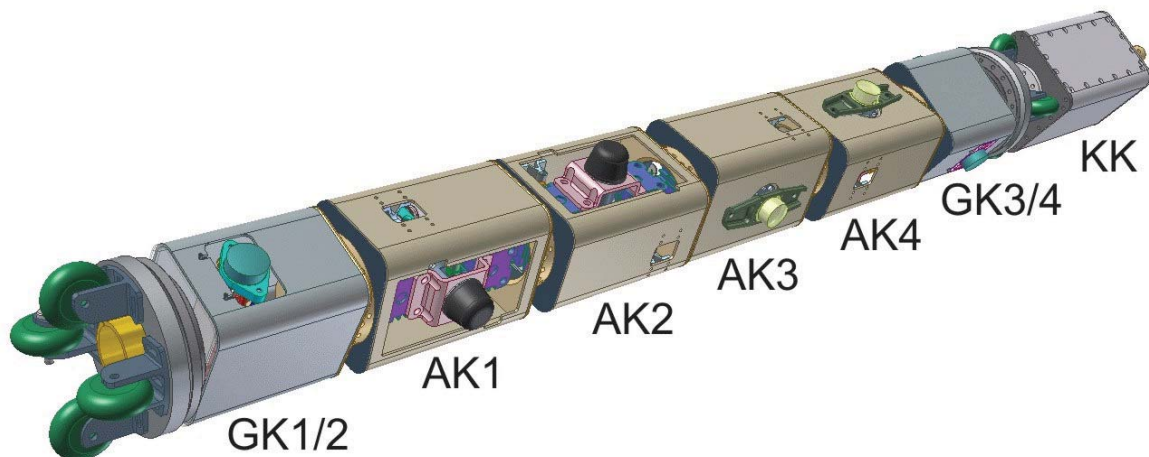


Abb. 6: Der am GFZ entwickelte Laborprototyp mit den einzelnen Baugruppen AK - Aktuatorkomponente, GK - Geophonkomponente und KK - Klemmkasten, (Bild: Jurczyk).

Im Klemmkasten ist ein Datenlogger integriert, dort befinden sich die Schnittstellen mit den externen Kabelzuführungen. Über ein Gestänge lässt sich der Laborprototyp im Bohrloch verfahren und positionieren. Alternativ kann auch ein Gripperantrieb zur Positionierung genutzt werden, was den Vorteil einer automatisierten Befahrung des Bohrlochs bietet. Der Datenlogger soll neben der Anregung der seismischen Signale auch die Aufzeichnung und Speicherung der Geophonspuren und auch die Datenübertragung nach außerhalb des Bohrlochs gewährleisten.

Zur Lagebestimmung in der Bohrung verfügt der Laborprototyp über einen Neigungssensor, einen Kompass und einen Entfernungsmesser. Eine Infrarot-Kamera am vorderen Ende des Laborprototypen ermöglicht eine optische Kontrolle der Bohrlochwandung. Bei beiden Bohrungen wurde mit der Infrarot-Kamera eine Bohrlochbefahrung aufgezeichnet, um die Beschaffenheit der Bohrlochwandung zu kontrollieren.

Die verwendeten seismischen Quellen nutzen die Magnetostriktivität zur Anregung seismischer Wellen. Das Quellsignal Sweep kann in seiner Amplitude und Frequenz variiert werden. Über Beschleunigungssensoren in den Aktuatorköpfen können die tatsächlich angeregten Quellsignale bestimmt werden. Umgesetzt wurde eine aufeinander abgestimmte Anregung der Quellsignale aller vier Aktuatoren. Dies erlaubt den Einsatz des Laborprototypen als kaskadierende Quelle.

### 3.3 Testmessungen mit dem Laborprototypen

Im Jahr 2009 wurde damit begonnen, verschiedene Testmessungen des am GFZ entwickelten Laborprototypen in den beiden Bohrlöchern im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ durchzuführen. Unterschiedliche Zielstellungen wurden bei den Messungen verfolgt. Zu Beginn stand ein Funktionstest der einzelnen Komponenten des Laborprototypen wie auch dessen Handhabung im Vordergrund. Aspekte wie eine Abstimmung der Parameter der anzuregenden Sweeps oder eine Maximierung des Energieeintrags wurden untersucht.

Seismische Bohrlochmessungen wurden an verschiedenen Positionen im Bohrloch durchgeführt. Ebenfalls wurden Messungen über die gesamte Bohrlochlänge mit äquidistanten Quellpunktabständen aufgenommen. Zur Untersuchung des angeregten Wellenfelds wurden die Geophone des Laborprototypen und das Geophonarray des Untertagelabors im Gebirgsblock aufgezeichnet. Zur Verbesserung des Signal/Noise-Verhältnisses wurde an den Quellpunkten mehrmals angeregt. Zur Bestimmung der bohrlochnahen Geschwindigkeiten wurde der Laborprototyp mit einem hochfrequenten Sweep bis 14 kHz ähnlich einem Soniclog im Bohrloch gefahren.

Untersucht wurde auch der Einfluss unterschiedlicher räumlicher Anordnungen der Quellen im Laborprototypen auf die Abstrahlcharakteristik der seismischen Wellen. Derzeit werden Tests hinsichtlich der Fokussierung des Wellenfelds durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen steht dabei die Fokussierung der seismischen Wellen in Richtung der Bohrlochachse.

