

**VSP-MESSUNGEN AN KTB-VORERKUNDUNGSBOHRUNGEN
IM MITTLEREN SCHWARZWALD**

H. Stümpel, M. Gräber

Zusammenfassung

In den Jahren 1985 und 1986 führte das Institut für Geophysik der Universität Kiel in Zusammenarbeit mit dem geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe an verschiedenen Lokationen im mittleren Schwarzwald (Raum Haslach) Geophonversenkmessungen durch. Hierzu standen mehrere Bohrungen zur Verfügung, die im Rahmen der Voruntersuchungen zum kontinentalen Tiefbohrprojekt abgeteuft waren.

Mit diesen Feldversuchen sollen Einflüsse von Kluft- und Störzonen auf die Ausbreitung von Kompressions- und Scherwellen im Festgestein untersucht werden. Ein besonderes Augenmerk wird auch auf Rohrwellen gelenkt, die z. T. mit sehr starken Amplituden beobachtet werden. Mit einer Analyse von Reflexionen, Konversionen und der Polarisation dieser Wellen sollen Lokation, Permeabilität und Ausrichtungen von Kluftsystemen bestimmt werden. Da eine abschließende Auswertung des gesamten Datenmaterials noch nicht vorliegt, werden hier exemplarisch die Seismogramme zweier typischer Bohrungen vorgestellt.

Einleitung

Für die Geophonversenkmessungen wurde ein 3-Komponenten-Bohrlochgeophon mit 10 Hz Eigenfrequenz benutzt. Die Vertikal- und die beiden Horizontalkomponenten sind jeweils senkrecht zueinander angeordnet. Eine horizontale Ausrichtung des Bohrlochgeophones war nicht möglich. Zur Messung eines Referenzsignals wurden zusätzlich 3 Komponenten eines zweiten Bohrlochgeophons mitregistriert, das in derselben Bohrung in konstanter Tiefe von 30 m angekoppelt war. Weitere Referenzspuren waren an der Erdoberfläche eingesetzt.

Als Signalquelle diente eine kombinierte Kompressions- und Scherwellenquelle, die auf einen Anhänger montiert ist. Die seismischen Impulse werden dabei durch den Aufschlag eines pneumatisch beschleunigten Kolbens erzeugt, der in einem vertikalen bzw. horizontalen Druckluftzylinder geführt wird. Bei der Anregung von Scherwellen wird die Energie über eine Bodenplatte, die fest mit den Aufschlagflächen verbunden ist, auf den Erdboden übertragen. Die Bodenplatte wird zur Verbesserung der Ankopplung über zwei Hydraulikzylinder mit dem Gewicht des Hängers belastet. Durch abwechselnd links- und rechtsseitige Schläge werden SH-Wellen unterschiedlicher Polarität erzeugt.

In der benutzten Registrierapparatur wird dieser Polaritätswechsel während des on-line Stapelprozesses berücksichtigt. Es wurden jeweils 9 Spuren mit einer Digitalisierungstakt von 4 kHz registriert. Der Spurabstand im Bohrloch betrug 2 m. Über dem gesamten Teufenbereich wurden einheitlich 4 Stapelschritte on-line aufaddiert. Die Verstärkungseinstellung erfolgte getrennt für jeden Kanal über eine digitale Amplitudenregelung mit einer Dynamik von 72 dB. Die Abrißzeiten jeder einzelnen Signalanregung konnten in der Registrierapparatur durch Korrelationsanalysen der Referenzspuren über den gesamten Meßzeitraum auf die erste Registrierung bezogen werden. Die gewählten Meßparameter sollten eine genaue Analyse der Laufzeiten, Amplituden und Teilchenbewegungen erlauben.

Während der späteren Datenaufbereitung erfolgte eine Bandpassfilterung (60-200 Hz). Für die Analyse von Reflexionen und Konversionen wurde das Wellenfeld in abwärts und aufwärts laufende Anteile mit einer Geschwindigkeitsfilterung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich zerlegt (Suprajihro und Greenhalgh, 1985).

Exemplarisch sollen die seismischen Daten der Bohrlokationen Moosengrund und Mühlenbach vorgestellt werden.

Bohrung Moosengrund

Die Bohrung Moosengrund durchteuft den Triberger Granit bis zur Endteufe von 265 m. Die Mächtigkeit der Schuttüberdeckung beträgt ca. 6 m. Aus Kernbohrungen sowie weiteren geologischen Untersuchungen wurde vom geologischen Landesamt Freiburg ein geologisches Profil der Bohrung erstellt (Jenkner, 1986). Der Granit ist auf der 265 m langen Kernstrecke fast ausschließlich grobkörnig ausgebildet und ist über den gesamten durchteuften Bereich stark geklüftet. Deutlich sind zusammenhängende Klüftpakete im Bereich von 50 - 100 m, bei 150 m sowie bei 200 m zu erkennen. Das Einfallen der Klüfte schwankt zwischen 10 und 80°.

