

Versuch zur Ermittlung von permeablen
Klüften in der Pilotbohrung
KTB-Oberpfalz VB mittels Stoneley-Wellen

**VERSUCH ZUR ERMITTLUNG VON PERMEABLEN KLÜFTEN
IN DER PILOTBOHRUNG KTB-OBERPFALZ VB
MITTELS STONELEY-WELLEN**

R. Hänel

ZUSAMMENFASSUNG

Die mit Hilfe des Digital Sonic Tool registrierten Stoneley-Wellen weisen entsprechend der Theorie auf zahlreiche permeable Klüfte in der Pilotbohrung hin. Der Vergleich mit dem Kaliber-Log zeigt eine auffällige Korrelation mit Bohrlochrandausbrüchen. Möglicherweise erfolgt hier eine Verstärkung der Stoneley-Wellen-Energie. Es ist jedoch auch nicht auszuschließen, daß impermeable Klüfte, die sich durch Dichteunterschiede in der Klüftfüllung (Wasser, Graphit, Pyrit etc.) gegenüber der Umgebung auszeichnen, die gleichen Resultate zeigen. Der Beweis, inwieweit es sich hierbei tatsächlich um permeable Klüfte handelt, kann nur durch hydraulische Packerteste, Fluid-Logging und durch den Einsatz des Thermal Flowmeter erbracht werden.

SUMMARY

From the theoretical point of view the Stoneley waves, recorded by means of the Sonic Digital Tool, show numerous permeable fractures in the pilot borehole. A comparison with the caliper log gives a good correlation with breakouts. Possibly, an amplification of reflected energy occurs. On the other hand, it can not be excluded that impermeable fractures, filled with a contrasting medium like water, graphite, pyrite etc. will yield the same results. Of course, the proof for the presence of permeable fractures can be obtained only through hydraulic packer test, fluid-logging and the thermal flowmeter.

Anschrift des Autors: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, Projektleitung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51.

1 EINLEITUNG

Die Erfassung von Fluiden und Fluidbewegungen in der Kruste stellt eine wesentliche Voraussetzung zur Klärung von Detailfragen dar und tritt in nahezu allen acht Haupt-Zielvorstellungen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) auf; EMMERMANN (1986). Die gegenwärtig diskutierten Aktivitäten der Krustenfluide sind in Abb.1 dargestellt (BEHR & EMMERMANN 1983), wobei unter Fluiden sowohl Flüssigkeiten als auch Gase zu verstehen sind. Die Kenntnis dieser Aktivitäten ist u.a. auch von Bedeutung für den Wärme- und Massentransport, zum Verständnis von Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit oder auch für die Erklärung von Niedergeschwindigkeits-Zonen.

Die Modellierung der Kruste im Hinblick auf Fluide und insbesondere Fluidbewegungen erfordert die Kenntnis der geohydraulischen Parameter, wie Porosität, Speicherkoeffizient, Matrix-Permeabilität, Kluftpermeabilität etc.. Vorgesehen ist, diese Parameter durch hydraulische Tests in der Pilotbohrung KTB-Oberpfalz VB und ergänzende Laboruntersuchungen zu ermitteln.

Für die Modellierung der Kruste wäre es jedoch bereits sehr hilfreich, etwas über die möglichen Wegsamkeiten für die Fluide zu wissen. Von Interesse ist also die Kenntnis von permeablen Klüften in Abhängigkeit der Tiefe innerhalb der Pilotbohrung KTB-Oberpfalz VB.

Einen ersten Hinweis liefern die systematischen Untersuchungen an Bohrkernen im Feldlabor, indem die Klüfte pro Meter (Klüftigkeitsziffer) sowie die Störungen ermittelt werden; siehe z.B. KTB Report 88-9. Die Angaben lassen jedoch nicht erkennen, ob es sich dabei um trockene Mikrorisse, kleine Klüfte oder um Klüfte handelt, die einen Fluidtransport erlauben.