### 3.4 Auswertung der Messungen

Die bei den Tests des Laborprototypen gewonnenen Daten werden hinsichtlich verschiedener Fragestellungen ausgewertet. Die Amplituden und Frequenzspektren der angeregten seismischen Wellen verändern sich entlang der Bohrlöcher in Abhängigkeit vom Klüftungsgrad des Gneises. Bereiche mit schlechterem Signal/Noise-Verhältnis konnten mit Hilfe eines optischen Bohrlochscans mit Zonen erhöhter Klüftigkeit korreliert werden. Die Daten der Bohrlochgeophone zeigen Reflexionen aus dem Vorfeld und dem rückwärtigen Bereich. Darunter sind auch Reflexionen der Strecken zu finden, die sich für die Kalibrierung des Laborprototypen eignen.

Die im Streckenumfeld gemessenen Seismogramme zeigen ein sehr gutes Signal/Noise-Verhältnis. Im direkten Wellenfeld sind deutlich Kompressions- (P-) und zwei Scherwellen ( $S_V$ -,  $S_H$ -) zu erkennen, die auf ein durch die Anisotropie des Freiburger Gneises hervorgerufenes Scherwellensplitting hinweisen. Erste Abschätzungen zeigen eine Anisotropie von circa 10 %. Die P-Wellengeschwindigkeiten liegen bei circa 5 km/s, die S-Wellengeschwindigkeiten bei 3,2 und 2,9 km/s.

Über die im Messgebiet verteilten Geophonanker kann das angeregte seismische Wellenfeld und damit die Abstrahlcharakteristik der seismischen Quellen des Laborprototypen untersucht werden. Erste Tests zur Fokussierung des Wellenfelds in Vortriebsrichtung wurden in schmalbandigen Bereichen von 20 Hz Breite für ausgewählte Frequenzen durchgeführt. Verstärkungen bzw. Abschwächungen in Vortriebsrichtung von bis zu 50 % im Vergleich zur Ausgangsamplitude

konnten erzielt werden. Diese Messungen dienen der Vorbereitung von Tests mit breitbandigen Sweeps wie sie in der vorausschauenden Erkundung eingesetzt werden sollen.

#### **4. Ausblick**

Ziel ist es, die Fokussierung der angeregten seismischen Wellen über die komplette Bandbreite im Frequenzbereich des Sweeps zu kontrollieren. Dazu müssen noch verschiedenste Testmessungen aber auch Anpassungen bei der Steuerung der anzuregenden Sweeps durchgeführt werden.

Die Auswertung der Datensätze der Testmessungen im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ beziehen sich auf die Interpretation und dem Verständnis des angeregten Wellenfelds. Welche Änderungen in der Quellpunktposition bewirken eine Verstärkung oder Abschwächung der einzelnen Wellenarten? Zudem soll eine Tomographie unter Berücksichtigung der Laufzeiten der Bohrlochgeophone gerechnet werden. In Hinsicht auf eine Anwendung im Bohrloch steht die Auswertung der Daten der Bohrlochgeophone. Ein entsprechendes Prozessing, welches die notwendigen Informationen über Aussagen von vorausschauenden Reflexionen oder Störungen liefert, soll mit Hilfe von ISIS (Integrated Seismic Imaging System) umgesetzt werden.

Basierend auf den Testmessungen und der Datenauswertung erfolgt die Weiterentwicklung des Laborprototypen zu einem bohrlochtauglichen Feldprototypen. Dieser Feldprototyp soll als kabelbasiertes Messsystem umgesetzt werden. Tests auf seine grundsätzliche Funktionalität werden in einem Bohrloch ohne richtbohrtechnische Anforderungen stattfinden. Veränderungen in der Anordnung der seismischen Bauelemente im Feldprototypen wie auch Anpassungen technischer Aspekte werden erforderlich sein. Besonders im Bereich von Geothermiebohrungen soll das (S)PWD-Werkzeug eine seismische Vorauserkundung ermöglichen und damit das Fündigkeitsrisiko von Bohrungen reduzieren helfen. Auf diese Weise könnte das unternehmerische Risiko eines Geothermieprojektes erheblich minimiert werden.

Das Projekt „(Seismic) Prediction While Drilling (S)PWD – Entwicklung einer Messeinrichtung zur vorausschauenden Erkundung beim Bohren“ wird gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327683.

#### **Literatur**

BAYER, M.: Die Himmelfahrt Fundgrube – Ein Führer durch das Lehr- und Besucherbergwerk der TU Bergakademie Freiberg, Rektor der TU Bergakademie Freiberg (Hrsg.), Druckspecht, (1999).

EMERY, D., MYERS, K. J.: Sequence Stratigraphy, Blackwell Science Ltd., (1996).

GIESE, R., LÜTH, S., KRÜGER, K., MIELITZ, S., OTTO, P., BORM, G.: ISIS - Integrated Seismic Imaging System for geological Prediction ahead of Hard Rock Tunnels, *7th International Workshop on the Application of Geophysics to Rock Engineering*, Lisbon, (2007).

KOOP: Sohlengruppen-Grundriß, Blatt Freiberg 24/1, (1962).

NAVILLE Ch., SERBUTOVIEZ S., THROO A., VINCKE O., CECCONI F.: Seismic While Drilling (SWD) Techniques with Downhole Measurements, Introduced by IFP and its Partners in 1990-2000, *Oil & Gas Science and Technology, Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 59/4, (2004), 371-403.

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam  
kawi@gfz-potsdam.de