Im Frühjahr 1985 führte das NLFB geophysikalische Bohrlochmessungen durch. Im Hinblick auf seismische Geophonversenkmessungen sind hier die Resultate von Sonic- und Kaliber-Log von besonderem Interesse.

Das Sonic-Log zeigt über den gesamten Teufenbereich eine mittlere P-Laufzeit von ca. 60 $\mu\text{s}/\text{ft}$, entsprechend 5100 m/s. Laufzeitänderungen ergeben sich, in Übereinstimmung mit dem geologischen Profil, im Bereich der Klüftpakete. Hier erhöht sich die Laufzeit auf ca. 70 $\mu\text{s}/\text{ft}$, was einer Geschwindigkeitserniedrigung auf 4300 m/s entspricht. Das Kaliber-Log weist markante Sprünge im Bohrungsdurchmesser bei 100 m, 194 m und 204 m auf (Jenkner, 1986).

Der Versuch, in der Bohrung Moosengrund eine VSP-Messung mit horizontal polarisierten Scherwellen durchzuführen, scheiterte. Die Absorption in der 6 m mächtigen anstehenden Schotterschicht und im oberflächennah sehr stark geklüfteten Granit ist so groß, daß mit der uns zur Verfügung stehenden Signalquelle nicht genügend Energie erzeugt werden konnte. Die Kompressionswellenanregung zeigte dagegen eine sehr gute Energieausbeute.

In Abb. 1 sind die drei Komponenten des VSP bei Anregung mit vertikalem Schlag dargestellt. Neben dem Ersteinsatz der P-Welle sind im hinteren Laufzeitbereich, besonders in der Vertikalkomponente (1a), weitere amplitudenstarke ab- und aufwärts laufende Wellenzüge zu beobachten. Wegen ihrer niedrigen Ausbreitungsgeschwindigkeit müssen diese Einsätze einer Rohrwelle zugeordnet werden. Am Bohrlochende erfährt sie zwangsläufig eine Reflexion mit 180° Phasendrehung. Weitere Reflexionen ohne Phasendrehung sind bei Teufen von ungefähr 100 m, 150 m, 190 m und 210 m zu beobachten.

