

Skalenvarianz hydraulischer und struktureller Eigenschaften geklüfteter Gesteine

Dr. rer. nat. Günter Zimmermann

Habilitationsschrift an der Fakultät VI
der Technischen Universität Berlin

Lehrgebiet:

Geohydraulik und Bohrlochgeophysik

Eröffnung des Habilitationsverfahrens:	29.03.2006
Verleihung der Lehrbefähigung:	22.11.2006
Ausstellung der Urkunde:	22.11.2006
Aushändigung der Urkunde:	11.01.2007

Berichter:

Prof. Dr. H. Burkhardt (Technische Universität Berlin)

Prof. Dr. U. Yaramanci (Technische Universität Berlin)

Prof. Dr. U. Tröger (Technische Universität Berlin)

Prof. Dr. O. Kolditz (Universität Tübingen)

Prof. Dr. S. Shapiro (Freie Universität Berlin)

Berlin 2007

D83

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Grundlagen der Perkolationstheorie	8
3	Konzept, allgemeiner Forschungsansatz	11
3.1	Datenbasis.....	11
3.1.1	Dünnschliffuntersuchungen.....	12
3.1.2	Strukturerkennende Bohrlochmessverfahren.....	13
3.1.3	Seismische Strukturinformationen.....	14
3.2	Definition der Kenngrößen	15
3.3	Modellierungen.....	16
4	Allgemeine Informationen zu den Bohrungsprojekten KTB und HSDP	19
4.1	Das Kontinentale Tiefbohrprogramm (KTB)	19
4.2	Das Hawaiianische Bohrungsprojekt (HSDP).....	25
5	Skalenvarianz der hydraulischen Eigenschaften	30
5.1	Mikroskopische Skala.....	30
5.1.1	Fluoreszierende Dünnschliffe der KTB-Bohrung	30
5.1.2	Fluoreszierende Dünnschliffe der HSDP2-Bohrung	33
5.2	Makroskopische Skala	36
5.2.1	Ergebnisse aus Bohrlochmessungen (FMS) der KTB-Hauptbohrung.....	36
5.2.2	Ergebnisse aus Bohrlochmessungen (BHTV) der HSDP2-Bohrung.....	42
5.3	Megaskopische Skala.....	43
5.3.1	Seismische Reflektoren im Umfeld der KTB-Bohrungen.....	44
5.4	Kritische Parameter an der Perkolationsschwelle.....	46
5.5	Vergleich struktureller und hydraulischer Eigenschaften der KTB-Bohrung	49
5.6	Skalenübergreifende Zusammenhänge - Vergleich der KTB und HSDP Bohrungen.....	52
6	Schlussfolgerungen.....	54
7	Literaturverzeichnis	57
	Anlagen.....	64

1 Einleitung

Die Untersuchung und die Kenntnis hydraulischer Eigenschaften und deren Skalenvarianz bilden die Grundvoraussetzungen für das Verständnis der dynamischen Prozesse, der Temperatur und des Spannungsfeldes in der oberen Kruste. Die Kenntnis der Permeabilität als zentrale Größe zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine stellt hierfür einen der grundlegenden Parameter dar, um Aussagen über potentielle Wegsamkeiten von Fluiden in der oberen Kruste treffen zu können. Die Permeabilität stellt eine Größe dar, die in Abhängigkeit von der Messskala, in der man sie misst, unterschiedliche Messergebnisse liefert, d.h. diese Größe ist nicht skaleninvariant (Brace, 1984, Clauser, 1992; Renshaw, 1998) und besitzt demnach kein eindeutig zu definierendes Repräsentatives Elementarvolumen (REV)(Abb. 1). Die Skalenvarianz der Permeabilität gilt insbesondere für geklüftete Gesteine, deren hydraulische Eigenschaften hauptsächlich durch bevorzugte Fließwege aufgrund von Rissen und Klüften bestimmt sind und der Beitrag der Gesteinsmatrix am Fluidtransport von untergeordneter Bedeutung ist. Dieses zeigt sich quantitativ in einer sehr geringen Matrix-Permeabilität im Vergleich zur Kluft-Permeabilität. In porösen Gesteinen ist dagegen der Beitrag der Matrix nicht vernachlässigbar und bei Abwesenheit von Rissen dominierend für den Fluidtransport, sodass in diesen Fällen auch ein REV über einen größeren Skalenbereich existieren kann. Unterhalb des REV erscheint ein Medium als heterogen mit großer Variabilität seiner Eigenschaften; oberhalb des REV kann es als statistisch homogen und ergodisch betrachtet und entsprechend als äquivalent homogenes Medium modelliert werden. Permeabilitäten werden mit unterschiedlichen Methoden und in unterschiedlichen Skalen bestimmt (Clauser, 1992; Huenges et al., 1997). Dazu gehören Kernmessungen, die unter simulierten Auflastdrücken quasi in-situ Messungen darstellen. Diese Messungen repräsentieren den Skalenbereich in der Größenordnung von Zentimetern. Die Bestimmung der Permeabilität an Kernen ergibt eventuell Werte für die Matrix-Permeabilität, jedoch nicht für großräumige Kluftsysteme. Betrachtet man die Permeabilität im makroskopischen Maßstab, also als eine Größe, die beispielsweise einen integralen Wert um eine Bohrung darstellen soll, so ist diese Größe abhängig von relativ großräumigen, unregelmäßig verteilten Kluftsystemen, die sich nicht durch Messungen an Bohrkernen verifizieren lassen. Diese Permeabilität ist durch hydraulische Tests abzuschätzen, die einen integralen Messwert ergeben. Eine allgemeine Übersicht über den Skaleneffekt und die zugehörigen Modellvorstellungen zur Beschreibung der Permeabilität in unterschiedlichen geologischen Formationen geben Guéguen et al. (1996) und Bonnet et al. (2001).

Neben den unterschiedlichen Methoden, die Permeabilität direkt oder indirekt aus Messungen zu bestimmen, existieren unterschiedliche Ansätze, aus Modellrechnungen mit Kluftnetzwerken den hydraulischen Fluss zu modellieren. Das Problem der Modellbildung von Kluftsystemen besteht darin, die komplexen, räumlichen Strukturen der Natur in adäquate Modelle umzusetzen (Warren & Root, 1963; Bear et al., 1993; Kolditz, 1996, 2002). Man unterscheidet zwischen deterministischen Kluftnetzwerken (Brown & Scholz, 1986; Moreno et al., 1988; Kolditz, 1992; David, 1993; Tsang, 1991; Tsang & Neretnieks, 1998;

Bernabe, 1995), fraktalen Kluftnetzwerken (Meakin, 1991; Velde et al., 1991, 1993; Cox & Wang, 1993; Kosakowski, 1994, 1996a, 1996b; Acuna & Yortsos, 1995; Watanabe & Takahashi, 1995; Bahr, 1997; Berkowitz & Hadad, 1997; Glover et al., 1999; Darcel et al., 2003) und stochastischen Kluftnetzwerken (Wollrath, 1990; Adler et al., 1992; Adler & Thovert, 1998; Bour et al., 2002), die zweidimensionaler als auch dreidimensionaler Natur sein können.

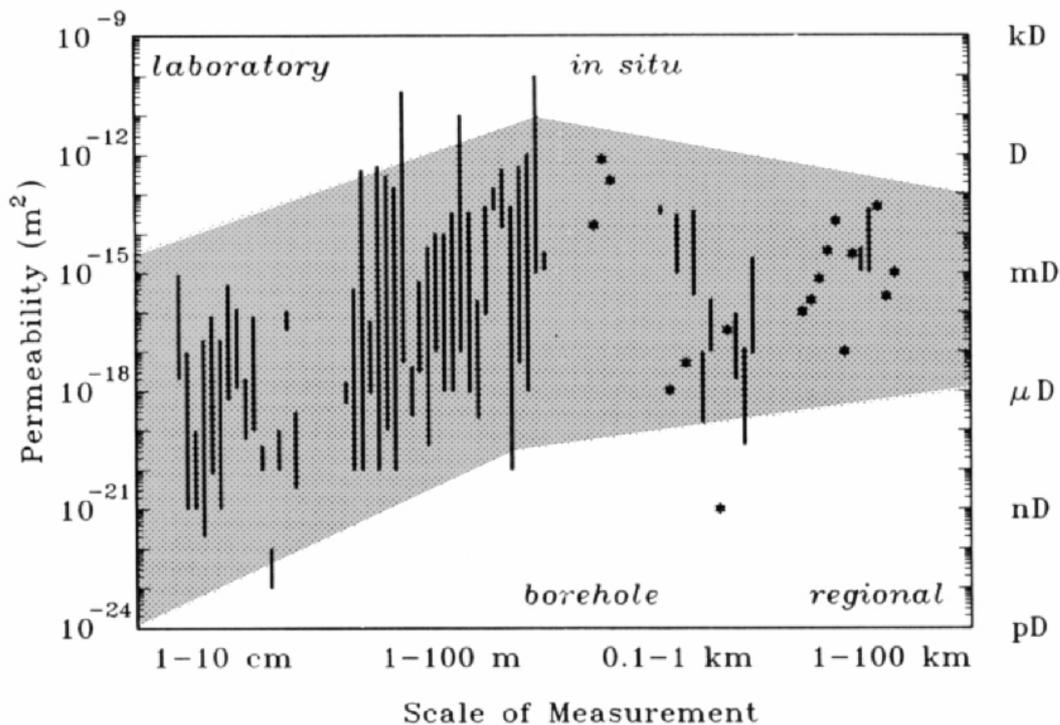


Abb. 1 Skalenvarianz der Permeabilität geklüfteter Gesteine (aus Clauser, 1992)

Deterministische Kluft-Netzwerke basieren auf gemessenen Eigenschaften von hydraulischen Wegsamkeiten, die auf konkreten Beispielen basieren, z.B. die Mikrorissgeometrie von Dünnschliffen oder die Rissverteilung an der Bohrlochwand. Im Gegensatz dazu nutzt man bei der Generierung von stochastischen Kluft-Netzwerken die statistischen Eigenschaften der gemessenen Parameter und ergänzende theoretische Zusammenhänge, die zwischen den Parametern existieren. Die statistischen Eigenschaften werden beschrieben durch stochastische Momente unterschiedlicher Ordnung (z. B. Zimmermann, 1991), dazu zählt beispielsweise der Erwartungswert eines Parameters und dessen Verteilungsfunktion. Die stochastischen Verfahren bieten den Vorteil der Verallgemeinerung der Netzwerk-Modelle gegenüber der individuellen deterministischen Erfassung eines Netzwerkes, das nur exemplarischer Natur sein kann. Aus den deskriptiven stochastischen Strukturgrößen, also den Verteilungsfunktionen der geometrischen Parameter und den theoretischen Zusammenhängen zwischen den Größen lassen sich so Netzwerke für die unterschiedlichen Skalen generieren. Diese Vorgehensweise kann beispielsweise zu einer

Dimensionserweiterung des Modells genutzt werden. So lassen sich aus einer ein-dimensionalen Datenbasis (z.B. Ergebnisse aus Bohrlochmessungen) durch die Bestimmung der statistischen Eigenschaften der Parameter zwei-dimensionale und drei-dimensionale Modelle konstruieren, die ergodisch sind im Sinne der ein-dimensionalen Ausgangsdaten.

Zur Generierung von Kluftmodellen (deterministische und stochastische Modelle) und der Verknüpfung ihrer charakteristischen Parameter sind unterschiedliche theoretische Vorgehensweisen abhängig von der Problemstellung entwickelt worden. Diese Vorgehensweisen unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, ob ein Repräsentatives Elementarvolumen vorausgesetzt werden kann oder nicht. Bei der 'Effective Medium Theory' (EMT) werden die heterogenen Eigenschaften auf ein statistisch homogenes Medium übertragen (David et al, 1990; 1993, Van Sicken, 2002); die Gültigkeit dieser Vorgehensweise beschränkt sich jedoch auf geringe Heterogenitäten und erfordert ein Repräsentatives Elementarvolumen (Guéguen et al, 1997). Dieses kann man für Kluftsystemen nicht generell voraussetzen, hier stellt die Perkolationstheorie die geeignete theoretische Grundlage dar, die Vernetzung diskreter Kluftstrukturen (Diskontinuitäten) quantitativ zu beschreiben (eine Einführung geben z. B. Stauffer & Aharony, 1995). Die Perkolationstheorie beschreibt den Fluss auf diskreten Wegsamkeiten durch ein Medium und eignet sich daher für geklüftete Gesteine zur Beschreibung des Fluid-Transports. Eine Übersicht über die Anwendung der Perkolationstheorie hinsichtlich des Fluid- Transports in porösen und geklüfteten Gesteinen findet sich z.B. in Sahimi (1995), Berkowitz & Balberg (1993) und Berkowitz & Ewing (1998). Gavrilenko & Guéguen (1998) verwenden eine modifizierte Renormalisierungs-Gruppen (RG)-Theorie in Verbindung mit einem Perkulationsansatz zur Beschreibung des Skaleneffekts der Permeabilität. Sie erreichen damit eine gute Übereinstimmung mit dem beobachteten Plateau der effektiven Permeabilität im regionalen Maßstab basierend auf einer Zusammenstellung der Messergebnisse von Clauser (1992).

