

EIN SYSTEM VON SPANNUNGMESSUNGEN IN DEN KTB-BOHRUNGEN

K. Fuchs*, M. Zoback**, B. Clauß* und C. Barton**
(*Karlsruhe, **Standford)

Der Spannungszustand in der Erdkruste mit seinen Ursachen und Auswirkungen stellt eine der größten Herausforderungen der Geowissenschaften dar. Da krustale Spannungen, die zu Plattenbewegungen und Krusten-Deformationen in Beziehung stehen, bisher nur in verhältnismäßig seichten Tiefen gemessen worden sind, gibt es keine ausreichenden Schranken für quantitative theoretische Modelle krustaler Deformationen in Zeitskalen, die vom Erdbeben bis zum Kontinentaldrift reichen. Die Gewinnung und Interpretation dieser Daten in KTB-Bohrungen der Oberpfalz wäre ein bedeutsamer Schritt in Richtung auf das Verständnis dieser Prozesse.

Es wird ein System kontinuierlicher, zerstörungsfreier geophysikalischer Methoden vorgestellt, das die Möglichkeit schafft, das Spannungsfeld um die Tiefbohrung über einen großen Tiefenbereich und einen weiten Bereich von Zuständen der Bohrlochwand zu bestimmen. Dieses System hat gute Chancen, auch beim Vorstoß in die feindlichen Bedingungen der Mittelkruste, wie sie in supertiefen Bohrungen angetroffen werden, noch anwendbar zu sein.

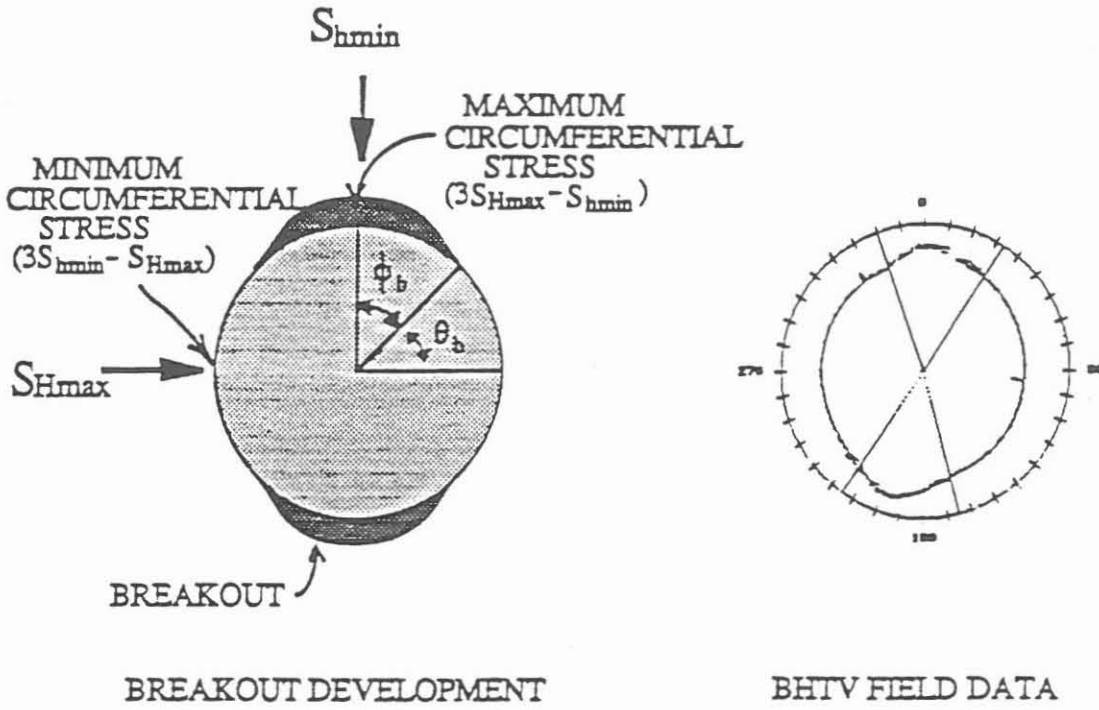
Folgende Eigenschaften des Bohrlochs und seiner näheren Umgebung werden beobachtet: (1) Bohrloch-Geometrie und ihre Verformungen (elastisch und nicht-elastisch); (2) Natur der Brüche und Risse (Bohrloch induzierte, präexistente); (3) elastische Bohrlochschwingungen.