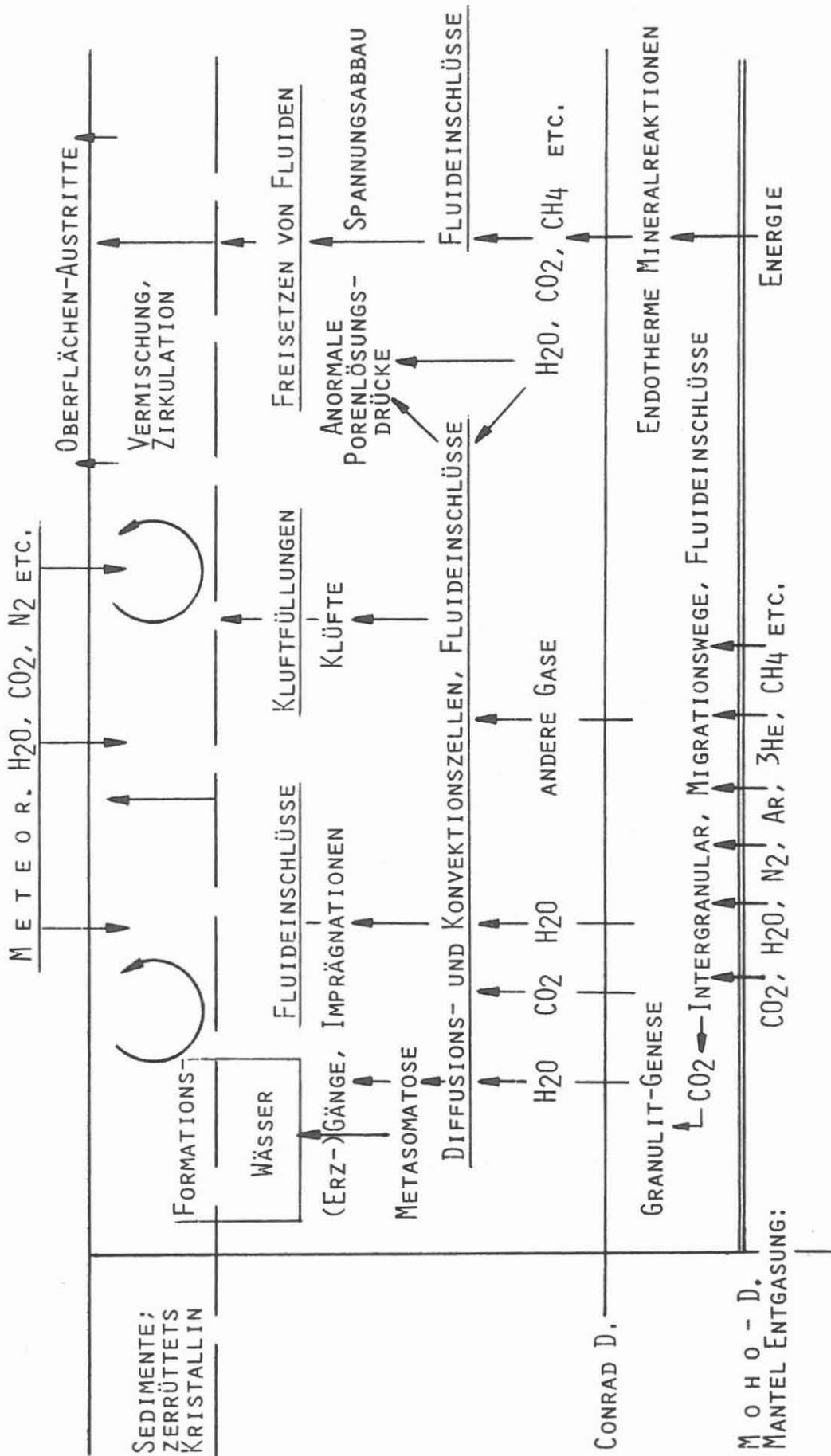


Abbildung 1: Fluide und Fluidbewegungen in der kontinentalen Kruste; BEHR & EMMERMANN (1983).

Eine andere Möglichkeit, die für Fluidtransporte relevanten Klüfte oder Kluftsysteme zu bestimmen, bietet der Einsatz des Thermal-Flowmeters in einer Bohrung (KTB Report 87-3, S.115). Abb. 2 stellt ein Beispiel der Kluftbestimmungen in der deutsch-französischen Forschungsbohrung Soultz dar, in der die Nutzung der geothermischen Energie mittels Hot Dry Rock-Technik untersucht wird; SCHULZ et al. (1988). Eine Erweiterung stellt das Fluid-Logging dar, welches elektrische Messungen einbezieht (z.B. vorgesehen durch die Arbeitsgruppe STOBER, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).