Eine der wichtigsten Charakteristiken der Perkolationstheorie ist, dass sie universellen Skalengesetzen gehorcht (Zusammenstellung z.B. in Sahimi, 1995; Selyakov & Kadet, 1996; und Stauffer & Aharony, 1995). Das bedeutet für Kluftnetzwerke, dass in der Nähe der Perkolationsschwelle, die den Übergang zu einem makroskopischen Fluss beschreibt, Potenzgesetze existieren, die die hydraulischen Eigenschaften der Netzwerke universell oder speziell, abhängig von der Topologie der Netzwerke, beschreiben (Robinson, 1983, 1984; Balberg, 1985, 1986; Balberg et al, 1984, 1991; Davy et al.,1992; Davy, 1993). Einen entscheidenden Einfluss besitzt die Konnektivität (Vernetzung) der Netzwerke und deren Zusammenhang zur Anzahl der vorhandenen Klüfte bzw. der Kluftdichte (Ozkaya & Mattner, 2003; Hestir & Long, 1990; Madden, 1983; Robinson, 1984; Long et al., 1985; Long & Witherspoon, 1985). Die Konnektivität wird weiterhin beeinflusst durch die Kluftlängen bzw. die Kluftflächen in der 3-dimensionalen Betrachtung und deren Verteilungsfunktionen (Berkowitz & Adler, 1998; Thovert & Adler, 2004; Sisavath et al., 2004). Die Kluftlänge folgt ebenfalls einem Potenzgesetz (Balberg et al., 1991; Bour & Davy, 1997,1998; Olson, 2003) und erlaubt demzufolge keine a priori Definition eines REV.

Diese Arbeit stellt die 7 Publikationen im Anhang in einen gemeinsamen Kontext. Die Zielsetzung umfasst die Erfassung und Quantifizierung der messbaren Parameter in unterschiedlichen Skalen, die die hydraulischen Eigenschaften von geklüfteten Gesteinen bestimmen. Es ist der Versuch, das Skalenspektrum über möglichst viele Größenordnungen zu beschreiben. Es zeigt sich in allen zitierten Arbeiten, dass das größte Problem darin besteht, Messwerte aus einem möglichst großen Skalenbereich zu erhalten, um charakteristische Werte über eine Skala von 2 – 3 Größenordnungen z.B. für die kritischen Exponenten in den Potenzgesetzen zu erhalten (Bonnet et al., 2001). In dieser Arbeit erstrecken sich die untersuchten Skalen von der Mikroskala (untersuchte Dünnschliffe in μm - bis mm -Auflösung) über die Makroskala (Bohrlochmessungen in cm - bis m -Auflösung) bis hin zur Megaskala (Seismische Reflektoren in der km -Skala) und umfassen daher bis zu 9 Größenordnungen.

Die zu erfassenden Parameter bestehen aus den geometrischen Eigenschaften der Fließwege im Gestein und werden durch vereinfachende Modellvorstellungen der Gesteinsrisse approximiert. Dieses führt zu charakteristischen Größen wie Kluftlängen und Kluflhäufigkeiten sowie den Vernetzungsgrad von Rissen, die die hydraulischen Eigenschaften eines Kluftnetzwerkes mitbestimmen. Darüber hinaus ist die wesentliche Größe für den Fluidtransport die Apertur der individuellen Risse und Klüfte, also die Öffnungsweite, die die Durchlässigkeit und damit die Permeabilität als dominante Größe beeinflusst. Aufgrund der Skalenabhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine sollen in dieser Arbeit die bestimmenden Größen in den einzelnen Skalen quantifiziert und verglichen werden, um mögliche Gemeinsamkeiten und skalenübergreifende Zusammenhänge zu erschließen. Dazu zählen die Quantifizierung von Vernetzungsgraden in den unterschiedlichen Skalen und die Bestimmung dieser Größen an der kritischen Schwelle der Durchlässigkeit des Netzwerkes. Dazu eignet sich die Perkolationstheorie, die kritische Netzwerkparameter der geklüfteten Gesteine an der Grenze ihrer Durchlässigkeit quantitativ erfasst. Die Zielstellung ist, diese kritischen Parameter in den einzelnen Skalen zu bestimmen und zu vergleichen, um mögliche Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Skalen zu erfassen und damit mögliche Skaleninvarianten zu bestimmen.

Als Datenbasis zur Untersuchung der Skalenabhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften geklüfteter Gesteine wurden zwei unterschiedliche Lokationen ausgewählt. Als ideale Datenbasis für diese Untersuchungen dienten die kristallinen Gesteine, die man im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) erbohrte. Als zweite Lokation wurde die Forschungsbohrung des Hawaii Scientific Drilling Projects (HSDP) an der Ostflanke des Mauna Kea gewählt, um Rissstrukturen in den vulkanischen Gesteinen zu untersuchen und mit den Eigenschaften der Kristallingesteine des KTB zu vergleichen. Eine Übersicht der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) finden sich in Huenges et al. (1997) und Huenges & Zimmermann (1999; **Anlage 1**). Im Rahmen des Hawaii Bohrprojektes wurden

Ergebnisse der hydraulischen und hydrogeologischen Untersuchungen von Paillet & Thomas (1996); Thomas et al. (1996); Dannowski (2002); Büttner & Huenges (2003) und Morin & Wilkens (2005) publiziert.

2 Grundlagen der Perkolationstheorie

Die Perkolationstheorie beschreibt die Ausbreitung einer hypothetischen Flüssigkeit in einem Medium oder Netzwerk; der Begriff 'Perkolation' wurde zuerst geprägt von Broadbent & Hammersley (1957). Allgemein kann dieser Prozess bzw. Mechanismus einerseits beschrieben werden durch einen Diffusionsprozess des Fluids und der damit verbundenen Zufälligkeit (randomness) des Weges in dem Medium oder alternativ durch die stochastischen Eigenschaften des Mediums selber. Eine ausführliche Beschreibung der Perkolationstheorie in Zusammenhang mit dem Fluid-Transport in geklüfteten Medien findet man z. B. in Sahimi (1995), Selyakov & Kadet (1996) und Berkowitz & Ewing (1998).

Man unterscheidet zwischen diskreten Netzwerken, die eine Gitterstruktur voraussetzen, und Netzwerken, deren Knotenpunkte und Verbindungen in einem Kontinuum frei angeordnet werden können (e.g. Berkowitz & Ewing, 1998). Für diskrete Netzwerke wird eine dem Problem angepasste Topologie des Netzes festgelegt, auf dem das Problem (hier die Durchlässigkeit eines Fluids) adäquat beschrieben werden kann. Dieses kann z.B. ein diskretes rechteckiges Netzwerk sein mit Knotenpunkten und Verbindungslinien zwischen den Punkten. Die Perkolationstheorie beschreibt die Ausbreitung durch ein solches Medium, wobei sich zwei Vorgehensweisen ergeben. Definiert man einen Knotenpunkt als 'offen', so sind die ihn berührenden Verbindungslinien durchlässig und stellen eine Wegsamkeit zum benachbarten Knotenpunkt dar. Alternativ kann man auch die Verbindungslinien selber betrachten und hypothetische Wege durch Verknüpfung dieser Linien definieren. Im ersten Fall spricht man von der so genannten 'site'-Perkolation (site = Gitterpunkt), im zweiten Fall von der 'bond'-Perkolation (bond = Verbindungslinie). Die Besetzungswahrscheinlichkeit P für Gitterpunkte bzw. Verbindungslinien für ein solches Netzwerk (diese kann auch als Perkulationswahrscheinlichkeit bezeichnet werden) ist dann definiert durch den Quotienten aus der Anzahl der offenen Knotenpunkte bzw. Verbindungslinien zu der Anzahl der gesamten Knotenpunkte bzw. Verbindungslinien im Gitter (Berkowitz & Ewing, 1998):

$$P = n/m$$

mit

n = Anzahl der offenen Knoten/Verbindungen im Gitter

m = Gesamtanzahl der Knoten/Verbindungen im Gitter

Die Wahrscheinlichkeit, ab der ein Netzwerk vom undurchlässigen Zustand in den durchlässigen Zustand übergeht, bezeichnet man als Perkolationsschwelle P_c (percolation threshold). Diese Schwelle lässt sich für einfache Netzwerke numerisch bestimmen bzw. durch stochastische Simulation abschätzen. Sind beispielsweise für ein 2-dimensionales quadratisches Netzwerk mindestens 59 % der Knotenpunkte ($P_{c, \text{site}} =$

0.5927) oder 50 % ($P_{c, \text{bond}} = 0.5$) der Verbindungslinien aktiv belegt, so ist dieses Netzwerk durchlässig. Für 3-dimensionale quadratische Netzwerke ergeben sich entsprechende Werte ($P_{c, \text{site}} = 0.3116$, $P_{c, \text{bond}} = 0.2488$).

Für Netzwerke mit kontinuierlich verteilten Klüften im zugrunde liegenden 2-dimensionalen oder 3-dimensionalen Raum kann man die diskrete Besetzungswahrscheinlichkeit P durch den Perkolationsparameter p ersetzen (Bour & Davy, 1997). Dieser stellt ein quantitatives Maß für die Durchlässigkeit (Konnektivität) eines Netzwerkes dar. Der Perkolationsparameter p als quantitatives Maß für die Durchlässigkeit (Konnektivität) eines Kluft-Netzwerkes ist nach Bour & Davy (1997) für zweidimensionale (2-D) Netzwerke folgendermaßen definiert:

$$p = N \ell^2 / A = \lambda_A \ell^2$$

mit

$\lambda_A = N / A = 2\text{-D Kluftdichte}$

$N = \text{Anzahl der Klüfte}$

$\ell = \text{Kluftlänge}$

$A = \text{Fläche des Netzwerkes}$

Eine Verallgemeinerung der Gleichung ergibt sich durch die Einführung einer Kluftlängenverteilung, so dass die konstante Kluftlänge durch den entsprechenden Erwartungswert $\mu(\ell)$ (Mittelwert) ersetzt wird:

$$p = N \mu^2(\ell) / A = \lambda_A \mu^2(\ell)$$

Die lineare Häufigkeit der Klüfte λ_L (1-D Kluftdichte) lässt sich nach Priest (1993) durch die 2-D Kluftdichte abschätzen:

$$2 \lambda_A \mu(\ell) / \pi \leq \lambda_L \leq \lambda_A \mu(\ell)$$

Die untere Grenze dieser Ungleichung entspricht Klüften mit zufallsverteilter Orientierung, die obere Grenze bezeichnet parallel orientierte Klüfte. Zusammenfassung der Gleichungen führt zur folgenden Generalisierung des Perkolationsparameters:

$$p = N \mu^2(\ell) / A = \lambda_A \mu^2(\ell) \geq \lambda_L \mu(\ell)$$

Eine weitere Größe, die ein quantitatives Maß für die Vernetzung (Konnektivität) eines Netzwerkes darstellt, ist die mittlere Anzahl von Knotenpunkten bzw. Schnittpunkten (intersections) pro Kluft ξ . Für zufallsverteilte Klüfte hinsichtlich ihrer Orientierung und ihres Ursprungs geben Hestir & Long (1990) einen kritischen Wert ξ_{crit} von 3.6 Schnittpunkten pro Kluft an. Robinson (1984) errechnet einen kritischen Wert ξ_{crit} von 3.1 Schnittpunkten pro Kluft für einen Datensatz mit orthogonal orientierten Klüften mit einer konstanten Länge. Innerhalb dieses Intervalls sollte daher die kritische Grenze für beliebig orientierte Klüfte liegen. Unterhalb dieser Werte sollten die zugehörigen Netzwerke nicht vernetzt sein, sondern nur aus isolierten Strukturen bestehen.

Die Permeabilität als Funktion des Perkolationsparameters folgt an der Perkolationschwelle ($p \simeq p_{\text{crit}}$) einem allgemeinen Potenzgesetz:

$$k(p) = a_p (p - p_{\text{crit}})^\alpha$$

mit a_p ; α = charakteristische Konstanten

Die Bestimmung des kritischen Perkolationsparameters p_{crit} erfolgt durch lineare Approximation des Potenzgesetzes:

$$p = p_{\text{crit}} + b_p k(p)$$

Aus dem Achsenabschnitt der Gerade lässt sich dann p_{crit} bestimmen und in das Potenzgesetz einfügen. Anschließend können die charakteristischen Parameter des Potenzgesetzes berechnet werden. Die gleiche Vorgehensweise gilt für die Anzahl der Schnittpunkte (intersections) ξ pro Kluft:

$$k(\xi) = a_\xi (\xi - \xi_{\text{crit}})^\gamma$$

mit a_ξ , γ = charakteristische Konstanten

Auch hier ergibt sich der kritische Parameter ξ_{crit} durch Näherung einer Geradengleichung:

$$\xi = \xi_{\text{crit}} + b_\xi k(\xi)$$

Die Bestimmung der kritischen Kluftlänge ℓ_{crit} ist mit zwei unabhängigen Methoden möglich. Zum einen kann diese Größe direkt aus dem kritischen Perkolationsparameter berechnet werden. Es ergibt sich durch Einsetzen der kritischen Parameter:

$$\ell_{\text{crit}} = p_{\text{crit}} / \lambda_L$$

mit λ_L = lineare Klufthäufigkeit

Die alternative Methode nutzt die kritische Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft ξ_{crit} zur Abschätzung der kritischen Kluftlänge. Die Anpassung von ℓ als Funktion von ξ erfolgt für die verschiedenen Netzwerke durch lineare Approximation oder als Potenzfunktion. Abschließend wird die kritische Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft eingesetzt und es ergibt sich die kritische Kluftlänge.