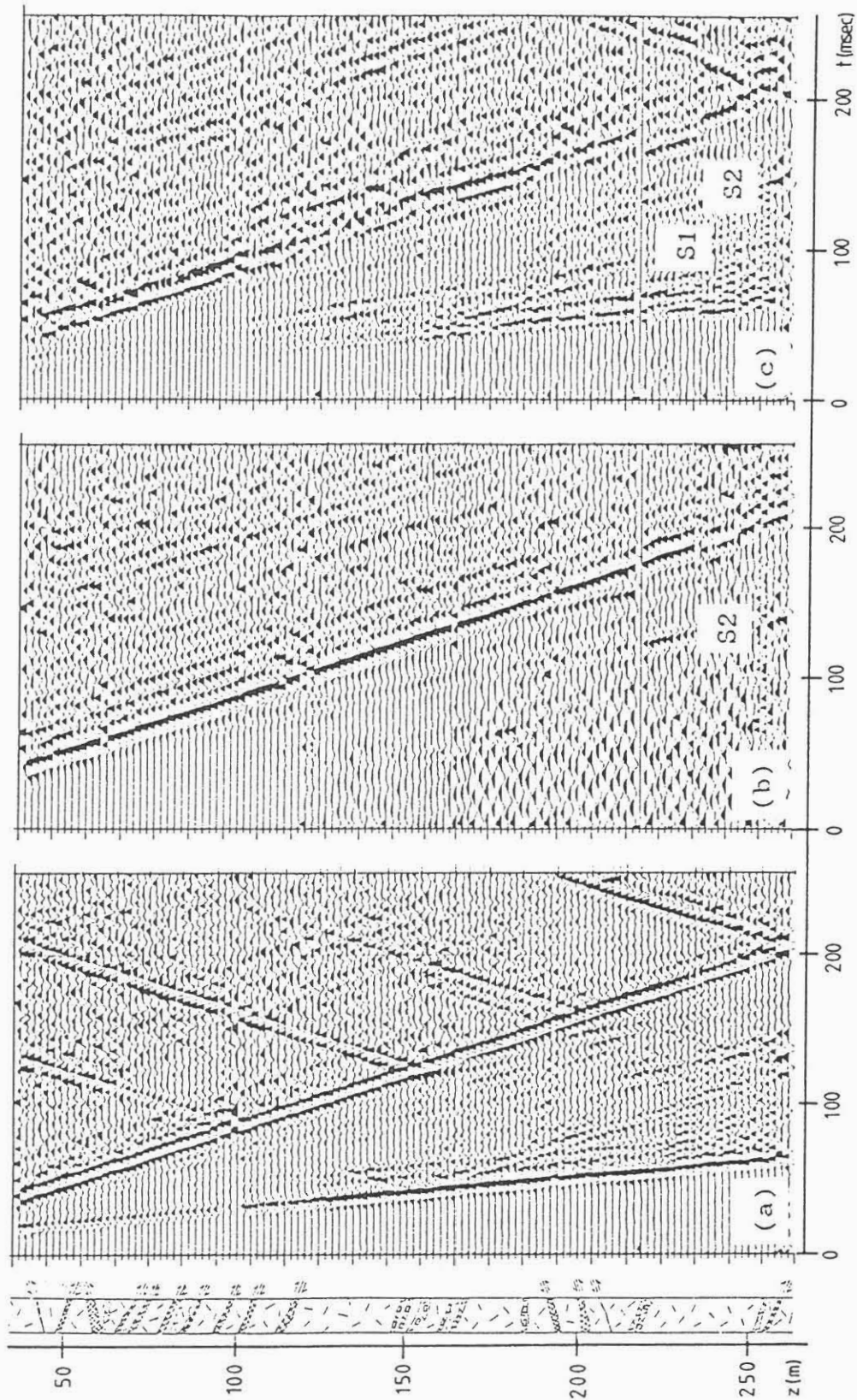


Abbildung 1
Geophonversenkmessung Moosengrund:
Vertikalanregung, amplitudengeregelte Darstellung,
S1 und S2 kennzeichnen Scherwelleneinsätze;
geologisches Profil (Granit) mit angedeuteten Störzonen.
a) Vertikalkomponente
b) 1. Horizontalkomponente
c) 2. Horizontalkomponente

Neben der Kompressions- und Rohrwellen ist auch der amplitudenschwache Einsatz einer Scherwelle zu beobachten, die sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1390 m/s ausbreitet. Auf der H₂-Komponente (Abb. 1c) sind zwei abwärts laufende S-Wellen (S₁ und S₂) zu erkennen, die ungefähr einen Laufzeitabstand von 20 ms aufweisen. Auf der Z- und H₁-Komponente (Abb. 1a, 1b) tritt dagegen nur der zweite Einsatz (S₂) deutlich hervor.

Zur weitergehenden Analyse der Wellenfelder sind verschiedene Frequenz-Wellenzahl-Filterungen angewandt worden. Abb. 2 zeigt das abwärts laufende Wellenfeld der drei Bohrlochkomponenten im Geschwindigkeitsbereich von 800 - ∞ m/sec. Dort ist auf allen drei Komponenten der Einsatz der Rohrwellen zu beobachten. Anhand der seismischen Geschwindigkeiten können auf Vertikal- und Horizontalkomponenten in 100 bzw. 150 m Tiefe Konversionen von Rohrwellen in Scherwellen identifiziert werden.

In einem weiteren Beispiel zeigt Abb. 3 die Z-Komponente für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche. Abb. 3a stellt den Datensatz mit dem Durchlaßbereich von 1800 - ∞ m/s dar. Hier sind nur die abwärts laufenden Kompressions- und Scherwelleneinsätze enthalten. Der mittlere Bildteil zeigt den Geschwindigkeitsbereich von 1800 - 3000 m/s. Besonders deutlich ist auch hier die bei 150 m entstandene Scherwelle zu erkennen. Im rechten Bildteil mit dem Durchlaßbereich von 800 - 1800 m/s, sind dagegen nur noch die abwärts laufenden Rohrwelleneinsätze herausgearbeitet.

Zur Identifikation von Wellentypen können neben der Laufzeitinterpretation zusätzlich Polarisationsuntersuchungen herangezogen werden. Nach einer Amplitudenkorrektur mit Hilfe der Referenzspuren wurden Hodographen der seismischen Einsätze für unterschiedliche Teufen berechnet. Die Hodographen der Kompressionswelle zeigen erwartungsgemäß lineare Polarisation in Z-Richtung. Die Hodographen der Scherwelle sind zwar durch das interferierende aufwärts laufende Wellenfeld gestört, zeigen aber tendenziell prograde elliptische Polarisation. Die Hauptamplituden befinden sich auf der H₁- und Z-Komponente.