Eine weitere Möglichkeit, Hinweise über Klüfte zu erhalten, bieten die geführten Rohrwellen (Spülungswellen) in einer Bohrung, auch Stoneley-Wellen genannt.

2 ENTSTEHUNG UND NACHWEIS VON STONELEY-WELLEN

Die Stoneley-Wellen (V_{St}) sind z.B. bei VSP-Messungen im unverrohrten Bohrloch zu beobachten, wo sie durch seismische Oberflächenwellen vom höchsten Punkt der Flüssigkeitssäule angeregt werden, im Bohrloch nach unten laufen und aufgrund ihrer niedrigen Frequenzen und großen Amplituden das Nutzsignal oft empfindlich stören.

V_{St} -Wellen entstehen aber auch im Bohrloch selbst. Sofern der akustische Wellenzug z.B. mit dem Sonic Digital Tool (SDT) lange genug aufgezeichnet wird, lassen sich diese beobachten. WHITE (1983) weist nach, daß die Stoneley-Wellen entlang der Bohrlochwand geführt werden, wenn die Bohrung in einem permeablen Gestein steht. Die Welle wird alsdann durch folgende Gleichung beschrieben (siehe auch CHANG et al. 1988):

$$\frac{1}{v_{St}^2} = \rho_f \left(\frac{1}{K_f} + \frac{1}{G} - \frac{2}{i\omega rZ} \right)$$