3 Konzept, allgemeiner Forschungsansatz

Die konzeptionelle Vorgehensweise umfasst die Quantifizierung von geometrischen Strukturen der Gesteine und deren Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften in den unterschiedlichen Skalen. Zur Bestimmung der Kluftparameter in den unterschiedlichen Skalen werden Dünnschliffe, Struktur erkennende Bohrlochmessungen, die ein Abbild der Bohrlochwand ergeben, und seismische Strukturen (Reflektoren) als potentielle Wegsamkeiten betrachtet und ausgewertet. Durch strukturerkennende Bohrlochmessungen lässt sich die Geometrie von streichenden Klüften bestimmen und für Modellierungen zur Bestimmung der Permeabilität nutzen. Ein zentraler Arbeitspunkt besteht darin, die offenen Parameter, wie z.B. die Kluftöffnungsweiten (Aperturen) und die Ausdehnung der Klüfte, in Abhängigkeit vom Skalenfaktor zu bestimmen und in die Modellierungen zu integrieren.

Die Permeabilitäten werden in unterschiedlichen Skalen bestimmt und mit entsprechenden geometrischen Netzwerken verglichen. Eine Definition der unterschiedlichen Skalen findet sich in Sahimi (1995). Sahimi unterscheidet die Heterogenitäten in Abhängigkeit der zugehörigen Skalenlängen:

- mikroskopische Heterogenitäten in der Größenordnung von Poren und Korngrenzen, die durch Elektronen-Mikroskopie und Dünnschliffe auflösbar sind
- makroskopische Heterogenitäten im Skalenbereich von Bohrkernen und Bohrklein
- megaskopische Heterogenitäten in der Größenordnung von Reservoirs
- gigaskopische Heterogenitäten, die mehrere Reservoirs bzw. Regionen umfassen können

3.1 Datenbasis

Die Untersuchungsobjekte zur Charakterisierung des hydraulisch zugänglichen Porenraums sollen einen möglichst großen Teil des Skalenspektrums überdecken und die physikalischen Grenzen nach oben wie nach unten abschließen. Folgende Objekte werden für die Bestimmung von Kluftparametern, Vernetzungsgrad und Verteilungsfunktionen verwendet, wobei sich die Datenbasis der untersuchten Lokationen unterscheidet:

- Dünnschliffe (fluoreszierend)
- Strukturlogs
 - Borehole Televiwer (BHTV)
 - Formation Microscanner (FMS)
 - Formation Micro Imager (FMI)
- Kernaufnahmen
- seismische Strukturen (Reflektoren)

3.1.1 Dünnschliffuntersuchungen

Zur Quantifizierung der Kluftparameter im Mikrobereich wurden Dünnschliffuntersuchungen an den Deckflächen der Kerne durchgeführt, an denen die Permeabilität bestimmt wurde. Dadurch wird ein Vergleich von Geometrie und hydraulischen Eigenschaften möglich. Die Präparation der Dünnschliffe erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden aus den Deckflächen Schliffe angefertigt und mit einem fluoreszierenden Harz getränkt. Hierzu wurde ein Epoxydharz verwendet (Araldit D + Härter), dem ein fluoreszierender Aufheller (Blankophor) beigemischt wurde. Anschließend wird der Schliff mit einem Glasplättchen fixiert und das Epoxydharz mittels einer Zentrifuge in das Gestein eingeschleudert. Nach Aushärten des Harzes wird anschließend ein Dünnschliff angefertigt. Die Betrachtung der Dünnschliffe erfolgt bei fluoreszierendem Licht unter dem Mikroskop und ist mit verschiedenen Vergrößerungen möglich; diese ist so zu wählen, dass ein möglichst großer Ausschnitt sichtbar ist bei ausreichendem Kontrast. Das Mikroskop besitzt einen Aufsatz mit einer CCD-Kamera, so dass die Bilder für eine Weiterverarbeitung digitalisiert werden können. In der höchsten Auflösung (Abb. 2) ist der Kontrast hervorragend, jedoch zeigt der Bildausschnitt hier nur einzelne Mikrorisse, die für Netzwerkmodelle stochastisch nicht ausreichend sind. Man kann jedoch erkennen, dass das Epoxydharz selbst in die kleinsten Risse eingedrungen ist, die Auflösung liegt hier bei 1 Pixel = 0.25 μm (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**).

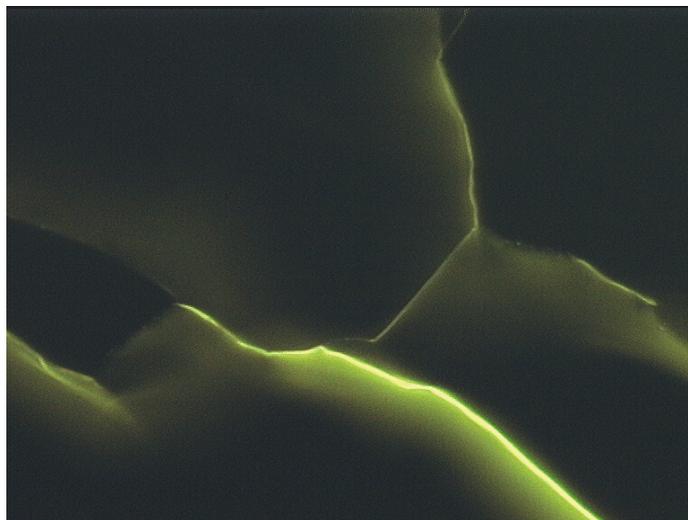


Abb.2 Fluoreszierender Dünnschliff in der höchsten Auflösung (0.25 μm /Pixel)(aus Zimmermann et al., 2003, Abb.1; Anlage 2).

3.1.2 Strukturerkennende Bohrlochmessverfahren

Die Datenbasis der makroskopischen Netzwerkmodellierungen sind die Strukturlogs, die ein quasi kontinuierliches Abbild der Bohrlochwand liefern. Im Rahmen des KTB wurde das Formation Micro Imager Tool (FMI) der Fa. Schlumberger ausgewertet, welches ein Abbild der Bohrlochwand liefert, das auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit beruht (Abb. 3).

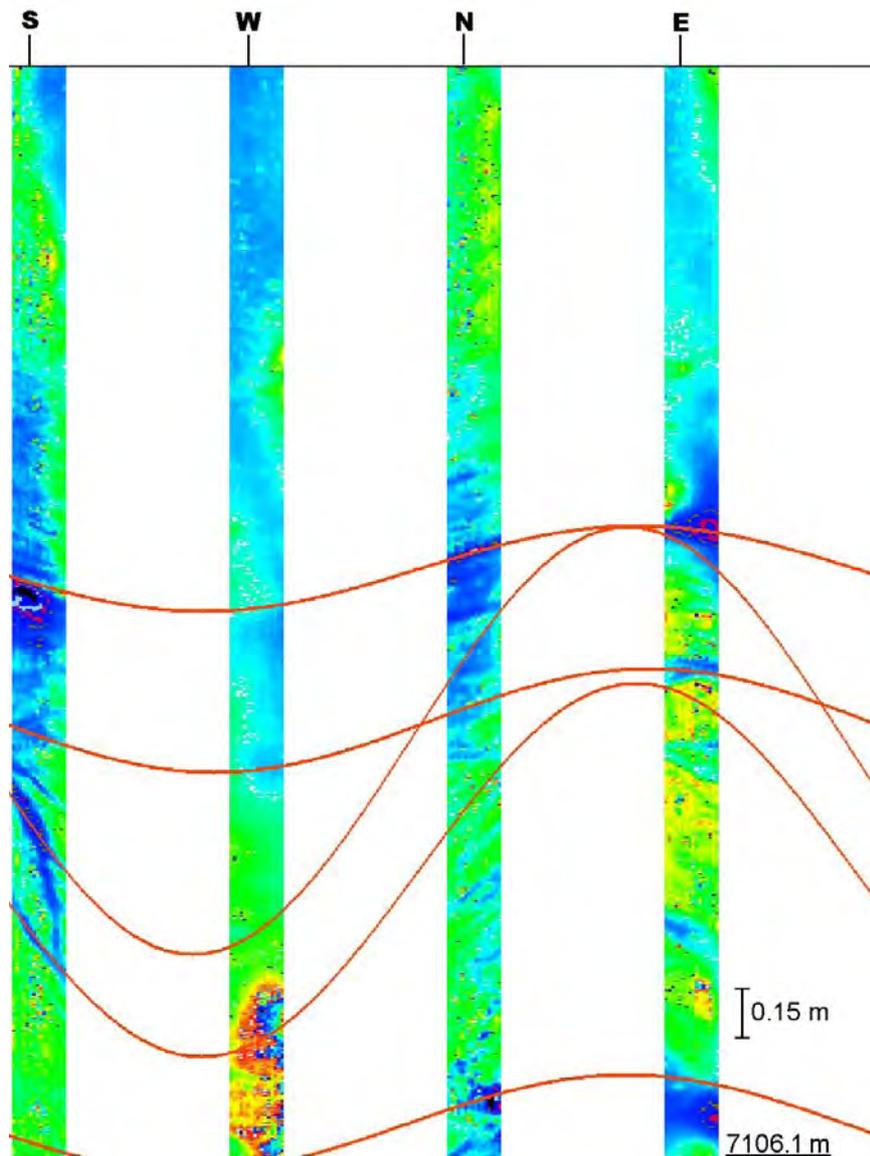


Abb. 3 Abbildung der Bohrlochwand der KTB Hauptbohrung im Teufenbereich von 7103 m bis 7106 m mit Hilfe des Hochtemperatur-Formation-Micro-Scanner (HFMS). Die Skalierung des elektrischen Widerstandes reicht von dunkel blau (gering) bis gelb (hoch). Risse erscheinen als dunkel-blaue Strukturen. Fünf Risse wurden interaktiv markiert und erscheinen als sinusoidale Kurven (aus Zimmermann et al., 2000, Abb. 1; Anlage 3).

Abhängig vom Durchmesser der Bohrung werden Teile der Bohrlochwand von diesem Tool erfasst; bei einem 14.75 Zoll Bohrloch, wie es die KTB-Hauptbohrung im Teufenbereich von 3000m bis 6000m darstellt, sind es ca. 43 %. Das Abbild der Bohrlochwand ist so skaliert, dass höhere Leitfähigkeiten durch hellere Werte repräsentiert werden (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Für größere Tiefen und Temperaturen größer 175 °C wurde ein Hochtemperatur-Tool von Schlumberger mit einer geringeren horizontalen Auflösung verwendet, der Hostile Environment Logging (HEL) Formation Micro Scanner (HFMS). Dieser erreicht eine Überdeckung der Bohrlochwand von 25 % bei einem Bohrdurchmesser von 12.25 Zoll (Abb. 3). Die geometrische Orientierung der Klüfte (Azimut, Dip, Teufe) wird interaktiv bestimmt. Als zusätzliche Eingangsgröße wird aus der Anzahl der Klüfte deren Häufigkeit berechnet. Als zunächst freie Parameter kommen die Kluftlänge und die Kluftöffnungsweite hinzu, die aus den Bohrmessungen nicht direkt bestimmbar sind. Für die Kluftöffnungsweite liegt der Grund hierfür in dem begrenzten Auflösungsvermögen dieser Strukturlogs; das vertikale Auflösungsvermögen ist durch einen Messpunktstand (Pixelgröße in den Abbildern) von 2.5 mm begrenzt. Die zu erwartenden Kluftöffnungsweiten liegen bis zu drei Größenordnungen unter diesem Wert und sind daher nicht direkt bestimmbar. Für die Kluftlängen ist höchstens eine untere Grenze durch den Bohrdurchmesser abzuschätzen, da die Informationen über streichende Klüfte durch die Projektion auf die Bohrlochwand beschränkt sind.

Das Messprinzip des in den Hawaii-Bohrungen (HSDP) eingesetzten Borehole Televiewers (BHTV) beruht auf der Abtastung der Bohrlochwand mit Hilfe eines rotierenden akustischen Signals. Es werden die Laufzeiten und Amplituden des reflektierten Signals gemessen und ergeben sowohl ein geometrisches als auch strukturelles Abbild der Bohrlochwand. Die Strukturen der Bohrlochwand sind durch das Auflösungsvermögen der Bohrlochsonde auf 2.5 mm vertikal begrenzt. Die horizontale Auflösung ist eine Funktion des Bohrdurchmessers (bei einem typischen Kaliber der HSDP2-Bohrung von 8.75 Zoll und einer Abtastrate von 256 Impulsen/Umdrehung erhält man eine horizontale Auflösung von 2.7 mm). Die Häufigkeitsverteilung bzw. die Kluftdichte ist eine Funktion des zu untersuchenden Bohrlochintervalls und kann bis zu einem integralen Wert der gesamten Bohrung führen, deckt also den m-Bereich bis km-Bereich ab. Diese Datenbasis liegt also im makroskopischen bis megaskopischen Skalenbereich.

3.1.3 Seismische Strukturinformationen

Die Seismischen Diskontinuitäten (Reflektoren) sind in Form von interpretierten 2-D Profilen in Netzwerke konvertierbar, um die Geometrie zu quantifizieren (Abb. 4). Sie stellen Netzwerke im regionalen Maßstab dar und erfassen somit die megaskopische Skala (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**).