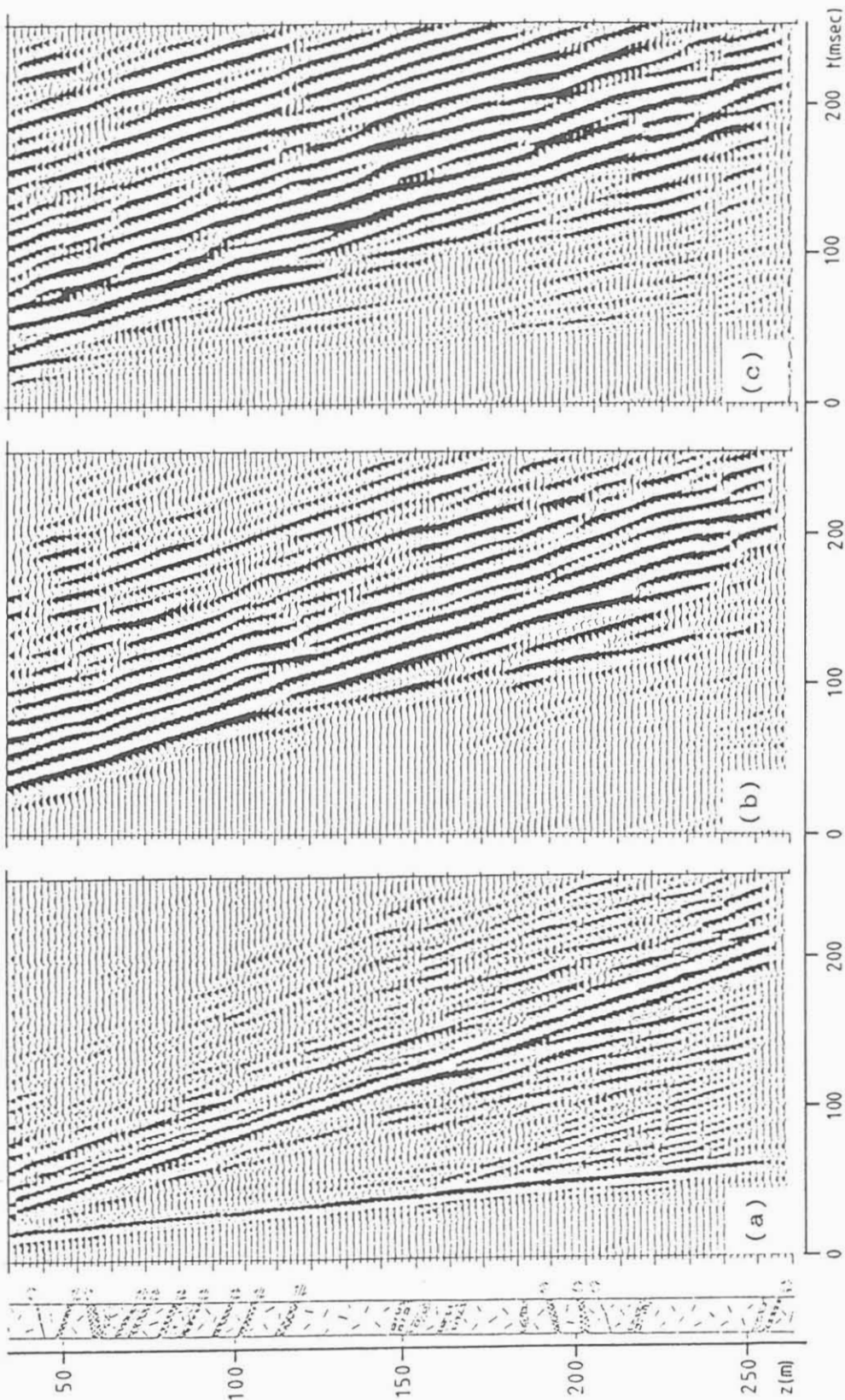


Abbildung 2
Geophonversenkungsmessung Moosengrund:
Vertikalanregung, amplitudengeregelte Darstellung;
geologisches Profil (Granit) mit angedeuteten Störzonen.
Die Sektionen sind im Durchlaßbereich von
800 - ∞ m/s gefiltert.
a) Vertikalkomponente
b) 1. Horizontalkomponente
c) 2. Horizontalkomponente