Dabei kommen die folgenden Meßgeräte und -methoden zur Anwendung: - Akustischer Televiwer; - 4-Arm-Caliper Tool; - Formation Micro Scanner; - Dual Laterolog; - 3-Komponenten Vertical Seismic Profiling (VSP); - Akustische Logs (Circumferential tool).

Folgende Aussagen oder Abschätzungen über das Spannungsfeld und seine Auswirkung auf das Umfeld der Bohrung werden erwartet:

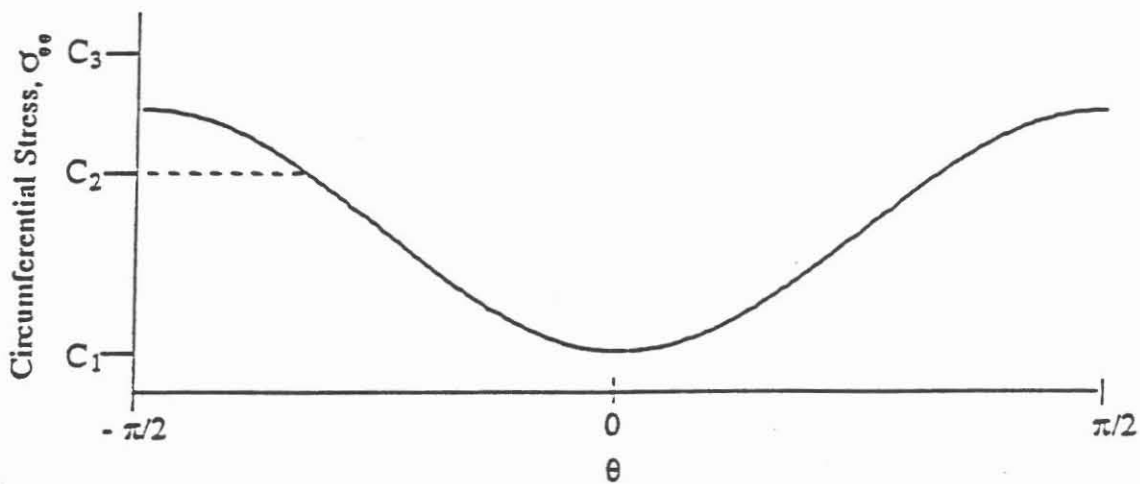
- Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung und
- ihre Änderungen mit der Tiefe und in der Umgebung von Vor- und Hauptbohrung.
- Abschätzung ihres Betrages aus der Geometrie der Breakouts, wobei S_h aus Hydrofrac-Messungen stammen muß.
- Unterscheidung von Bohrung-induzierten, präexistenten offenen (aktiven) und geschlossenen (mineralisierten verheilten) Rissen und Brüchen.
- Bruch- und Riss-Orientierung und ihre Beziehung zum heutigen Spannungsfeld.

Ein Bohrloch, das in ein Medium mit einem homogenen, anisotropen Spannungsfeld eingebracht wird, verändert die Spannungstrajektorien (Richtung der Hauptspannungen) in der Nachbarschaft der Bohrung. Der dem Bohrlochrand durch die Spülungssäule aufgeprägte, bei der zu fordernden Stetigkeit homogene Normaldruck kann nur durch Rotation der Hauptachsen des äußeren Spannungsfeldes in der Nachbarschaft der Bohrung hergestellt werden. Dadurch kommt es zu Spannungskonzentrationen an der Bohrlochwand, die Bruch- und Zugrisse bis hin zu Breakouts (Gough & Bell, 1981) erzeugen können. Die maximale Spannungskonzentration tritt senkrecht zur Richtung



a)

Abb. 1a. Schematische Darstellung eines Bohrlochrandausbruchs in einem anisotropen Spannungsfeld mit den Hauptspannungen S_H und S_h . Der Bohrlochrandausbruch beginnt unter dem Winkel θ_b gegen S_H und besitzt einen Öffnungswinkel von $2 \times \phi_b$. Daneben ist die Bohrlochgeometrie, wie sie vom seismoakustischen BoreholetelevIEWer erfaßt wird, dargestellt. Die Bohrlocherweiterungen sind deutlich zu erkennen.



b)

Abb.1b. Darstellungen der tangentialen Normalspannung am Bohrlochrand in Abhängigkeit vom Winkel gegen die Richtung von S_H .

der maximalen horizontalen Kompressionsspannung auf und legt sie damit fest (Abb. 1).