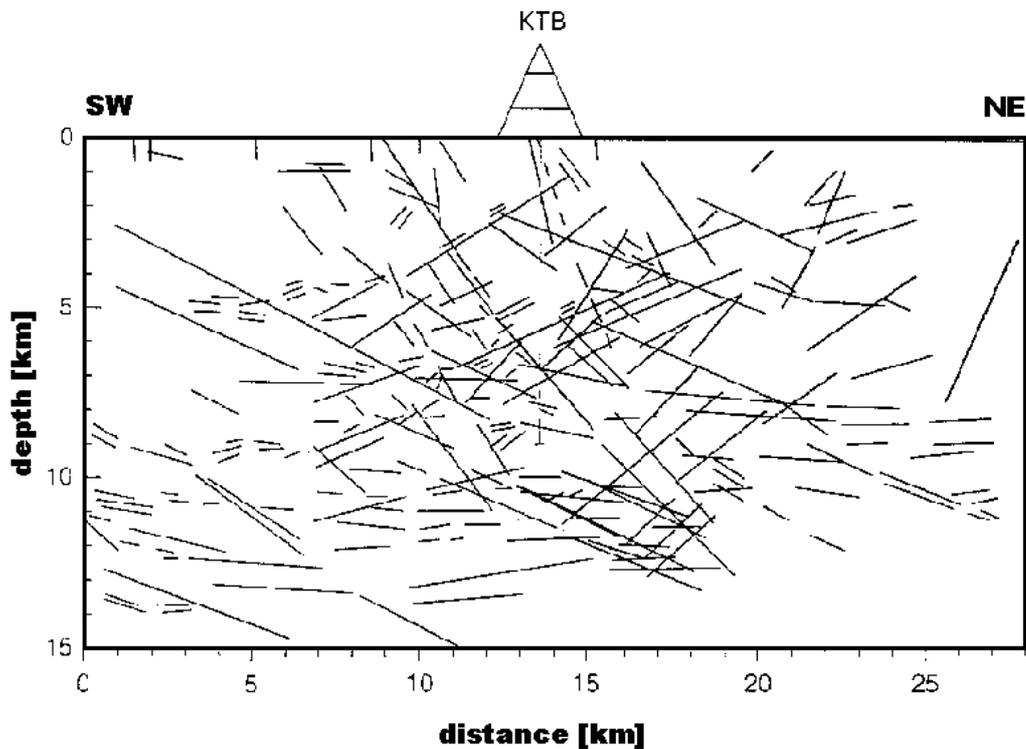


Abb. 4 Seismische Reflektoren im Umfeld der KTB-Bohrungen (nach Emmermann, Lauterjung, 1997).

3.2 Definition der Kenngrößen

Die einzelnen zu bestimmenden Kenngrößen müssen daraufhin untersucht werden, ob es systematische Unterschiede für die einzelnen Skalen gibt und wie diese Unterschiede durch übergeordnete Gesetzmäßigkeiten (fraktale Strukturen) zu beschreiben sind. Folgende Größen sollen bestimmt werden:

- Klufterkennung (Quantifizierung der geometrischen Lage und deren Verteilungsfunktionen)
 - Azimut
 - Inklination
 - Vernetzungsgrad (Konnektivität)
 - Kluftgröße (Erstreckung)
 - Kluftdichte (Häufigkeit)
 - Kluftöffnungsweiten (Aperturen) und Verteilungsfunktionen

- Perkolationsschwelle
- charakteristische Größen der Potenz-Gesetze (scaling laws)

Die geometrischen Parameter, die man aufgrund der Analyse der Dünnschliffe erhält, sind die Kluftanzahl n , die Kluftlänge L und die Kluftrichtungen bezüglich der Schnittlinie. Daraus lässt sich die Flächenhäufigkeit λ_A sowie die lineare Häufigkeit λ_L der Mikrorisse berechnen.

Die hydraulischen Kluftparameter dienen anschließend als Eingangsparameter für Modellrechnungen. Um die Ergebnisse dieser Modellrechnungen einordnen und bewerten zu können, werden sie mit Messergebnissen der Permeabilitätsmessungen verglichen. Hierzu werden einerseits Kernmessungen verwendet (Mikro/Makro-Skala), auf der anderen Seite hydraulische Tests (Makro/Mega-Skala).

Es soll untersucht werden, wie sich die geometrischen Größen und die daraus ableitbaren Größen (z.B. Konnektivität, Perkolationsschwelle) für die einzelnen Skalenbereiche quantitativ unterscheiden, und ob skalenübergreifende Gesetzmäßigkeiten zu erkennen sind. Der Schwerpunkt dieses Arbeitspunktes liegt in der Zusammenstellung von geometrischen Parametern zur Modellierung in den unterschiedlichen Skalenbereichen und in der Untersuchung von deren Einflussnahme auf den Fluidtransport. Es soll versucht werden, in den unterschiedlichen Skalenbereichen im Sinne der Statistik möglichst signifikante Datensätze zu erhalten und zu vergleichen. Daher sollen die untersuchten Objekte einen möglichst großen Skalenbereich abdecken. Daraus entstehen dann komplexe Modelle, die die hydraulischen Wegsamkeiten in den unterschiedlichen Skalenbereichen vereinigen, um so ein möglichst realistisches Abbild der Gegebenheiten zu erhalten.

3.3 Modellierungen

Die Modellierungen gliedern sich in zwei Gruppen, die sich aufgrund der untersuchten Objekte ergeben. Zum einen soll der Fluidtransport der Mikrostrukturen innerhalb der Dünnschliffe modelliert werden, andererseits sollen strukturellen Bohrlochmessungen die Eingangsdaten für die makroskopischen Modelle liefern.

Die Modellierung des Fluidtransports erfolgt mit dem Programmpaket ROCKFLOW (Lege et al., 1996; Kolditz, 2002). Aus diesem Programmpaket wird das Strömungsmodul (SM) verwendet, das auf dem Darcy-Gesetz basiert.

Die individuellen Klüfte werden vereinfachend durch glatte planparallele Kluftflächen approximiert, man vernachlässigt also die Rauigkeit der Klüfte und verwendet eine konstante Apertur, die man als effektive Öffnungsweite einer rauen Kluft interpretieren kann. Untersuchungen über Klüfte mit rauen Oberflächen

und deren Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit findet man bei Tsang & Witherspoon (1983); Tsang (1984); Brown (1987; 1995); Brown & Scholz (1985, 1986); Brown et al. (1986); Brown & Bruhn (1998); Wang et al. (1988); Schmittbuhl et al. (1995); Méheust & Schmittbuhl (2001); Perfettini et al. (2003a, 2003b, 2003c); Madadi et al. (2003); Walsh (2003); Kim & Inoue (2003); Renard et al. (2004). Allgemein kann man Kluffflächen durch die Länge und Breite der Oberfläche beschreiben, die Öffnungsweite oder Apertur und die Orientierung im Raum, die durch das Einfallen (dip) und die Richtung bezüglich der horizontalen Achse (Azimut) der Kluft eindeutig bestimmt ist. Durch Verwendung einer Projektionsebene lässt sich die Beschreibung der im dreidimensionalen Raum eingebetteten Klufffläche in ein zweidimensionales Problem übertragen, welches die Beschreibung der Geometrie der Oberfläche auf die Länge der Kluft bezüglich der Projektionsachse projiziert.

Die Reduktion auf ein zweidimensionales Problem stellt eine Vereinfachung dar, deren Auswirkungen auf die hydraulischen Eigenschaften im Folgenden näher erläutert und diskutiert werden sollen. Zunächst ist der wichtigste Punkt, dass die Reduzierung eines 3-D Netzwerkes auf ein 2-D Problem zu einem resultierenden Netzwerk führen muss, welches weiterhin vernetzt ist. Dieses lässt sich im Falle einer Vorzugsorientierung der Klüfte erreichen, indem die Projektionsebene senkrecht zu dieser Vorzugsorientierung gewählt wird. In diesem Fall ist eine optimale Vernetzung zwischen den Klüften gewährleistet. Existiert keine Vorzugsorientierung, ist die Projektionsebene beliebig zu wählen und es ergibt sich kein Einfluss auf die Vernetzung der Klüfte. Diese Vorgehensweise versagt, falls ein 3-D Netzwerk vernetzt ist, aber alle 2-D Projektionen zu nicht vernetzten Netzwerken führen. Dieses ist die Schwelle, wo die 2-D Konnektivität unterhalb der Perkolationschwelle fällt. Solange man eine 2-D Perkolationswahrscheinlichkeit oberhalb dieser Schwelle erwartet, ist eine 2-D Projektion eine akzeptable Vereinfachung des Problems.

Mit den unterschiedlichen Datensätzen wird der Fluidtransport auf zwei unterschiedliche Arten modelliert. Auf der einen Seite sollen die konkret vorhandenen Kluffnetze verwendet werden, andererseits kann man anhand der Strukturparameter stochastische Netze generieren und modellieren (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Die zweite Vorgehensweise hat den entscheidenden Vorteil, dass man sich auf die Bestimmung der Kluftparameter mit zugehörigen Verteilungen und der Vernetzungsgrade beschränken kann und so von individuellen Lösungen, die nur exemplarischer Natur sein können, zu allgemeinen Lösungen kommt. Für den Mikrobereich, d.h. für die Dünnschliffe, können das Netzwerk und damit die hydraulisch aktiven Wegsamkeiten direkt bestimmt werden, da der effektive Porenraum durch das fluoreszierende Harz in den Dünnschliffen direkt sichtbar ist (z.B. Alexander et al., 1996; Zimmermann et al., 2003, **Anlage 2**). Diese Netzwerke müssen danach in entsprechende Modelle für die Finite Elemente (FE) Modellierung transferiert werden. Man muss also entsprechende Knotenpunkte und die dazugehörigen geometrischen Parameter aus dem realen Netzwerk bestimmen. Die daraus berechnete Permeabilität dieser Netzwerke wird dann mit Permeabilitätsmessungen der entsprechenden Kerne verglichen, um die Richtigkeit dieser Vorgehensweise zu verifizieren.

Mit den vorher bestimmten deskriptiven stochastischen Strukturgrößen, also der Verteilungsfunktion der Kluftöffnungsweite (Apertur), der Kluftdichte, der Konnektivität und den abgeleiteten Größen aus der Perkolations-theorie, lassen sich daraus stochastische Netze für die unterschiedlichen Skalen generieren, die der Natur möglichst entsprechen und hydraulisch äquivalent sein sollen. Das Vorgehen lässt sich folgendermaßen strukturieren:

1. Quantifizierung der Strukturen und Konstruktion von Kluftmodellen auf der Basis der bestimmten Parameter.
2. Modellrechnungen zur Bestimmung der Permeabilität und zur Simulation des hydraulischen Flusses.

4 Allgemeine Informationen zu den Bohrungsprojekten KTB und HSDP

4.1 Das Kontinentale Tiefbohrprogramm (KTB)

Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB) hatte zur Zielsetzung, die Eigenschaften und Prozesse der tiefen kontinentalen Kruste mit Hilfe einer supertiefen Bohrung zu untersuchen (Emmermann & Lauterjung, 1997). Zu diesem Zweck wurde zunächst eine Pilotbohrung abgeteuft (September 1987 bis April 1989; Endteufe 4000,1 m) und im Anschluss erfolgte das Niederbringen der Hauptbohrung (Oktober 1990 bis Oktober 1994), die eine Endteufe von 9101 m erreichte. Abb. 5 zeigt eine Übersicht über die Lithologie und den Bohrungsverlauf der KTB-Hauptbohrung (Harjes et al., 1997).

Zur Untersuchung der hydraulischen Situation in den KTB Bohrungen wurden verschiedene hydraulische Tests durchgeführt (Pusch et al., 1991a, 1991b; Huenges et al., 1997; Huenges & Zimmermann, 1999; **Anlage 1**; McDermott & Kolditz, 2004). Diese kann man grundsätzlich in verschiedene Typen unterteilen, die von dem 'shut-in' Volumen und der Fließrichtung abhängen (Injektion oder Produktion). Die Auswertungen der Druckaufbautests in der KTB-Vorbohrung bis 4000 m und in der KTB-Hauptbohrung in zwei Bereichen bei 6010 m und im Bohrlochtiefsten bei 9101 m ergeben Permeabilitäten zwischen $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ und $3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ und dokumentieren die Streuung der Permeabilität im Bereich der Meter-Skala (Huenges et al, 1997; Huenges & Zimmermann, 1999; **Anlage 1**).

Die Bestimmung der Permeabilität im regionalen Maßstab stellt eine Grundvoraussetzung dar, um Aussagen über potentielle Wegsamkeiten von Fluiden in der oberen Kruste treffen zu können. Wie es sich am Beispiel der KTB-Bohrungen gezeigt hat, ist die Kruste zumindest bis zum Bohrlochtiefsten der KTB-Hauptbohrung nicht trocken und dicht, wie man es vorher erwartet hatte, sondern mit offenen permeablen Klüften durchsetzt, die aktive Wegsamkeiten darstellen (Kessels, 1990; Kessels & Kück, 1995; Huenges et al., 1997). Es lässt sich vermuten, dass die Ausdehnungen der Kluftsysteme regionalen Charakter haben, dieses zeigen auch die hydraulischen Untersuchungen in den KTB-Bohrungen. Durch ein hydraulisches Experiment von Bohrloch zu Bohrloch konnte gezeigt werden, dass möglicherweise ein aktives hydraulisches System zwischen dem Bohrlochtiefsten der Hauptbohrung (9100 m) und der Vorbohrung (4000 m) existiert, welches man vorher nicht erwartet hatte. Darin zeigt sich auch der vermehrte Stellenwert, den man der Größe Permeabilität auch im Kristallin zumessen muss und es ergeben sich daraus entsprechende Konsequenzen für die Modellierung von Transportprozessen in der oberen Kruste.