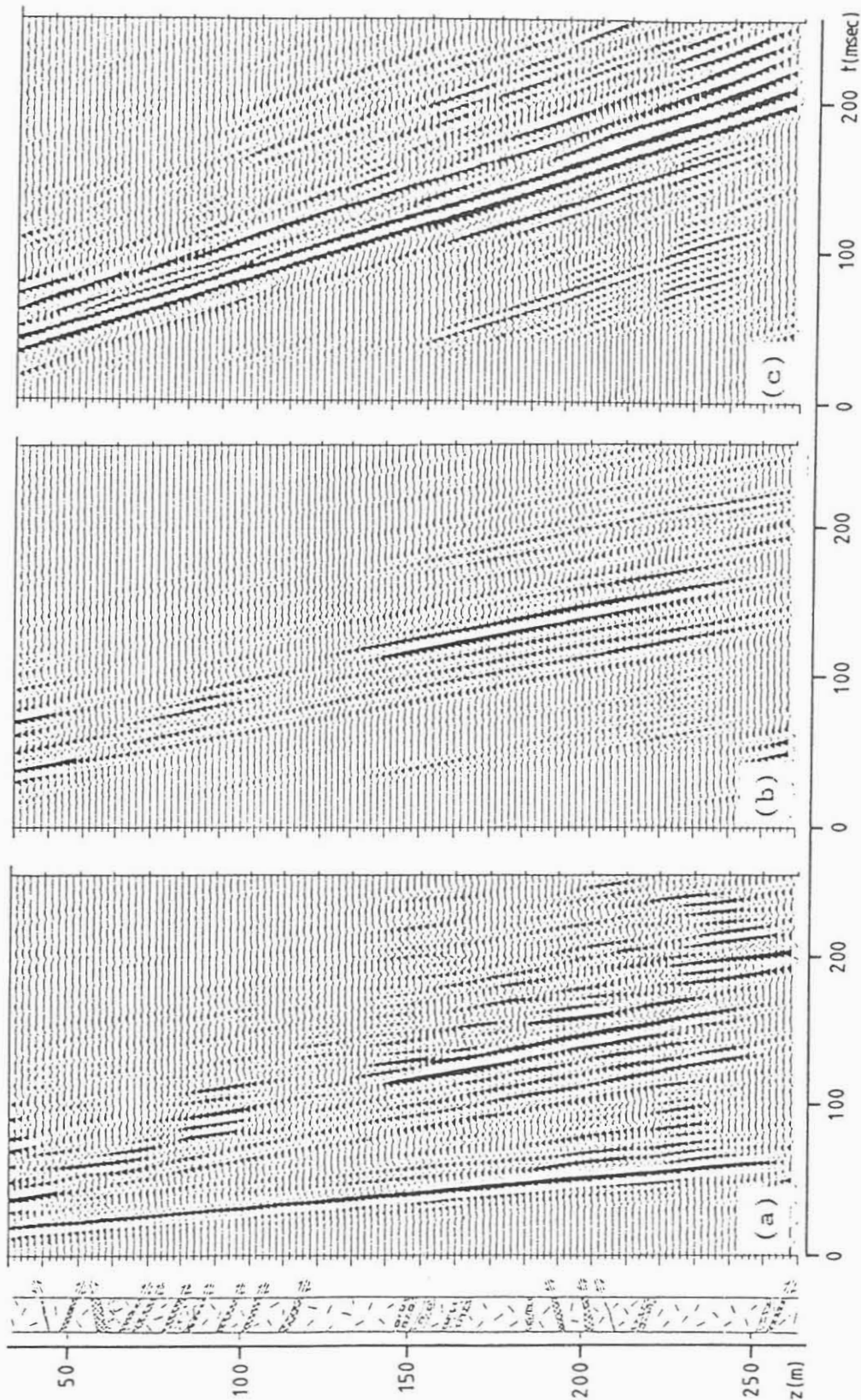


Abbildung 3
Geophonversenkungsmessung Moosengrund:
Vertikalanregung, amplitudengeregelte Darstellung;
geologisches Profil (Granit) mit angedeuteten Störzonen.
Die Vertikalkomponente ist in 3 Durchlaßbereichen
gefiltert dargestellt.
a) 1800 - ∞ m/s
b) 1800 - 3000 \bar{m}/s
c) 800 - 1800 m/s

In Abb. 4 sind einige Hodographen der abwärtslaufenden Rohrwelle dargestellt. Sie reagieren aufgrund ihrer großen Amplituden weniger stark auf Interferenzen mit dem aufwärts laufenden Wellenfeld. Die Rohrwelle schwingt im wesentlichen auf der H1- und Z-Komponente. Sie ist retrograd elliptisch polarisiert, und die Polarisationsellipse ist gegen die Vertikale geneigt. Die Lage der Ellipsenachse wandert mit zunehmender Tiefe gegen 90° . Diese Aufrichtung der Ellipsenachse kann durch eine Polarisation bei der Transmission der Rohrwelle durch Kluftsysteme erklärt werden (Lee, 1987).