Die Bohrlochgeometrie, und damit auch die Bohrlochrandausbrüche kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Die genaueste Abbildung der Bohrlochwand liefert der seismoakustische Boreholeteleviwer, wie er in den KTB-Bohrungen von der WBK und Schlumberger eingesetzt wird. Die Darstellung der Amplituden und Laufzeitwerte in Form von Zylinder- und Flächenprojektionen (Abb. 2) gewährleistet das Erkennen der Teufenbereiche mit Bohrlochrandausbrüchen und die Bestimmung der horizontalen Hauptspannungen.

Die Weite der Breakouts ist ein Maß für die Magnitude der Spannungskonzentration. Bei Kenntnis des S_H aus Hydrofrac-Messungen und des Reibungskoeffizienten aus Labormessungen kann daraus der Betrag von S_H abgeschätzt werden.

Durch die intensive Beanspruchung des Gesteins durch die Spannungskonzentration an der Bohrlochwand entstehen nicht nur Bereiche, die ausgebrochen sind. Vielmehr treten auch im scheinbar intakten Bohrloch Zonen von zerschertem, aber nicht ausgebrochenen Material auf. Parallel zur größten Hauptspannungsrichtung können darüber hinaus Zugrisse im Gestein auftreten. Diese Zugrisse können mit dem Televiwer oft nur schlecht erkannt werden.

In all diese Klüfte kann Spülflüssigkeit der Bohrung verstärkt eindringen. Anhand der Formation Microscanner (Abb. 3; Pézard & Anderson, 1988) Daten läßt sich nun analog zum Reflektionsbild des Televiwers ein elektrisches Bild der Bohrlochwand bestimmen (Abb. 4). Alte, schon mineralisierte Klüfte lassen sich anhand dieser Daten von den Klüften unterscheiden, die durch die Bohrung entstanden sind. Die azimutale Verteilung der Leitfähigkeitswerte in Kombination mit den Bohrlochgeometriedaten liefert damit auch in Bereichen ohne Bohrlochrandausbrüche Informationen über das Spannungsfeld und läßt Abschätzungen über das Verhältnis der beiden Hauptspannungen zu, da Zugrisse parallel zu S_H theoretisch erst ab bestimmten Hauptspannungsverhältnissen auftreten.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Spannungsrichtung stellt eine Auswertung von 3-Komponenten Vertical Seismic Profiling Daten dar. Bei VSP-Messungen werden außer den Raum- und Oberflächenwellen auch Wellen angeregt, die das Bohrloch entlang laufen bzw. das Bohrloch in sich verbiegen. In mehreren Bohrungen in Nordamerika und Frankreich (Barton & Zoback, 1988; Zoback et al., 1986) hat man festgestellt, daß die Polarisation der Bohrlochbiegewelle mit der Richtung des regionalen Spannungsfeldes übereinstimmt, unabhängig von der Orientierung von Bohrloch und Schuß zueinander (Abb. 5 und 6).

Zusammenfassung:

Wir haben ein zerstörungsfreies System von geophysikalischen Spannungsmeßmethoden vorgestellt, das die Spannungskonzentration durch das Bohrloch auf drei beobachtbare Größen ausnutzt:

- Geometrie des Bohrloches
- Elastische Bohrlochschwingungen
- Elektrische "Tomographie" der jungen Risse in der Mantelzone des Bohrlochs