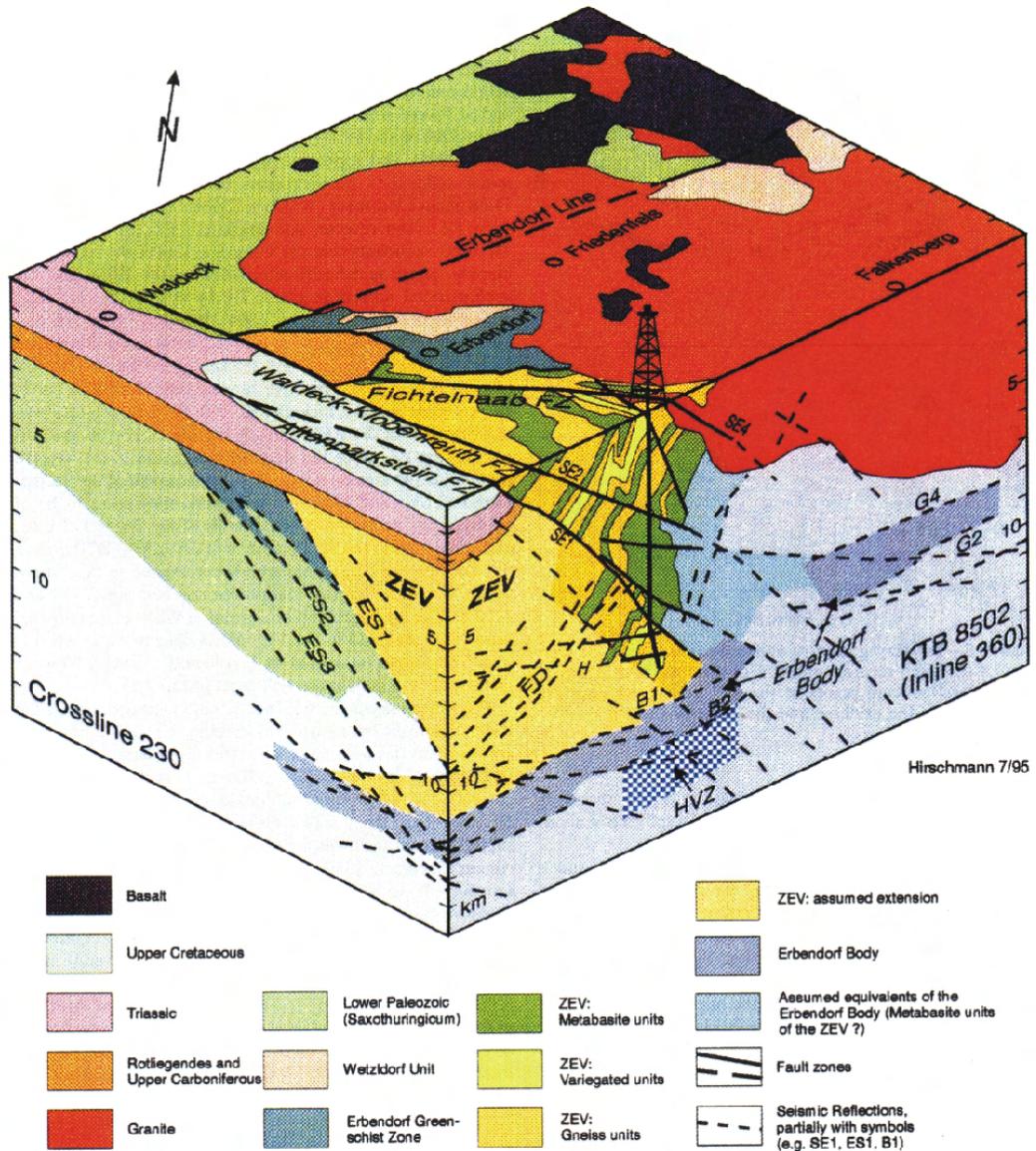


Abb. 5 Lithologisches Profil und Bohrungsverlauf der KTB-Hauptbohrung (aus Harjes et al., 1997)

Die Bestimmung eines integralen Wertes für die makroskopische Permeabilität dient zur Kalibrierung der zu erzeugenden Netzwerkmodelle, um die Freiheitsgrade der einzelnen charakteristischen Parameter, die die hydraulischen Eigenschaften bestimmen, einzuschränken. Daraus lassen sich dann anschließend verallgemeinerte Aussagen über die hydraulische Situation ableiten. Nach dem Absenkttest in der KTB-Hauptbohrung im März 1992 wurden im offenen Bohrlochbereich von 3000 m bis 6000 m Spülungswiderstandsmessungen durchgeführt. Es konnte eine Verringerung des Spülungswiderstandes im Teufenbereich von 3550 m bis 4100 m festgestellt werden, das auf eine saline Zuflusszone in diesem Teufenbereich schließen lässt.

Die Transmissibilität wurde durch 3 unabhängige Messungen bestimmt (Kessels & Kück, 1995). Aufgrund der Volumenzunahme nach Zementierung der Hauptbohrung konnte eine Abschätzung vorgenommen werden. Es ergab sich ein Wert von $T = 1.6 \times 10^{-13} \text{ m}^3$. Die beiden anderen Abschätzungen beruhen auf der Modellierung der Pegelschwankungen in der Vorbohrung (VB) und der Hauptbohrung (HB). Es ergeben sich nahezu identische Werte für beide Bohrungen von $T(\text{VB}) = 2.3 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ und $T(\text{HB}) = 2.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3$. Die Permeabilität k ergibt sich aus dem Quotienten von Transmissibilität T und der Mächtigkeit der hydraulisch aktiven Zone h . Wählt man als Mächtigkeit h das gesamte Intervall der durch die Spülungswiderstandsmessungen bestimmten Zuflusszone ($h = 550 \text{ m}$), lässt sich aus den drei Abschätzungen der Transmissibilität ein Intervall für die mittlere Permeabilität abschätzen zu $k = T / h = [2.9 - 4.4] \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 = [290 \mu\text{D} - 440 \mu\text{D}]$.

Zur Abschätzung potentieller Wegsamkeiten wurde weiterhin ein Konzept zur Bestimmung eines kontinuierlichen Profils der Porosität im Kristallin durch Vergleich von Bohrlochmessungen und Kernmessungen entwickelt (Zimmermann, 1991). Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag in der Untersuchung von Bereichen erhöhter Porosität und der Detektierung von Klüftzonen. Auf der Basis multivariater statistischer Verfahren war es möglich, aktive Zuflusshorizonte zu identifizieren und zu charakterisieren und die Porosität zu quantifizieren, so dass kontinuierliche Porositätsprofile der KTB Vorbohrung (Zimmermann, 1991; Zimmermann et al., 1992a; Zimmermann et al., 1992b) und Hauptbohrung (Zimmermann & Burkhardt, 1995; Burkhardt & Zimmermann, 1995; Pechinig et al., 1997 (zweiter Teil der Publikation) (**Anlage 4**)) erstellt werden konnten (Abb. 6). Diese basieren auf drei unterschiedlichen, sich ergänzenden statistischen Verfahren, den Linearen sowie den Multiplen Regressionen und der Faktorenanalyse. Lineare Regressionen ergeben Zusammenhänge, die auf einem nichtlinearen Ansatz basieren, der dem des Archie-Gesetzes in der Sedimentpetrophysik ähnlich ist, aber nicht entsprechend interpretiert werden kann. Mit diesem Ansatz allein gelingt es im Allgemeinen nicht, eindeutige Aussagen über die Porosität im Kristallin zu erhalten, da die elektrische Leitfähigkeit sowohl petrophysikalischer (Strukturparameter des Porenraums) als auch lithologischer (Vererzung, Graphitisierung etc.) Natur sein kann (ELEKTB, 1997). Erst ergänzende Informationen, wie man sie aus der Multiplen Regression und der Faktorenanalyse erhält, eröffnen die Möglichkeit einer verbesserten Interpretation hinsichtlich dieser

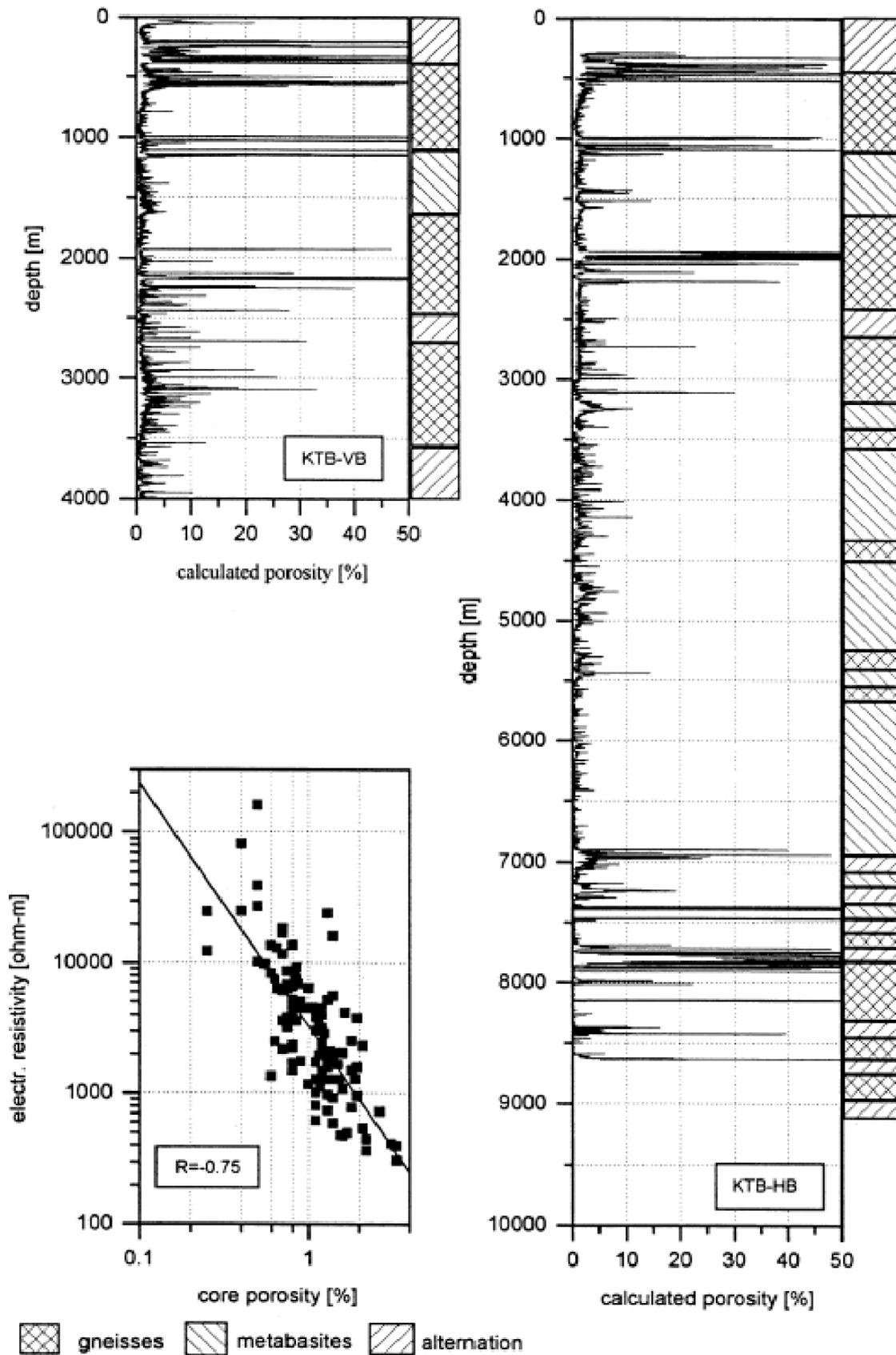


Abb. 6 Kontinuierliche Porositätsprofile der KTB Vor- und Haupt-Bohrung (aus Pechnig et al., 1997, Abb. 14; Anlage 4)

Effekte. Diese Verfahren beinhalten Kombinationen von Bohrlochmessungen, deren individueller Einfluss sowohl ergänzenden als auch aufhebenden Charakter auf das Ergebnis haben kann und so eine zusätzliche Information darstellt.

Während der hydraulischen Stimulationsexperimente (hydraulic fracturing) im Bohrlochtieferen der KTB-Hauptbohrung (Engeser, 1996) induzierten die injizierten Fluide ca. 400 Mikrobeben (Zoback & Harjes, 1997). Diese Daten wurden von Shapiro et al. (1997, 1998, 1999) und Rothert et al. (2003) zur Bestimmung der hydraulischen Diffusivität verwendet, die anschließend eine Abschätzung der Permeabilität ermöglicht. Die Diffusivität konnten sie aus der winkelabhängigen und zeitlichen Verteilung der lokalisierten Mikrobeben abschätzen. Mit dieser Methode erreichten sie eine Abschätzung der hydraulischen Diffusivität in der Größenordnung von $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ unter Berücksichtigung des erhöhten Porendrucks während des Experiments.

Die Permeabilität der Bohrkerne wurde im Labor unter simulierten in situ Bedingungen bestimmt (Berckheimer et al., 1997). Die Größe dieser Bohrkerne lag in der Größenordnung von Zentimetern. Es zeigte sich eine starke Anisotropie der Permeabilität parallel und senkrecht zur Foliationsachse. Mittlere Werte liegen bei $1.4 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ parallel und $7.6 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ senkrecht zur Foliationsachse unter Berücksichtigung der Log-Normalverteilung der Messwerte. Diese Daten repräsentieren Matrixpermeabilitäten eines geklüfteten Gesteins, also eine Permeabilität in der mikroskopischen Skala, die bis zu 3 Größenordnungen von den Ergebnissen der hydraulischen Tests abweicht. Daraus ist direkt zu folgern, dass für diesen Datensatz kein repräsentatives Elementarvolumen (REV) in dieser Skala existieren kann.