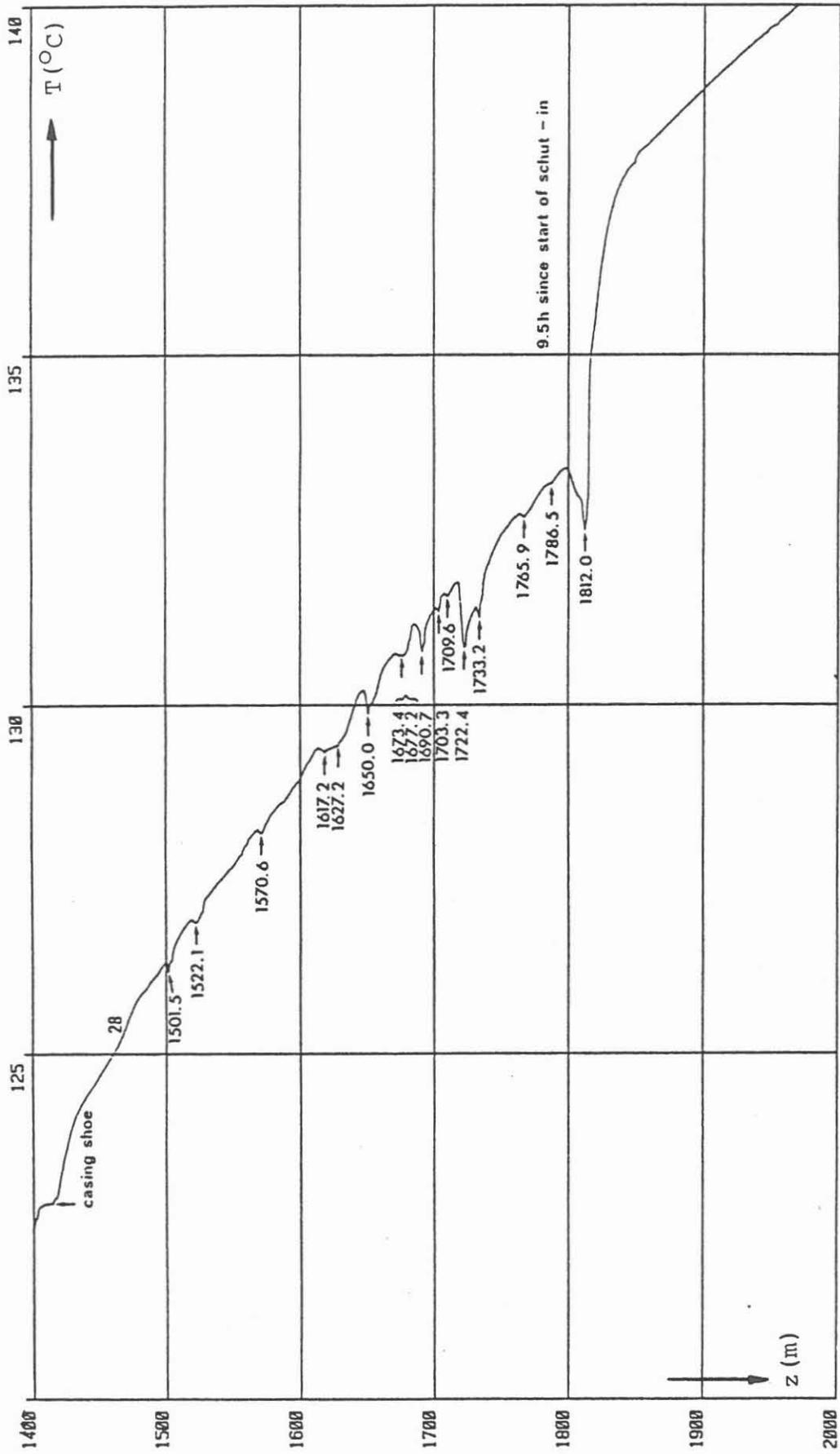


Abbildung 2: Bestimmung von permeablen Klüften mit Hilfe des Thermal Flowmeters; SCHULZ et al. (1988).

mit:

V_{St}	=	Stoneley-Wellen Geschwindigkeit
ρ_f	=	Dichte der Spülungsflüssigkeit
K_f	=	Inkompressibilität der Spülungsflüssigkeit
G	=	Schermodul des Gesteins
i	=	imaginäre Einheit
ω	=	Kreisfrequenz
r	=	Radius der Bohrung
Z	=	Impedanz der Flüssigkeitsbewegung durch die permeable Bohrlochwand.

Die Aufzeichnung von Stoneley-Wellen zur Lokalisierung von permeablen Klüften in kristallinen Gesteinen ist ein noch relativ unbekanntes Verfahren. Es wurde z.B. durch HUANG & HUNTER (1981) sowie durch die NAGRA (1985) untersucht. Die Firma PETRODATA (Schweiz) bietet dieses Verfahren kommerziell an.

Das Prinzip der Lokalisierung von permeablen Klüften basiert darauf, daß permeable Klüfte oder Kluftsysteme, die von einer Kompressionswelle (P-Welle) durchlaufen werden, eine Stoneley-Welle an ihrem Schnittpunkt mit dem Bohrloch erzeugen; Abb. 3. Es liegen jedoch noch keine Erfahrungen über die Mindestweite und die erforderliche Mindestausdehnung eines offenen Spaltes vor.

Darüber hinaus werden auch Versuche an Bohrkernen unternommen, insbesondere, um die Permeabilität des Gesteins mit dem Stoneley-Wellen Signal zu korrelieren (WILLIAMS et al. 1984). In Abb. 4 ist ein derartiger Versuch der NAGRA (1985) wiedergegeben, die Stoneley-Wellen Signale (Normierte Spülungswellen-Amplituden) aus der Sondierungsbohrung Böttstein mit dem Fluid-Logging und mit der Permeabilität (Hydraulische Durchlässigkeit) aus Packertesten in derselben Bohrung zu korrelieren. Hingegen wurde im Hot Dry Projekt der Camborne School of Mines (UK) wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen