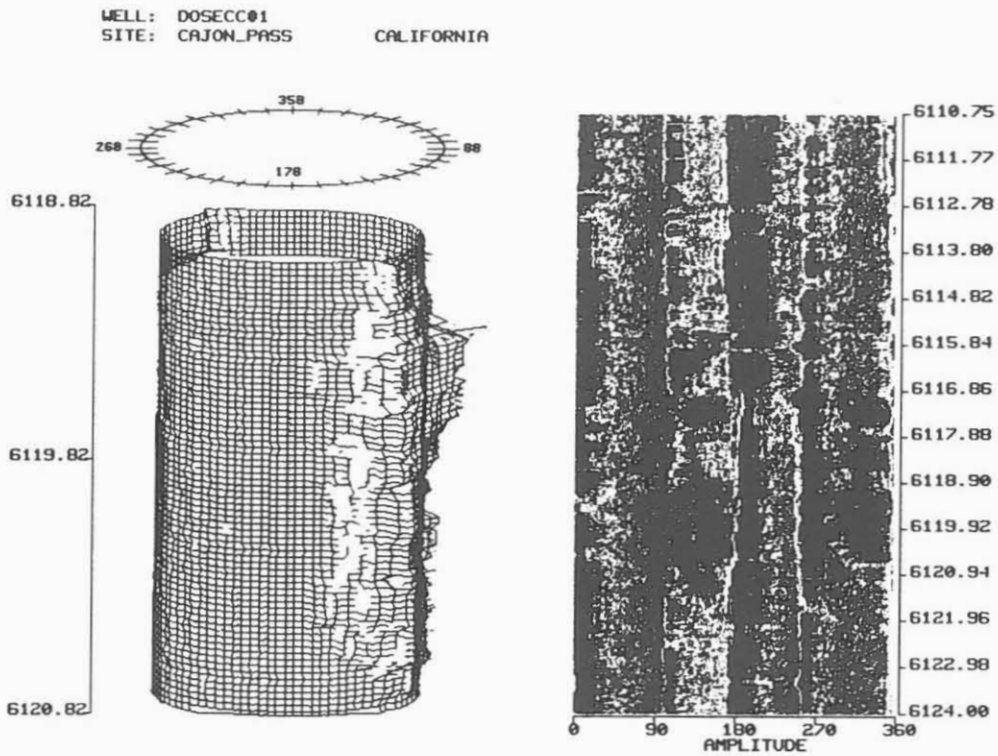
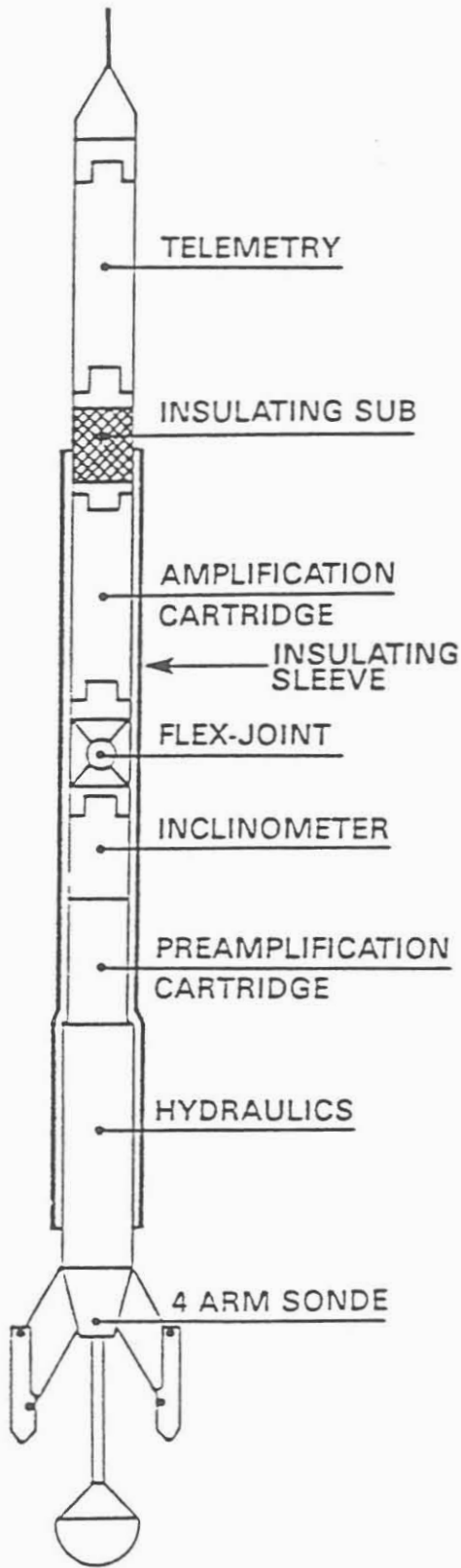


Abb. 2. Darstellung der Boreholeteleviwermessung im Teufenintervall von 6228 bis 6120 ft in der Bohrung Cajon Pass. Links eine dreidimensionale Abbildung der Laufzeiten (Zylinderprojektion), rechts eine Darstellung der Amplitudenwerte (in Flächenprojektion), die in Form einer Farbskala gute und schlechte Reflexionen der Bohrlochwand wiedergeben.