Die Druckabhängigkeit der Permeabilität der Kernproben wurde in einem Autoklaven unter allseitigem Druck von bis zu 240 MPa gemessen (Millich et al., 1998). Für die darüber liegende Skala im Bereich der Dimension des Bohrlochs wurde die Druckabhängigkeit aus den Injektionstests abgeschätzt (Huenges et al., 1997). Es ergeben sich Unterschiede, die bis zu 3 Größenordnungen zwischen den Kernmessungen und den Bohrlochtests betragen. Die stärkere Druckabhängigkeit der in situ Messungen im Bohrloch ist ein Indiz für das schwächere mechanische Verhalten der makroskopischen Kluftsysteme im Gegensatz zu den kompakten mikroskopischen Strukturen in den Laborproben. Das mechanische Verhalten wird durch die Häufigkeit und Größe der Risse und Klüfte beeinflusst (Kessels & Kück, 1995).

Aus den Ergebnissen der hydraulischen Experimente in den einzelnen Teufenabschnitten der Hauptbohrung konnte ein durchschnittlicher Druckgradient von 11.5 MPa/km abgeschätzt werden (Huenges et al., 1997). Eine entsprechende Wassersäule mit frischem Wasser ergibt einen Gradienten von 9.5 MPa/km . Diese Differenz lässt sich möglicherweise ausschließlich durch die Salinität der Spülung erklären. Man findet einen Anstieg der Salinität in der Übergangszone unterhalb 2000 m und unterhalb 6000 m aufgrund eines vertikal korrespondierenden Kluftsystems zwischen 4000 m und 9000 m. Unter dieser Annahme kann die

Zunahme des Formationsdrucks durch die Dichteänderung aufgrund der Salinität erklärt werden und lässt auf hydrostatische Bedingungen bis zum Bohrlochtiefsten schließen.

Fluideinschlüsse in den Mineralen geben einen Einblick in die Zusammensetzung der Fluide und spiegeln den in situ Druck als Funktion der Tiefe wider. Grawinkel & Stöckert (1997) untersuchten ca. 250 Einschlüsse aus 9 Kernproben aus allen Tiefenbereichen bis 9000 m. Ihre Ergebnisse zeigen Fluideinschlüsse im oberen Teufenabschnitt bis 4000 m, die sich durch eine geringe Salinität auszeichnen (< 4 % NaCl äquiv.) und NaCl dominiert sind. In den tieferen Abschnitten sind die Fluidenschlüsse durch CaCl dominiert und zeigen eine höhere Salinität von bis zu 24 % NaCl äquiv. Die Isochorenanalyse ergab für die Fluideinschlüsse einen hydrostatischen Porendruck bis zum Bohrlochtiefsten bei 9000 m und deckt sich mit den Ergebnissen von Huenges et al. (1997) zur Interpretation des Formationsdrucks.

Aus den oben genannten Ergebnissen lässt sich der Schluss ziehen, dass es sich im Umfeld der KTB um ein Regime mit einem hydrostatischen Formationsdruck bis zum Bohrlochtiefsten handelt und dass sich dieses möglicherweise auf die obere Kruste in diesem regionalen Bereich übertragen lässt. Diese Überlegungen werden im mikroskopischen Bereich durch Fluideinschlüsse als auch im makroskopischen Bereich durch hydraulische Untersuchungen gestützt.

4.2 Das Hawaiianische Bohrungsprojekt (HSDP)

Die Hauptzielsetzung des Hawaiianischen Bohrungsprojekts (Hawaii Scientific Drilling Project (HSDP)) ist die Bestimmung der stratigraphischen Abfolge der Lavaflüsse zur Untersuchung der Strukturen des Mantel Plumes und der magmatischen Prozesse (De Paolo et al., 2001). Zu diesem Zweck sollten die geplanten Bohrungen vollständig gekernt werden. Das Programm des HSDP (Stolper et al., 1996) gliedert sich in 3 Phasen. In der ersten Phase wurde eine Pilot-Bohrung in der Nähe von Hilo niedergebracht (Kahi Puka 1, oder KP1), die eine Endteufe von 1056 m erreichte. In der 2. Phase wurde 1999 die HSDP2-Bohrung niedergebracht (Abb. 7), die eine Endteufe von 3109 mbsl (meter below sea level) erreichte. Im Jahr 2003 sollte die Bohrung eigentlich vertieft werden; dazu wurde zunächst das offene Bohrlochintervall von 1829 mbsl bis 3098 mbsl auf einen Durchmesser von ca. 17 cm erweitert. Zu einer Vertiefung der Bohrung ist es seither aus operativen Gründen nicht gekommen. Abb. 8 zeigt die stratigraphische und lithologische Abfolge der HSDP2-Bohrung (DePaolo et al., 2001).

Die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen in der Pilotbohrung KP1 (detaillierte Übersicht in Paillet & Thomas, 1996; Thomas et al., 1996) lassen sich folgendermaßen skizzieren:

- Existenz verschiedener Zonen mit unterschiedlichen Durchschnittstemperaturen und Salinitäten
- tiefer Aquifer (unterhalb 710 m im Bereich der zum damaligen Zeitraum offenen Bohrung) enthält Meerwasser mit Temperaturen, die dem offenen Meerwasser in gleicher Tiefe entsprechen; Aquifer-Transmissivität liegt bei ca. 10^{-3} m²/s
- Süßwasser-Aquifer am Übergang Mauna Kea/Mauna Loa (280 m); Mächtigkeit etwa 200 m

Diese Ergebnisse führten zur Konstruktion eines regionalen hydrogeologischen Modells (Paillet & Thomas, 1996; Thomas et al., 1996).

Die stratigraphische Abfolge der HSDP2-Bohrung (Abb. 8; eine Übersicht gibt De Paolo et al., 2001) lässt sich generell in den subaerischen Bereich bis ca. 1090 m und den darunter liegenden submarinen Bereich unterteilen. Im subaerischen Bereich findet man Wechselfolgen von Aa- und Pahoehoe-Lavaflüssen, im Bereich der submarinen Zone handelt es sich um Abfolgen von Hyaloklastiten mit eingeschalteten Pillowbasalten und massigen Basalten bis zur Teufe von 3109 m (Pechnig et al., 2000; Buysch et al., 2000).

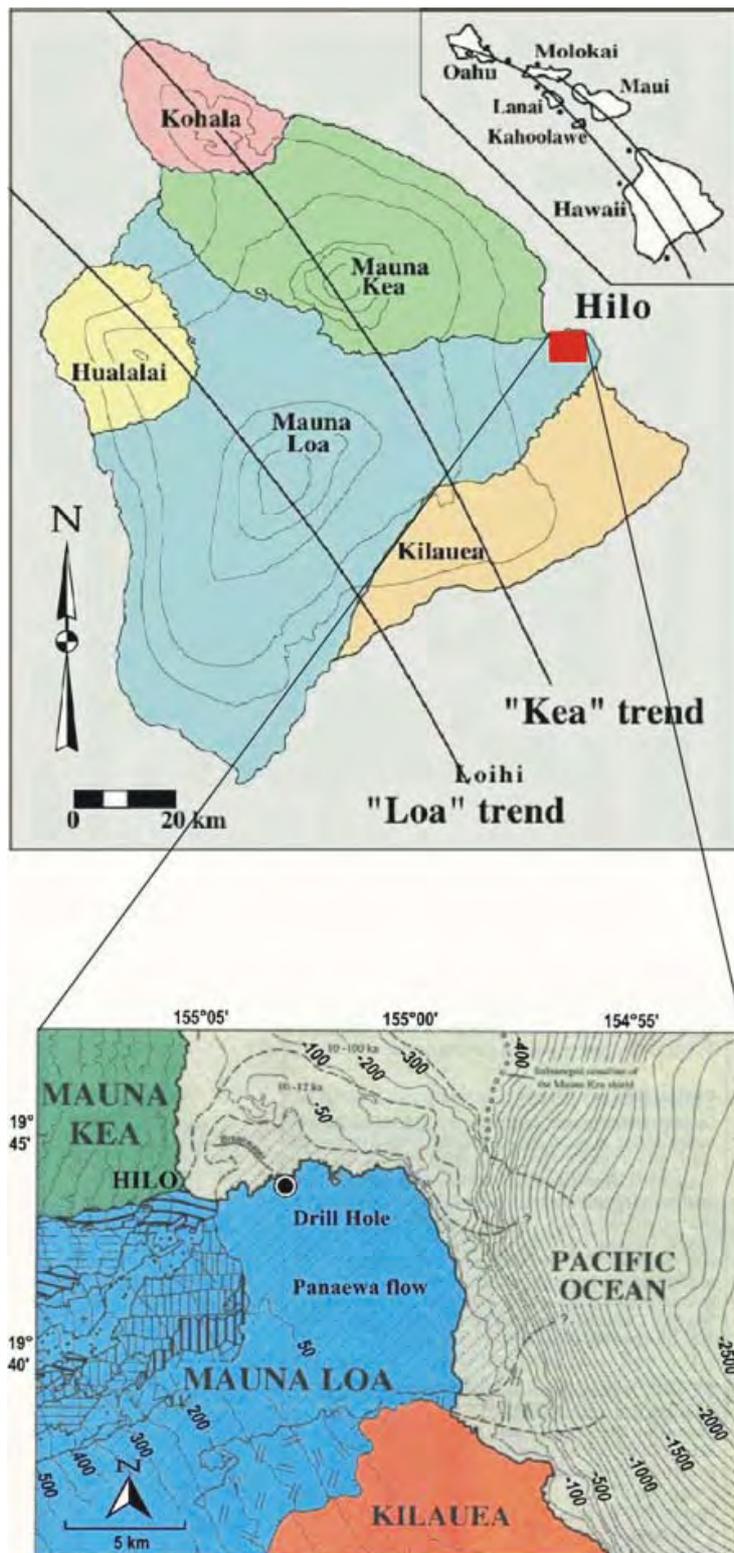


Abb. 7 Lokation der Bohrung des Hawaii Scientific Drilling Projects (HSDP). Die Ausdehnung der einzelnen Vulkane ist durch die unterschiedlichen Farben gekennzeichnet (De Paolo et al., 2001).

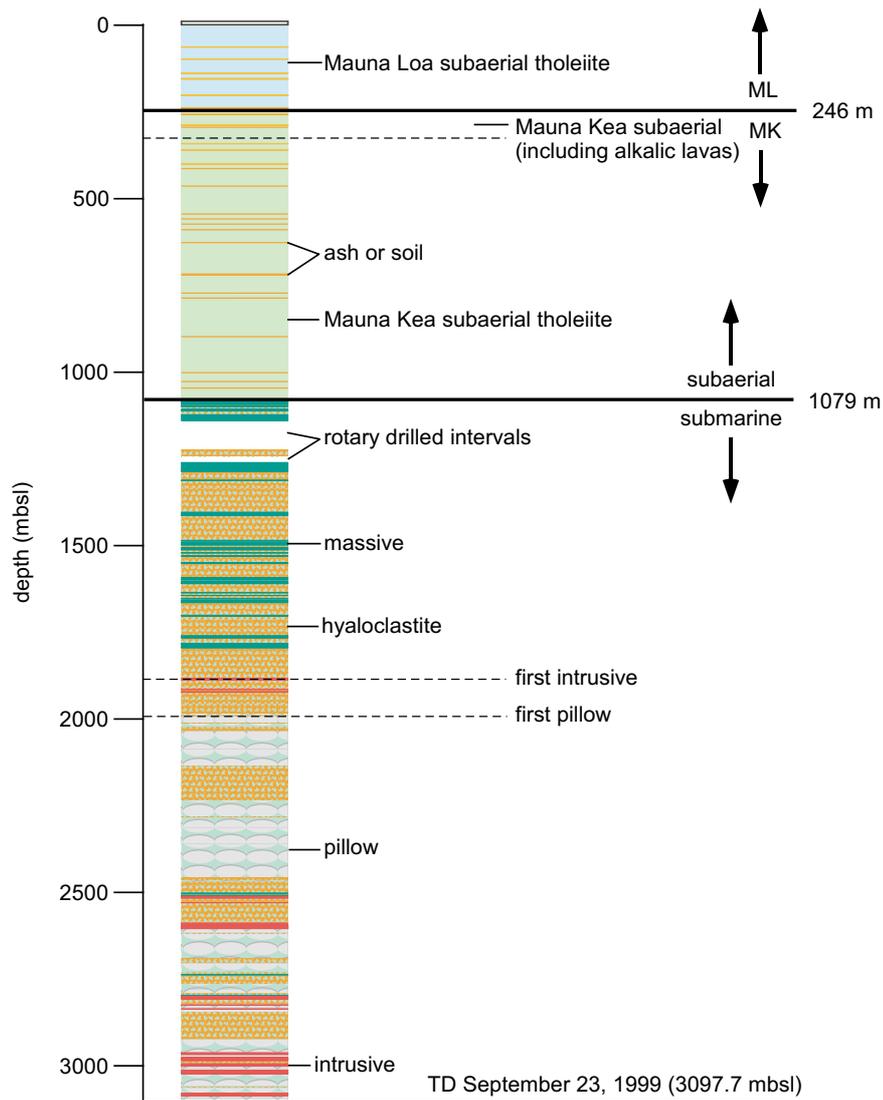


Abb. 8 Stratigrafische und lithologische Abfolge der HSDP2 Bohrung (DePaolo et al., 2001)

Die petrophysikalischen hydraulisch relevanten Eigenschaften Porosität und Permeabilität wurden an 34 Bohrkernen bestimmt (Dannowski, 2002; Büttner & Huenges, 2003). Die Porositäten variieren im oberen Bereich der Bohrung bis 1700 m zwischen 4 % und 52 % und zeigen die bekannte Variabilität der basaltischen Gesteine aufgrund deren unterschiedlichen Blasenstruktur (Saar & Manga, 1999). Ab einer Teufe von 1700 m reduziert sich die Porosität auf Werte unter 12 %, da hier keine Blasenbildung mehr auftritt (Dannowski, 2002). Die Permeabilitäten liegen im oberen Abschnitt der Bohrung bis 1079 m (subaerischer Bereich) zwischen $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ und $2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$. Im submarinen Bereich unterhalb von 1079 m besitzen die Hyaloklastite eine mittlere Permeabilität von $7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ und die kompakten Pillow-Laven eine geringe mittlere Permeabilität von $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ (Dannowski, 2002).