Die Zahlenwerte an den Hodographen zeigen den Winkel der Ellipsen-Hauptachsen an. Die Drehrichtung ist durch Pfeile gekennzeichnet.

Bohrung Mühlenbach

Die Bohrung Mühlenbach durchteuft Gneise mit eingelagerten dünnen, brekziösen oder mylonitischen Störzonen. Der Bohrbefund zeigt, daß mit starken Neigungen der Kluftzonen gerechnet werden muß. (Jenkner, 1986) Im Gegensatz zur Bohrung Moosengrund konnten an der Bohrung Mühlenbach, wie auch in allen übrigen Bohrungen im Gneis, horizontal polarisierte Scherwellen mit genügender Energie angeregt und über den gesamten Teufenbereich registriert werden.

Abb. 5a zeigt die Z-Komponente bei Kompressionswellenanregung und in Abb.5b ist eine Horizontalkomponente der Scherwellenregistrierung geplottet. Das Wellenfeld ist hier wesentlich einfacher aufgebaut als in der Bohrung Moosengrund. Markante Zweiteinsätze und Konversionen fehlen. Lediglich im Kompressionswellenfeld (Abb.5a) sind noch einige Rohrwelleinsätze geringer Amplitude zu erkennen. Hier handelt es sich um die direkt am Bohrlochmund entstandene Rohrwelle (R1) sowie um eine Kompressions-Rohrwellen-Konversion (R2) aus ca. 50 m Tiefe.

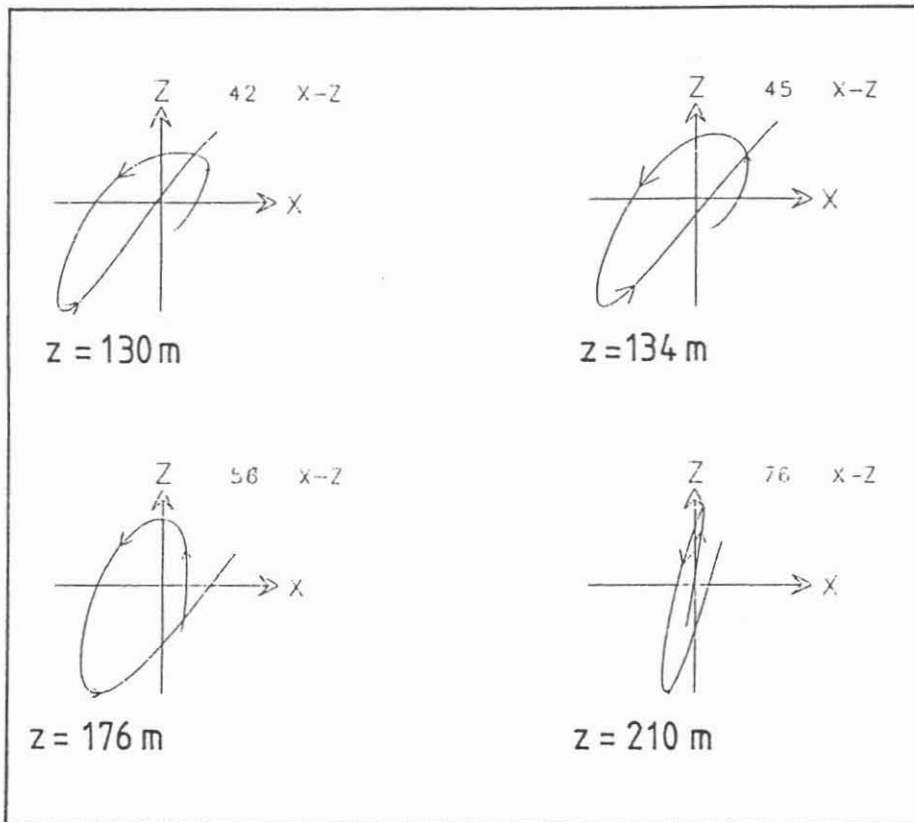


Abbildung 4
Geophonversenkmessung Moosengrund:
Vertikalanregung, Hodographen der Rohrwelle aus der
1. Horizontal- und der Vertikalkomponente (X/Z) für 4
Tiefen dargestellt. Die Zahlenangabe an den Hodographen
gibt die Lage der Ellipsenachse in Grad an.