FMS

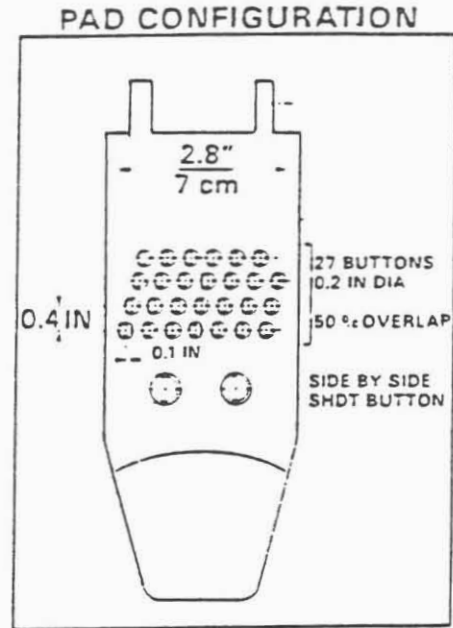


IMAGE COVERAGE 20%
WITH 2 PADS IN 8 1/2"
HOLE.

ELECTRICAL IMAGE

Abb. 3. Skizze vom Aufbau eines Formation Microscanning Tools mit 27 Elektroden auf jedem pad der 4-Arm Sonde.