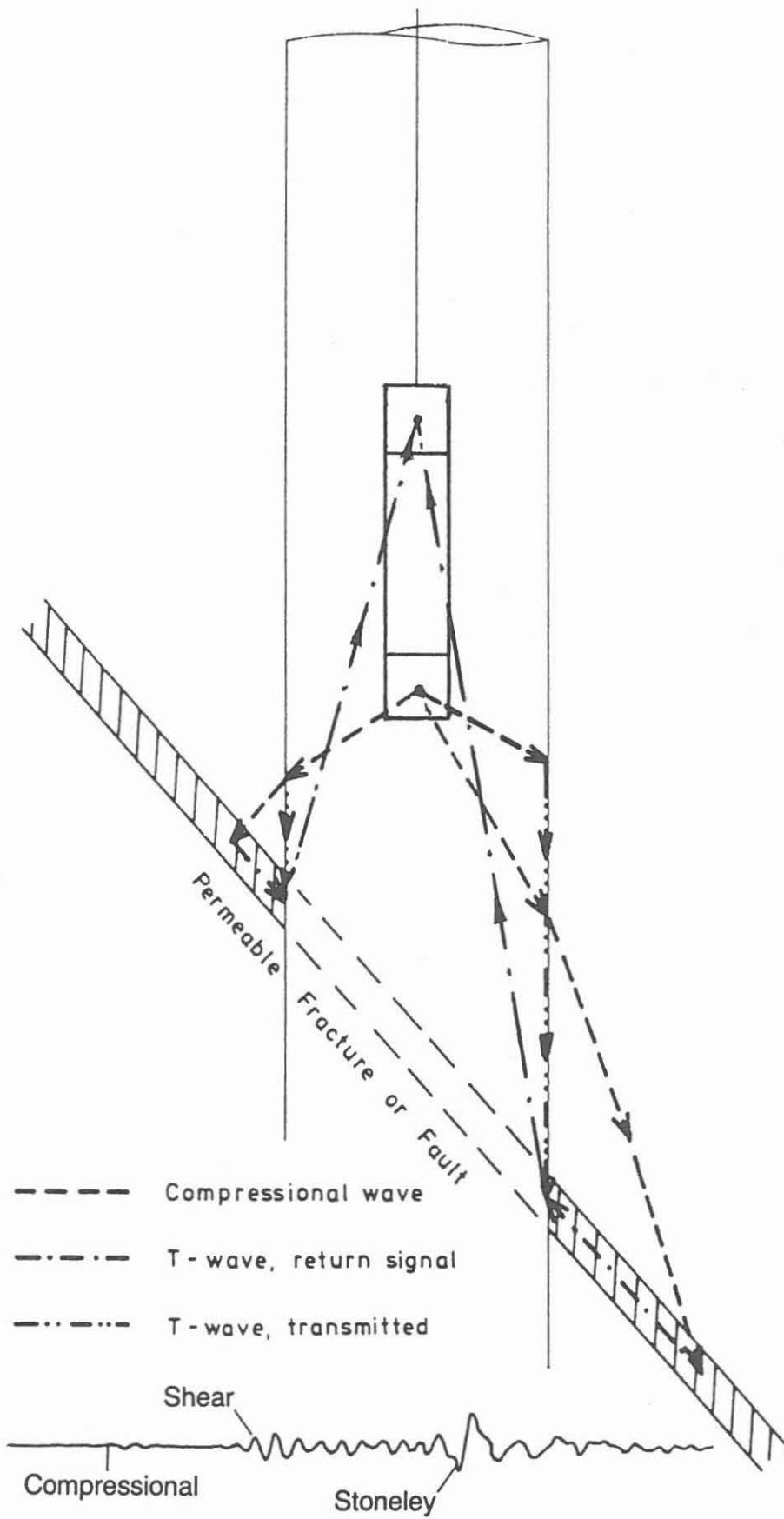


Abbildung 3: Wellenwege der Stoneley - Welle (T - wave).