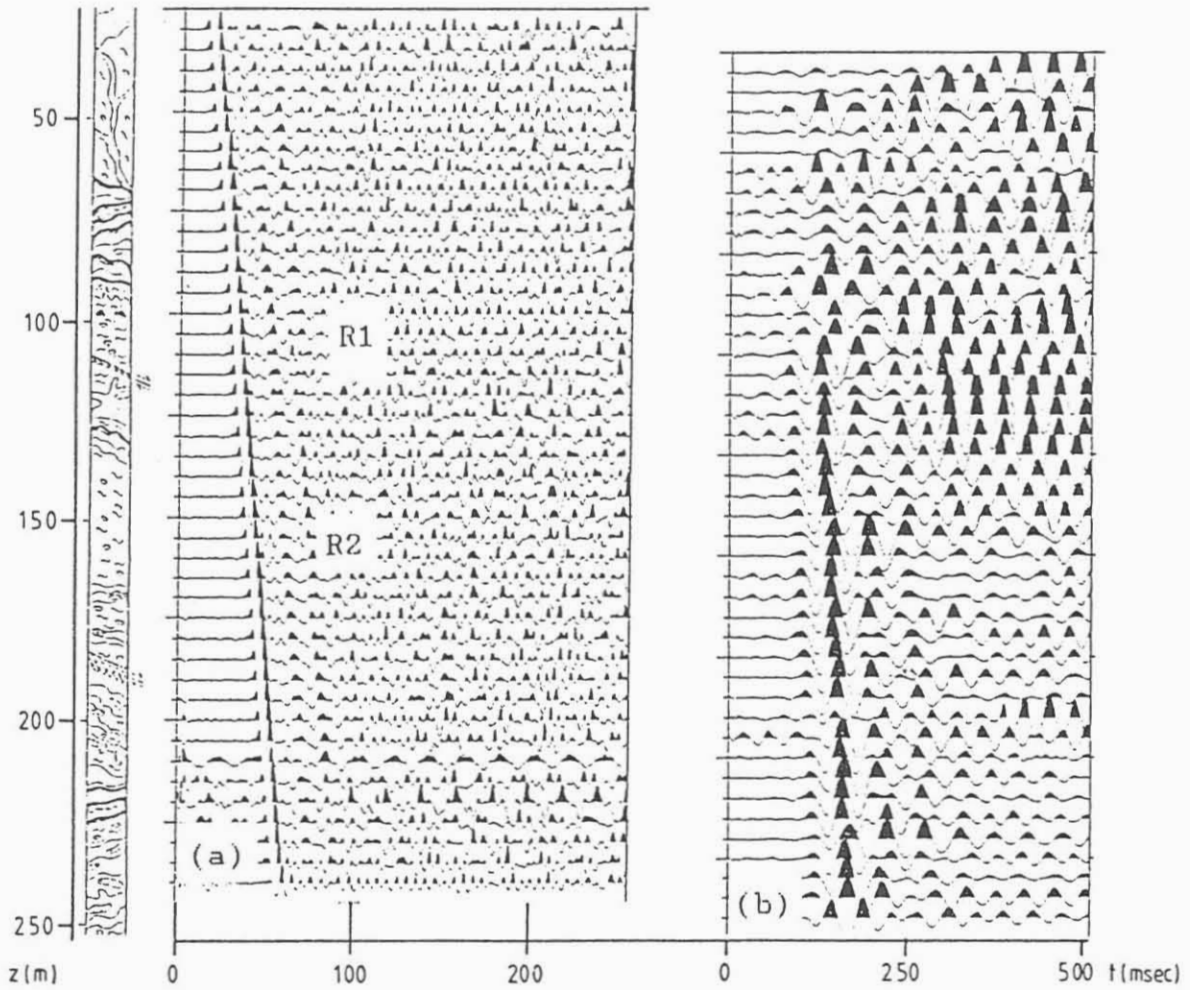


Abbildung 5
Geophonversenkmessung Mühlentbach:
amplitudengeregelte Darstellung,
geologisches Profil (Gneis) mit angedeuteten Störzonen
R1 und R2 kennzeichnen Rohwelleneinsätze geringer
Amplitude.
a) Vertikalkomponente, Vertikalanregung
b) Horizontalkomponente, Scherwellenanregung

Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die Geschwindigkeiten der verschiedenen seismischen Wellen in den Bohrungen Moosengrund und Mühlenbach zusammengestellt. Während die Geschwindigkeiten der Kompressions- und Rohrwelle in beiden Bohrungen annähernd gleiche Werte zeigen, tritt bei der Scherwelle mit fast 1.000 m/s ein deutlicher Unterschied auf. Hierbei ist zu beachten, daß in Mühlenbach eine horizontal polarisierte Scherwelle und in Moosengrund eine S_V -Welle beobachtet wurde. Die relativ starke Geschwindigkeitserniedrigung der S-Welle gegenüber der P-Welle ist im Triberger-Granit offenbar auf die starke Zerküftung zurückzuführen, die sich in der P-Welle nicht gleich deutlich ausprägt.