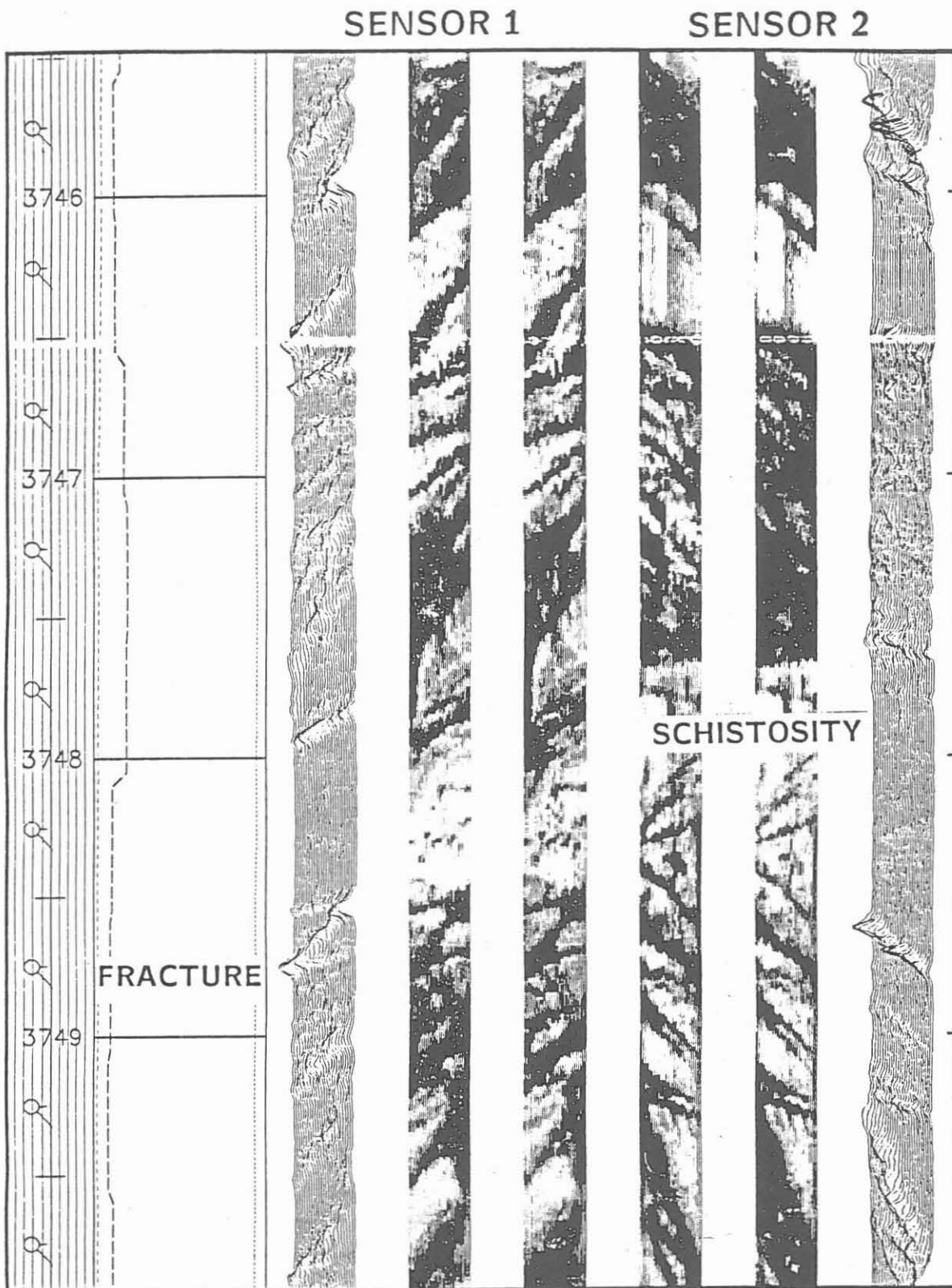


Abbildung 4

FRACTURED MIGMATITIC GNEISS

Abb. 4. Formation Microscanner Aufnahme in der Bohrung Cajon Pass.

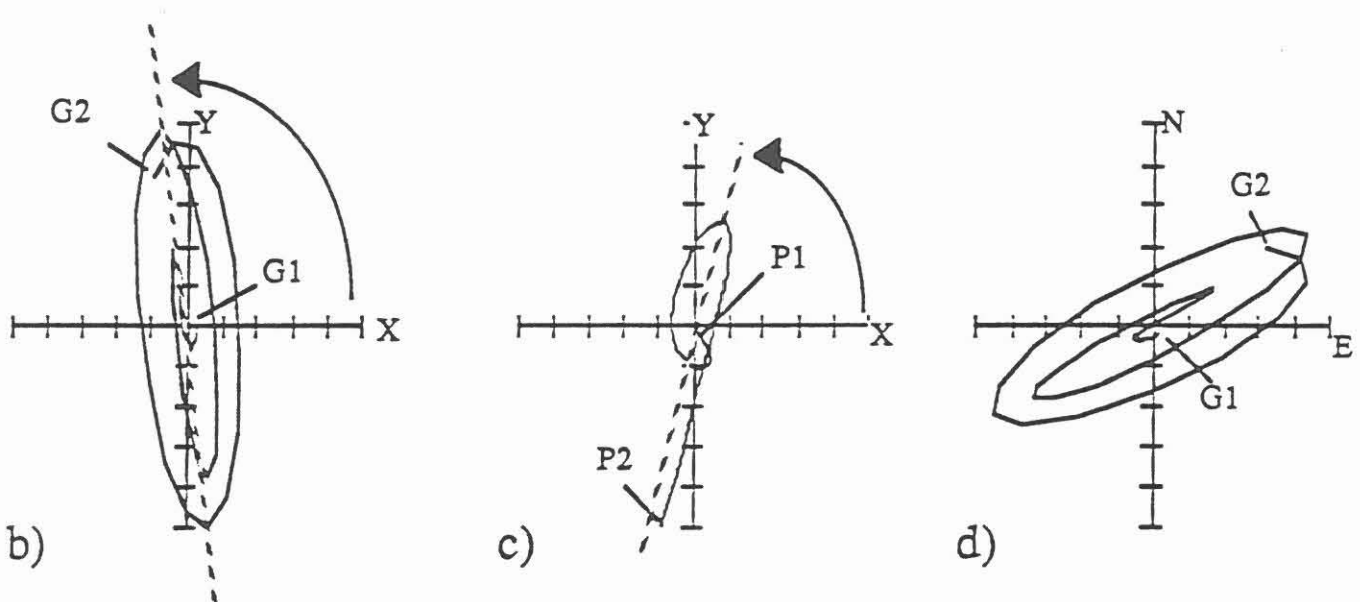
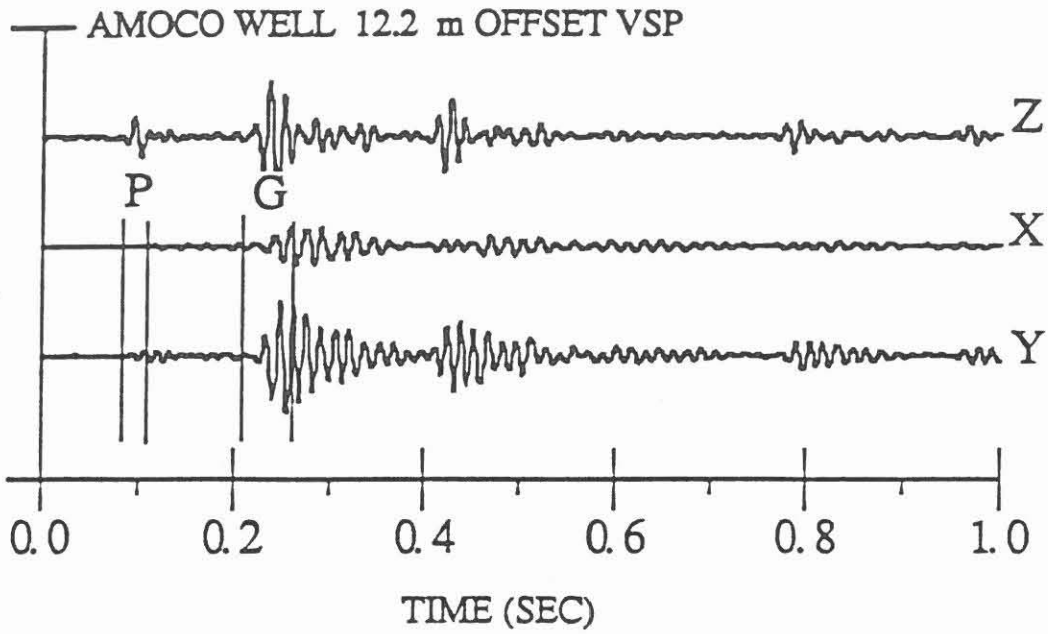