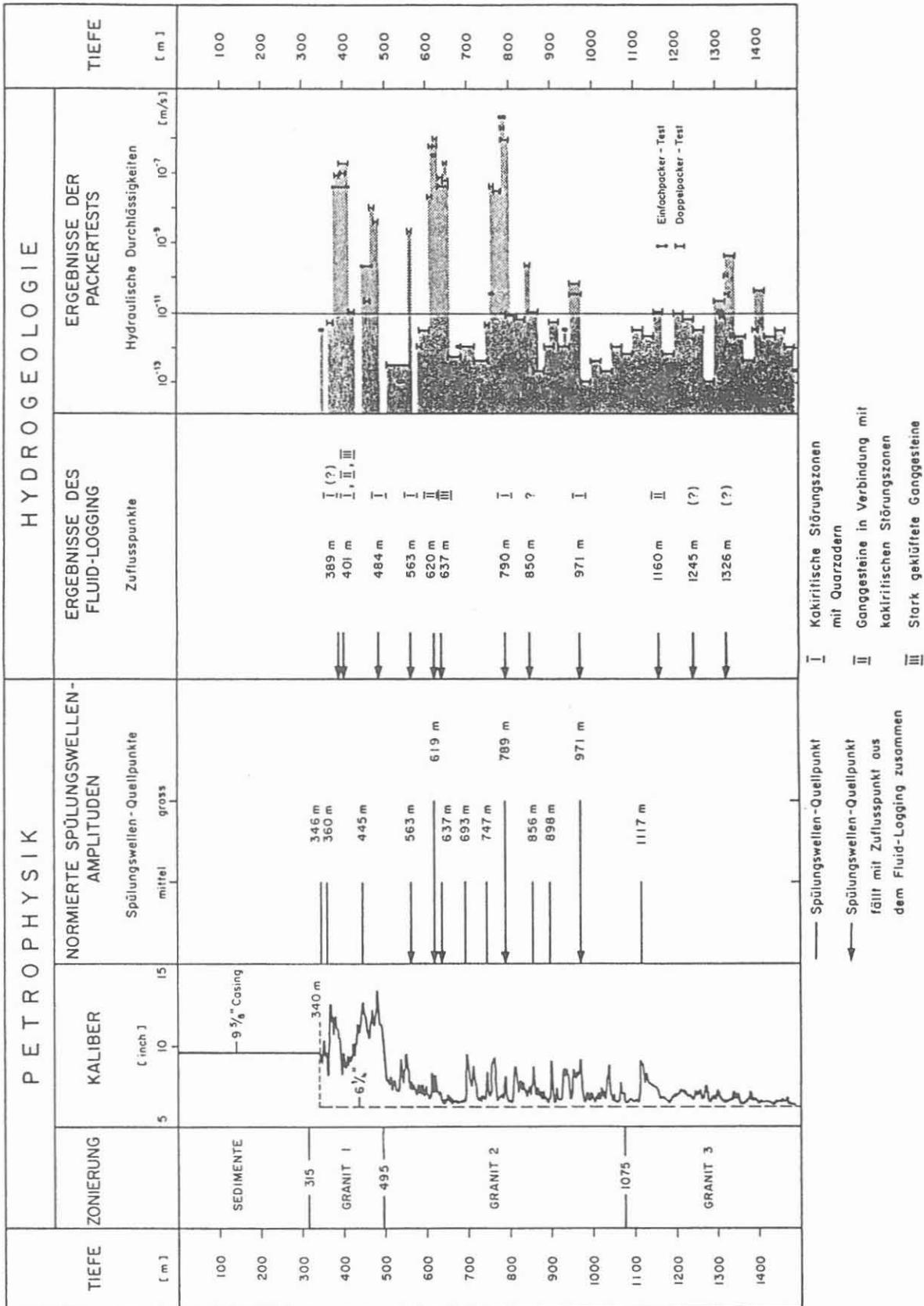


Abbildung 4: Korrelation von Stoneley - Wellen Energie (normierter Spülungswellen - Amplituden) mit der hydraulischen Durchlässigkeit, NAGRA (1985).

Stoneley-Wellen und Fluid-Logging erzielt (BATCHELOR 1987, pers. Mitteilung).

3 DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER GEMESSENEN STONELEY-WELLEN

Die Pilotbohrung KTB-Oberpfalz VB wurde mit dem Sonic Digital Tool (SDT) komplett vermessen. Eine Kurzbeschreibung kann dem KTB Report 87-3, Seite 112, entnommen werden. Die Sampling-Rate beträgt 5 μ s und die Registrierdauer 10 oder 20 ms.

Das SDT verfügt über zehn Empfänger. Durch eine geeignete "Fenstertechnik" wird für jeden Empfänger des SDT's die Stoneley-Welle abgegriffen und ihre Energie zunächst als Log aufgezeichnet; siehe Abb. 5, linke Seite. Außerdem ist im Mittelteil der Abb. 5 der gesamte Wellenzug im Variablen Density Mode dargestellt (dunkle Aufzeichnung entspricht großer Energie und helle Aufzeichnung geringer Energie). Anschließend wird die "Differential Energy" der Stoneley-Welle ermittelt: normalisierte Energiedifferenz zwischen zwei benachbarten Empfängern, dividiert mit der Distanz beider Empfänger in DB/Meter und über den Wellenzug verschoben. Die Aufsummierung der "normalisierten Energiedifferenz" ist alsdann am rechten Rand des Logs aufgetragen und stellt zugleich einen Indikator für permeable/offene Zonen dar.