Die Beschreibung der hydraulischen Wegsamkeiten in den Hawaii Bohrungen unterscheidet sich elementar von denen der kristallinen Gesteine in der KTB. Im Kristallin der KTB lassen sich die hydraulischen Wegsamkeiten in den unterschiedlichen Skalen durch Klüfte und Kluftsysteme beschreiben, deren Ursache tektonischen Ursprungs ist und deren Orientierungen auf dem Rezenten- und dem Paläo- Spannungsfeld beruht. In der Hawaii Bohrung hingegen entstehen Kluftstrukturen durch Kontaktflächen zwischen Lavaströmen und durch Abkühlungsvorgänge, die zur Rissbildung führen.

Eine Übersicht über Abschätzungen der Permeabilität in basaltischen ozeanischen Krustengesteinen, die mit den erbohrten lithologischen Einheiten der Hawaii-Bohrung vergleichbar sind, geben Fisher (1998) und Van Everdingen (1995). Auch hier zeigt sich der Skaleneffekt der Permeabilität. Zwischen gemessenen Permeabilitäten an Kernen und den hydraulischen Tests können mehrere Größenordnungen liegen.

Im subaerischen Bereich der Hawaii-Bohrung HSDP2 lassen sich die Kontaktflächen zwischen den Lavaflüssen jedoch auch durch geometrische Strukturen beschreiben, die denen von Kluftflächen ähnlich sind. Man kann sie daher auch als Klüfte bezeichnen, auch wenn deren Ursache sich von den Kluftsystemen im Kristallin unterscheidet. Die Wirkungsweise und die hydraulischen Eigenschaften sind vergleichbar mit denen von Klüften und Kluftsystemen, daher ist das vorliegende Konzept in diesen Bereichen anwendbar.

Morin & Paillet (1996) beschreiben Klüfte in der KP-1 Bohrung (erste Phase des HSDP), die sie mit Borehole Televiewer Aufnahmen (BHTV) detektieren konnten. Die Bohrung erreichte eine Endteufe von 1056 m, und es wurden ausschließlich subaerische Lavaströme erbohrt. Morin & Paillet (1996) konnten 283 individuelle Klüfte identifizieren und deren Orientierungen bestimmen. Unter der Annahme, dass die meisten der steil einfallenden Klüfte während der Ablagerung und Abkühlung innerhalb der basaltischen Lavaflüsse entstanden sind, ließ sich die zeitliche Abfolge der Entwicklung der Mauna Loa und Mauna Kea Basalte über die letzten 400 kJahre rekonstruieren und die Orientierung der Klüfte bestimmen, die im wesentlichen parallel zur Topographie oder zur Küstenlinie liegen.

Im submarinen Bereich der Bohrung HDSP2 kann man zwischen den Pillow-Basalten und massigen basaltischen Lavaflüssen auf der einen Seite und den Hyaloklastiten auf der anderen Seite unterscheiden. In den Pillow-Basalten zeigen sich Klüfte im makroskopischen Maßstab; hier handelt es sich um Klüfte aus Abkühlungsvorgängen, die zur Rissbildung geführt haben und einen wesentlichen Beitrag zum Fluidtransport liefern können.

Im offenen Bohrlochintervall wurde nach der Kalibrierung im Jahr 2003 ein Borehole Televiewer-Log (BHTV) gefahren, um Aussagen über Klüfte und deren Orientierung sowie Bohrlochrandausbrüche (breakouts) zu gewinnen (Morin & Wilkens, 2005). Es wurden insgesamt 247 Klüfte identifiziert. Das Streichen der flach einfallenden Klüfte zeigt keine ausgeprägte Vorzugsorientierung, jedoch die steil

einfallenden Klüfte mit einem mittleren Dip-Winkel von 69° streichen die Bohrung bei ca. $S24^\circ W$ (Morin, Wilkens, 2005). Die Bohrlochrandausbrüche treten hauptsächlich in den massiven und hyaloklastischen Gesteinen auf; die Klufthäufigkeit ist dort sehr gering. Die Orientierung der Bohrlochrandausbrüche ist in Ost-West Richtung und identifiziert somit die Richtung der minimalen horizontalen Hauptspannung (z. B. Brudy et al., 1997). Die Orientierung der maximalen horizontalen Hauptspannung ist demzufolge Nord-Süd.

Die Hyaloklastite gehören zu den vulkanischen Sedimenten mit einer vesikulären Porenraumstruktur, die dem sedimentären Porenraum strukturell ähnlich ist. Eine Auswertung mit dem hier vorliegenden Konzept ist daher nicht möglich. Die hydraulischen Eigenschaften der Hyaloklastite sollten durch Modellvorstellungen basierend auf der Kozeny-Carman-Gleichung (Porositäts-Permeabilitäts-Relation in Kugelmodellen) zu beschreiben sein. Saar & Manga (1999) zeigen jedoch für vesikuläre Basalte, dass auch dieses Standardverfahren für granulare Gesteine nicht ohne weiteres auf vesikuläre Gesteine übertragbar ist. Speziell die Permeabilität ist im Wesentlichen durch die 'Porenhäse' (z.B. Revil & Cathles, 1999) beeinflusst, eine Abschätzung mit der Kozeny-Carman-Gleichung ergab Abweichungen von 4 Größenordnungen.

Im Weiteren werden die zu untersuchenden Objekte im subaerischen Bereich und im Bereich der Pillow-Basalte und der massigen basaltischen Lavaflüsse als 'Klüfte' bezeichnet, die Unterschiede zum Kristallin sollten dabei aber berücksichtigt werden. Verallgemeinert kann man auch von planaren Diskontinuitäten sprechen, die durch einfache geometrische Parameter beschreibbar sind.

5 Skalenvarianz der hydraulischen Eigenschaften

5.1 Mikroskopische Skala

5.1.1 Fluoreszierende Dünnschliffe der KTB-Bohrung

Die Bestimmung der Kluftöffnungsweiten der Dünnschliffe stellt eine kritische Größe dar, auch aufgrund der Tatsache, dass sie zur 3. Potenz in die makroskopische Permeabilität eingeht (wird in der Literatur als kubisches Gesetz (cubic-law) bezeichnet; Guéguen, Palciauskas 1994; Priest, 1993). Die fluoreszierenden sichtbaren Strukturen zeigen im Allgemeinen nicht die exakte Größe der Mikrorisse, wenn diese in der Größenordnung des Auflösungsvermögens des Mikroskops liegen. Die Leuchtkraft des fluoreszierenden Aufhellers ermöglicht hier das Erkennen von Strukturen unterhalb des Auflösungsvermögens, auch wenn diese nicht mehr im Detail auflösbar sind und man einen integralen Effekt sieht, der größere Risse suggeriert (Abb. 9). Daher kann die wahre Öffnungsweite der einzelnen Risse nur durch das Auflösungsvermögen des Mikroskops nach unten abgeschätzt werden (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Man erkennt dort einzelne Risse, die durch eine Breite von einem Pixel aufgelöst werden und daher eine Öffnungsweite in dieser Größe oder kleiner besitzen. Man muss also davon ausgehen, dass man im Allgemeinen nur eine obere Schwelle der Kluftöffnungsweiten bestimmen kann und daher eine Variation dieser Öffnungsweite in die Modellierung integrieren muss. Aus diesem Grund wurden verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Kluftöffnungsweiten und Verteilungsfunktionen erstellt und der hydraulische Fluss simuliert. Hier wurde zunächst von einer mittleren Kluftöffnungsweite von $1\mu\text{m}$ ausgegangen und diese zwischen den einzelnen Knotenpunkten stochastisch variiert. Da das kubische Gesetz natürlich auch weiterhin für die stochastischen Netze gilt, ist eine Berechnung bei anderen mittleren Kluftöffnungsweiten direkt analytisch durchführbar.

Die exponentielle Verteilungsfunktion stellt gegenüber den anderen getesteten Verteilungsfunktionen für die Kluftöffnungsweiten eine bevorzugte Verteilungsfunktion dar, da sie Eigenschaften besitzt, die auch in der Natur bevorzugt vorkommen (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Es handelt sich um eine schiefsymmetrische Verteilung, mit einer größeren Häufigkeit bei kleinen Öffnungsweiten; dieses stellt eine allgemeine Gesetzmäßigkeit in der Natur dar, dass kleine Strukturen häufiger anzutreffen sind als große Strukturen. Trifft dieses für unterschiedliche Skalen zu, spricht man von einem fraktalen Modell. Lässt man hier jedoch die Strukturen über alle Grenzen wachsen, also beliebig klein werden, ergeben sich Probleme mit den Häufigkeiten. Man benötigt also weitere Parameter, die diese Skalengrenzen beschreiben; man spricht hier auch von den Grenzen der Selbstähnlichkeit. Der Vorteil der exponentiellen Verteilungsfunktion gegenüber diesem Ansatz liegt darin, dass ein charakteristischer Parameter für die Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsdichte ausreicht.

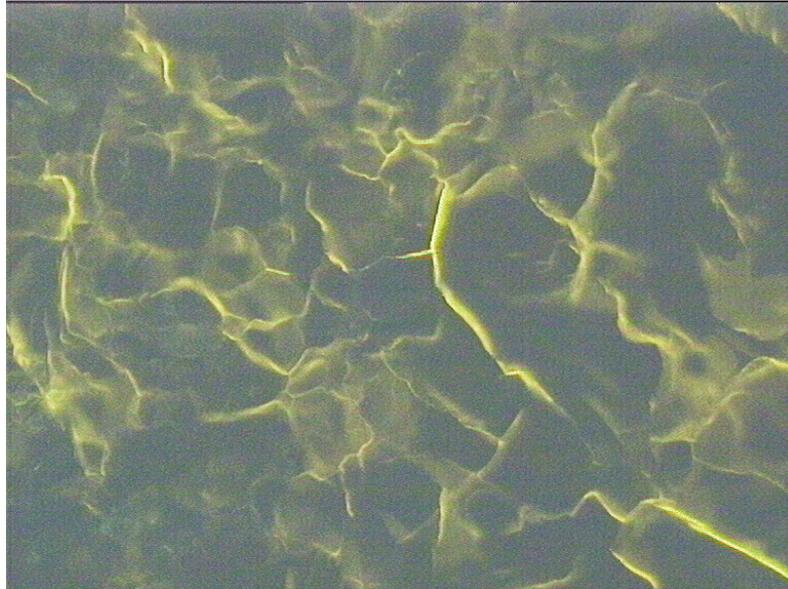


Abb. 9 Fluoreszierender Dünnschliff aus einem Bohrkern der KTB-Hauptbohrung aus 4592 m (aus Zimmermann et al., 2003, Abb. 1; Anlage 2)

Die Ergebnisse der statistischen Analysen der Dünnschliffe zeigen keinen signifikanten Unterschied in der mittleren Kluftlänge sowie deren statistischen Verteilung. Es handelt sich um eine Verteilungsfunktion, die man am ehesten als Exponentialverteilung beschreiben kann, wenn man berücksichtigt, dass unterhalb einer unteren Schwelle eine Detektion von Rissen nicht mehr möglich ist und daher die Verteilung gegen Null strebt (Abb. 10). Dabei handelt es sich um eine untere subjektive Schwelle, die durch das Auflösungsvermögen und durch den Bearbeiter individuell variiert. In erster Näherung ist jedoch der Erwartungswert der Gauss-Verteilung, also der herkömmliche Mittelwert, für die Charakterisierung der mittleren Kluftlänge ausreichend. Bei der Richtungsabhängigkeit der Mikrorisse zeigen sich generell zwei Vorzugsrichtungen in allen untersuchten Dünnschliffen. Diese sind durch zwei Häufungspunkte in den Histogrammen charakterisiert (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Diese Vorzugsrichtungen der Risse sind ein Merkmal, das auch makroskopisch bei der Erstellung stochastischer Netzwerke auf Basis von Auswertungen von Bohrlochmessungen auftritt (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Hier ist das rezente Spannungsfeld die bestimmende Größe für die Vorzugsorientierung von Klüften. Nach Untersuchungen von Vollbrecht & Weber (1992) und Vollbrecht et al. (1993, 1994), die Orientierungsmuster an Dünnschliffen der KTB und Graniten im Umfeld der KTB untersucht haben, sind die Vorzugsorientierungen in Dünnschliffen Indikatoren für Paläo-Spannungsrichtungen und unterscheiden sich signifikant vom in situ Spannungsfeld.