Abb. 5a. VSP-Registrierung in einer Tiefe von 244 m in einer Sedi-
mentbohrung.

Abb. 5b. Partikelgeschwindigkeitsdarstellung für die am Bohrloch
geführte Welle G.

Abb. 5c. Darstellung der Partikelgeschwindigkeit für die Kompres-
sionswelle. Damit kann die Orientierung der Geophone im
Bohrloch und somit die Orientierung der Aufnehmer bezogen
auf Nord bestimmt werden.

Abb. 5d. Reorientierung der geführten Welle gegen Nord.

Die Kombination erlaubt die

- Bestimmung der Richtung der Spannungstrajektorien
- Abschätzung der Spannungsmagnitüde
- Unterscheidung von Schieferung, jungen und verheilten Rissen

Wir sind zuversichtlich, daß die Entwicklung der Methode der Polarisation von Biegeschwingungen Spannungsrichtungen und -Magnituden bis in die Tiefen zu bestimmen gestattet, bis in die VSP-Messungen ausgeführt werden können. Damit dürfte die von Zoback und Barton entwickelte Spannungsmessmethode bis in größere Tiefen als jedes andere Verfahren anwendbar sein. Wir sind uns bewußt, daß hierzu sofort experimentelle und theoretische Entwicklungen durchgeführt werden müssen.

Literatur:

- Barton, C.A., and Zoback, M.S. 1988. Determination of in-situ stress from borehole guided waves, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Gough, D.I., and Bell, J.S., 1981. Stress orientations from oil well fractures in Alberta and Texas, *Can. J. Earth Sci.*, 18, 1358-1370.
- Pézarid, P.A., and Anderson, R.N., 1988. Structure and alteration of the oceanic crust in ODP Hole 504B from detailed study of geophysical and geochemical logs. in preparation.
- Zoback, M.D., Mastin, L., and Barton, C.A., 1986. In-situ stress measurements in deep drillholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts, and Stonely wave polarization, in: *Proc. Int. Symp. Rock Stress Measurements, Stockholm*, 289-300.