Da in diesem Report das gesamte SDT-Log nicht im gleichen Maßstab wie in Abb. 5 wiedergegeben werden kann, wurden alle Marker aus dem SDT-Log als Striche/Balken in Anl. 1 - gemeinsam mit dem Kaliber-Log - übertragen. Der Vergleich der beiden Logs liefert folgende Ergebnisse:

- (1) Die Anzahl der Klüfte nimmt mit der Tiefe ab. In bestimmten Tiefenbereichen ist eine Konzentration zu erkennen; eine Korrelation mit der Lithologie ist jedoch nicht ohne weiteres möglich.

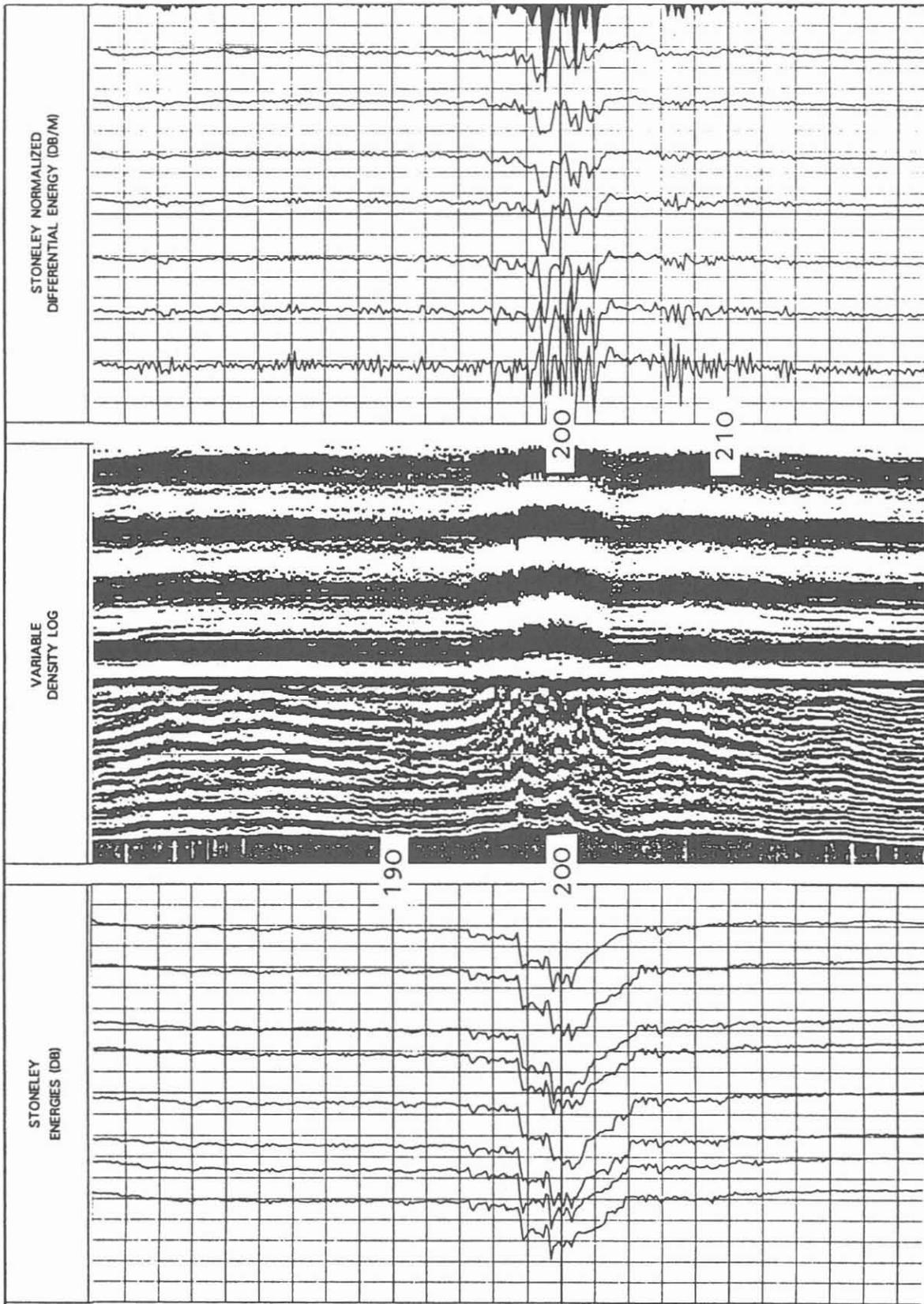


Abbildung 5: Stoneley - Wellen Darstellung aus einer Sonic Digital Aufzeichnung.