Lokation	V_P (m/s)	V_S (m/s)	V_{Rr} (m/s)	V_P/V_S
Moosengrund (Granit)	5.100	2.450 ¹	1.390	2,08
Mühlenbach (Gneis)	5.050	3.300 ²	1.375	1,53

Tabelle 1 : Zusammenstellung der seismischen Geschwindigkeiten:

V_P = Kompressionswelle

V_S = Scherwelle: (1) S_V -Welle (2) S_H -Welle

V_{Rr} = Rohrwelle

Eine Umrechnung von Rohr- in Scherwellengeschwindigkeiten bei Annahme einer konstanten Formationsdichte erfolgt häufig mit der Formel (1).

$$(1) \quad V_{Rr} = \frac{1}{(d_w(1/\mu + 1/k_w))^{1/2}} \quad (\text{White, 1965})$$

mit

V_{Rr} = Rohrwellengeschwindigkeit

d_w = Dichte der Flüssigkeit in der Bohrung (1 g/cm³)

k_w = $d_w V_w^2$ Kompressionsmodul der Bohrflüssigkeit

V_w = Geschwindigkeit in der Flüssigkeit (1500 m/s)

μ = $d_s V_m^2$ Schermodul der Formation

d = Dichte der Formation

Aus den gemessenen Geschwindigkeiten berechnet sich die Formationsdichte an der Bohrung Moosengrund zu $d = 2,3 \text{ g/cm}^3$. Der zu erwartende Wert für Granit liegt bei $2,6 \text{ g/cm}^3$. Eine Variation der Rohrwellengeschwindigkeit um $\pm 15 \text{ m/s}$ bedingt Änderungen der Formationsdichte um $\pm 0,4 \text{ g/cm}^3$. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß diese Methode empfindlich ist gegen Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeits- bzw. Dichtebestimmung. Aus der Bohrung Mühlenbach kann mit den gemessenen Geschwindigkeiten kein vergleichbar gutes Ergebnis gewonnen werden.

Rohrwelleneinsätze, bei VSP-Messungen im Sedimentgestein häufig noch als Noise betrachtet, zeigen in diesen Beispielen Möglichkeiten zur Kluftanalyse auf. Häufig beobachtete Phänomene sind Konversionen von Kompressions- in Rohrwellen, Reflexionen von Rohrwellen oder auch Konversionen von Rohr- in Scherwellen. Die Ursache hierfür kann in Dichteänderungen der Bohrflüssigkeit oder in Volumenänderungen des Bohrloches liegen. Da der erste Fall gewöhnlich ausgeschlossen werden kann, können die beobachteten Phänomene als Kluftindikator angesehen werden.

Neben der reinen Lokation von Klüften kann eine weitere Analyse der Polarisierung von Rohrwellen und ihrer Konversionen Aussagen über die Permeabilität und Ausrichtung von Kluftsystemen liefern. Da diese Arbeiten noch nicht abgeschlossen sind, können hierzu noch keine weiteren Ergebnisse vorgelegt werden.

Literatur:

- Hardage, B.A., 1981: An examination of tube wave noise in vertical seismic profiling data. Geophysics Vol. 46, p 892-903
- Jenkner, B., 1986: Geothermievorbohrungen im Mittleren Schwarzwald für das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. - Zwischenbericht 1984/85, Geologisches Landesamt - Württemberg, Freiburg i.Br.
- Lee, J.M., and Alexander, S.S., 1987: P, S, and Tube-waves Observed by Hydrophone VSP in the Kent Cliffs, N.Y. Test Borehole, Abstracts for the AGU Spring Meeting 1987, EOS 68, 351
- Suprajihro, M. and Greenhalg, S.A., 1985: Separation of upgoing and downgoing waves in vertical seismic profiling by continuous slice filtering. Geophysics Vol. 50, p 950-962
- White, J.E., 1965: Seismic waves.
McGraw-Hill Book Co., Inc.