- (2) Dort, wo die Klüfte auftreten, sind auch Bohrlochrandausbrüche zu verzeichnen. Es ist also davon auszugehen, daß die durch die Klüfte verursachten Schwächezonen zu Bohrlochrandaufbrüchen führen. Dabei ist im einzelnen noch zu klären, inwieweit die Bohrlochrandausbrüche durch Bohrarbeiten erfolgten (siehe auch HÄNEL in diesem Report).
- (3) Es läßt sich zeigen, daß die durch die Stoneley-Wellen angezeigten Klüfte auch mit niedrigen elektrischen Widerständen sowie mit Pyrit- und Graphiteinlagerungen korrespondieren (siehe KÜCK in diesem Report). Da hierbei aber offensichtlich der prozentuale Gehalt von Pyrit und Graphit im Gestein zu berücksichtigen ist, dieser aber noch nicht ermittelt wurde, muß diese Korrelation zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden.
- (4) Die entscheidende Frage ist natürlich, handelt es sich hierbei wirklich um Klüfte oder sogar offene Klüfte:
 - Man erkennt in Anl. 1, daß die normalisierte Energiedifferenz der Stoneley-Wellen mit den "scharfkantigen" Bohrlochrandausbrüchen korrelieren - betrachtet man hingegen das Kaliber in Abb. 5, so sind die Bohrlochrandausbrüche keineswegs scharfkantig. Es stellt sich jedoch die Frage, ob hier - wo die Bohrlochwand eine Auskolkung erfährt - durch "Mehrfachreflexionen" eine Verstärkung der an der Bohrlochwand geführten Stoneley-Welle erfolgt. Weitere Untersuchungen sind also erforderlich.
 - Es ist außerdem zu überprüfen, inwieweit anstelle von offenen, permeablen und schwingfähigen Klüften auch einfache Dichte-Unterschiede in der Kluftfüllung zu erhöhter Energie der Stoneley-Wellen führen, z.B. Wasser, Graphit, Pyrit, etc..

Nun, letztendlich kann der Beweis, ob es sich hierbei tatsächlich um permeable Klüfte handelt, nur durch hydraulische Tests, Fluid-Logging und mit Hilfe des Thermal-Flowmeter-Einsatzes erbracht werden.

LITERATUR

- BER, H.-J. & EMMERMANN, R. 1983: Statusbericht des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) der Bundesrepublik Deutschland. - Band 1, Forschungskonzeption, unveröffentl. Beitrag, 119 S.
- CHANG, S.K., LIN, H.L. & JOHNSON, D.L., 1988: Lower-frequency tube waves in permeable rocks. - Geophysics, Vol. 53, No.4, p. 519-529.
- EMMERMANN, R., 1986: Das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm, Forschungskonzeption und Zielsetzungen. - Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn, S. 147-166.
- HUANG, C.F. & HUNTER, J.A., 1981: Correlation of "tube wave" events with open fractures in fluid-filled boreholes: Current Research, Part A. - Geol. Surv. Canada, Paper 81-1A, p. 361-376.
- NAGRA, 1985: Sondierungsbohrung Böttstein, Untersuchungsbericht. - Baden (Schweiz), Techn. Bericht 85-01, 190 S.
- SCHULZ, R., HÄNEL, R. & SCHELLSCHMIDT, R., 1988: Hydrogeothermic studies on Hot Dry Rock Technology. - BGR/NLFB, Hannover, Archiv-Nr. 103 311, 11 S.
- WHITE, J.E., 1983: Underground sound. - Application of seismic waves, Elsevier Science Publ. Co.
- WILLIAMS, D.M., ZERMANEK, J., ANGONA, F.A., DENNIS, C.L. & CALDWELL, R.L., 1984: The long space acoustic logging tool. - Trans., 25th Ann. Soc. Prof. Well-Log Anal., Logging Symposium, paper T.