Aufgrund dieser Vorüberlegungen wurde daher in den weiteren Modellierungen die exponentielle Verteilungsfunktion verwendet. Aus den digitalisierten Ausschnitten der Dünnschliffe wurde für die hydraulische Modellierung ein Netzwerk ausgewählt, das durchgängige Mikrorisse, also ein permeables

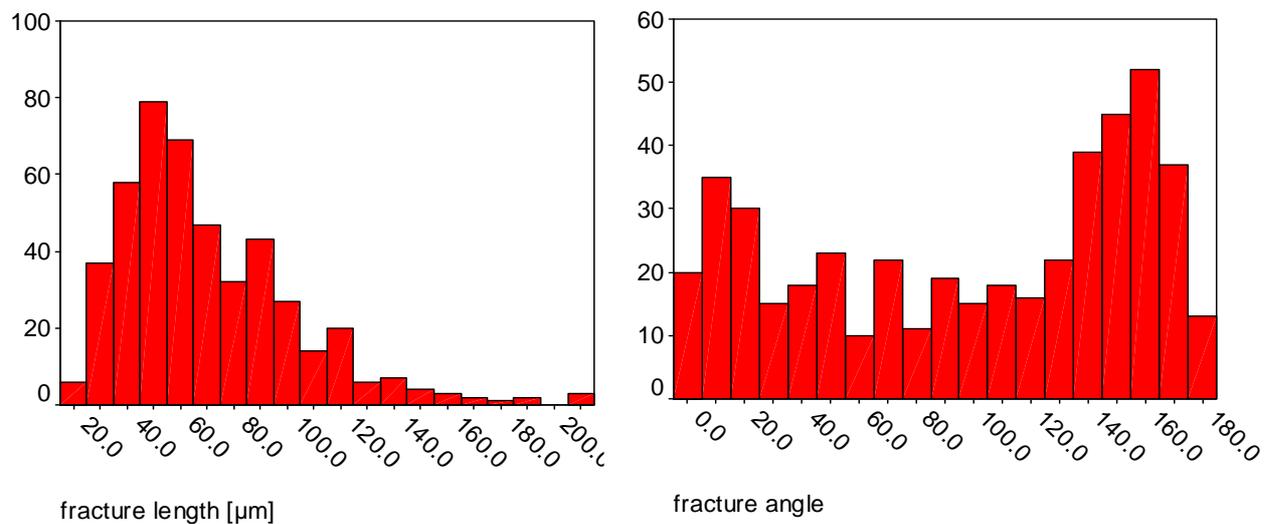


Abb. 10 Histogramme der Kluftlängen und der Orientierungen der Klüfte (aus Zimmermann et al., 2003, Abb. 2; Anlage 2)

Netzwerk, besitzt. Dieses Netzwerk ist jedoch nur permeabel in Normalenrichtung zur definierten Schnittlinie. Parallel zur Schnittlinie ergibt sich keine durchgängige Vernetzung der detektierten Mikrorisse. Es wurden 20 Modellierungen unter stochastischer Variation der Kluftöffnungsweiten (mit einem Erwartungswert von $0.5 \mu\text{m}$) durchgeführt (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Dieses wird praktisch so umgesetzt, dass man die Verbindungen zwischen den einzelnen Knotenpunkten mit individuellen hydraulischen Leitfähigkeiten belegt und so ein stochastisches Netzwerk aufbaut. Es zeigt sich eine erhebliche Streuung der Ergebnisse, die sich über mehrere Größenordnungen erstreckt. Die Ursache hierfür ist die nicht lineare Verteilung der Kluftöffnungsweiten und das damit verbundene kubische Gesetz der Permeabilität. Ein weiterer Grund besteht darin, dass dieses Netzwerk an der Grenze der Perkolationschwelle durchlässig ist, und daher einige wenige Verbindungen innerhalb des Netzwerkes den Fluidtransport bestimmen. Werden diese Verbindungen stochastisch mit geringen Durchlässigkeiten belegt, erhält das gesamte Netzwerk eine geringe Durchlässigkeit; gleiches gilt auch im gegenteiligen Fall. Um das Ergebnis der Modellierungen einschätzen zu können, fehlt noch ein Vergleich mit den gemessenen Kern-Permeabilitäten. Der Erwartungswert der Permeabilitätsmodellierungen unter der Annahme einer Log-Normalverteilung (logarithmische Skalierung) und einer mittleren Kluftöffnungsweite von $0.5 \mu\text{m}$ liegt bei $1.5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ (150 nDarcy) mit einer Streuung von einer Größenordnung. Die am Bohrkern bestimmte Permeabilität bei einem Umschließungsdruck (confining pressure) von 10 MPa und unter stationären Bedingungen beträgt $4 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ (40 nDarcy); dieses entspricht vice versa einer mittleren Kluftöffnungsweite von $0.332 \mu\text{m}$ (Zimmermann et al., 2003, **Anlage 2**).

Für acht verschiedene Dünnschliffe wurden die geometrischen Parameter Kluftanzahl und mittlere Kluftlänge bestimmt und daraus der Perkulationsparameter berechnet (Zimmermann et al., 2003, **Anlage 2**). Vier dieser Netzwerke besitzen kein zusammenhängendes Netzwerk und sind demzufolge hydraulisch impermeabel. Es zeigt sich, dass alle Netzwerke mit einem Perkulationsparameter > 1.3 vernetzt sind. Bour & Davy (1997) geben einen theoretischen kritischen Perkulationsparameter von 5.6 an, diese Größe ist jedoch ein Grenzwert für unendlich ausgedehnte 2-D Netzwerke mit konstanten Kluftlängen und zufallsverteilten Orientierungen der Klüfte. Die hier untersuchten Dünnschliffe zeigen jedoch eine Log-Normalverteilung der Kluftlängen und Vorzugsorientierungen der Klüfte. Daher sind schon bei einem geringeren Perkulationsparameter die Netzwerke permeabel.

5.1.2 Fluoreszierende Dünnschliffe der HSDP2-Bohrung

Zur Beschreibung der Mikroskala der Hawaii-Bohrung HSDP2 wurden fluoreszierende Dünnschliffe untersucht und die geometrischen Parameter, die die Mikrorisse im Gestein charakterisieren, bestimmt (Zimmermann et al., 2005; **Anlage 5**). Die hellen Strukturen in den Abbildungen stellen die Bereiche dar, in denen das Epoxydharz eingedrungen ist. Dieses wird unter dem Mikroskop bei fluoreszierendem Licht sichtbar. Der erste Dünnschliff stammt von einem Kern aus 814 mbsl (meter below sea level) und wurde als Pahoe-hoe-Lava charakterisiert (DePaolo et al., 2001)(Abb. 11). Die petrophysikalischen Untersuchungen ergaben eine Porosität von 30 % und eine Gas-Permeabilität von 10^{-17} m^2 (10 μDarcy) (Dannowski (2002); Büttner & Huenges (2003)). Diese hohe Porosität bei gleichzeitiger relativ geringer Permeabilität lässt sich nicht durch die bekannte Kozeny-Carman-Gleichung erklären, die einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Porosität und der Permeabilität herstellt (z.B. Pape et al., 1999; 2000). Der Porenraum, der sich hier in Form von vesikulären Strukturen zeigt, scheint nur durch Mikrorisse verbunden zu sein, die dann den Fluidtransport bestimmen und zu dieser geringen Permeabilität führen. Die Vesikel dienen demnach nur zur Speicherung. Das Gleiche gilt auch für den zweiten Dünnschliff (Abb. 12), hier erhält man eine Porosität von 16.6 % bei einer Gas-Permeabilität von 10^{-17} m^2 (10 μDarcy). Bei diesem Kern handelt es sich um massiven Basalt aus dem Teufenbereich von 1088 mbsl (DePaolo et al., 2001). Um die Hypothese zu überprüfen, ob die Mikrorisse, die diese vesikulären Strukturen verbinden, die gemessene Permeabilität erklären können, wurde der hydraulische Fluss durch die Mikrorisse mit Hilfe eines Finite Elemente Netzes simuliert. Es handelt sich bei dem untersuchten Ausschnitt um einen Olivinkristall, der durchsetzt ist mit Mikrorissen. Umgeben ist dieser von einem Konglomerat von Feldspäten, in denen das fluoreszierende Harz nicht eingedrungen ist. Diese Bereiche kann man daher im Vergleich zu den Wegsamkeiten im Olivin als impermeabel betrachten.

Die Berechnung des hydraulischen Flusses erfolgte von der Oberseite zur Unterseite des Olivinkristalls (Zimmermann et al., 2005; **Anlage 5**). Die Seiten rechts und links wurden als nicht durchlässig vorgegeben (noflow boundaries). Zunächst wurde allen Verbindungslinien (1D-Elemente) die gleiche Durchlässigkeit

zugeordnet, welches gleichbedeutend mit einer konstanten Kluftöffnungsweite (Apertur) ist. Als konstante Apertur wurde $1\ \mu\text{m}$ gewählt und ergab eine Permeabilität von $1.74\ 10^{-16}\ \text{m}^2$ ($174\ \mu\text{Darcy}$). Verwendet man wie bei den KTB-Dünnschliffen eine exponentiale Verteilungsfunktion für die Apertur mit gleichem

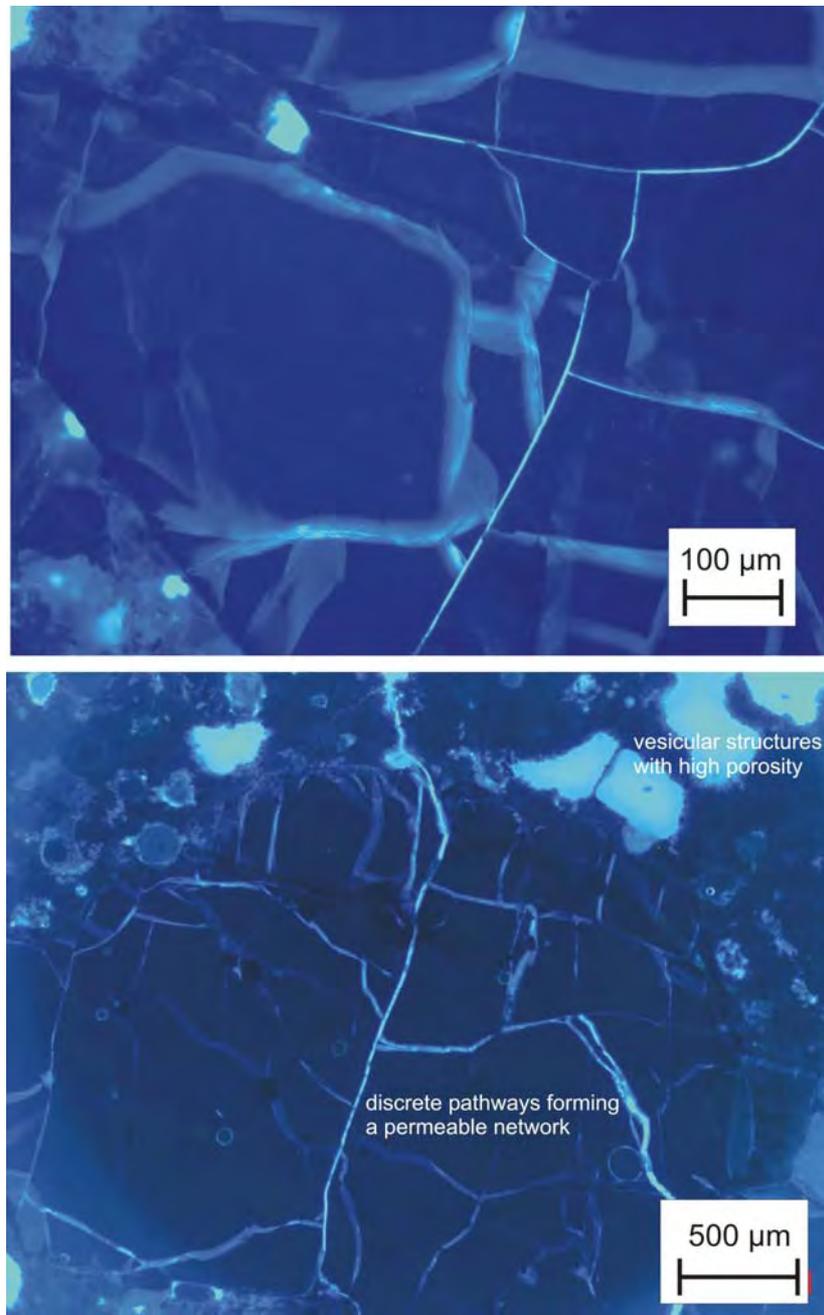


Abb. 11 Fluoreszierender Dünnschliff aus der Hawaii Bohrung HSDP2 (Pahoehoe-Lava aus 814 mbsl) (aus Zimmermann et al., 2005, Abb. 1; Anlage 5). Die hohe Porosität von 30 % beruht auf den vesikulären Strukturen (obere rechte Seite im unteren Bild), während die Permeabilität durch die diskreten Wegsamkeiten bestimmt ist.

Erwartungswert (Mittelwert) von $1 \mu\text{m}$, so ergibt sich für den Erwartungswert dieser Verteilung eine mittlere Permeabilität von $1.23 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ($12.3 \mu\text{Darcy}$), wenn man eine Log-Normalverteilung voraussetzt. Das zugehörige Histogramm zeigt in der logarithmischen Einteilung der Permeabilität eine Normalverteilung (Gauss-Verteilung), die in dieser Parametrisierung die Log-Normalverteilung widerspiegelt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der am gleichen Kern bestimmten Permeabilität von 10^{-17} m^2 , so kann man schließen, dass sich diese geringe Permeabilität durchaus durch ein Netzwerk von Mikrorissen erklären lässt.

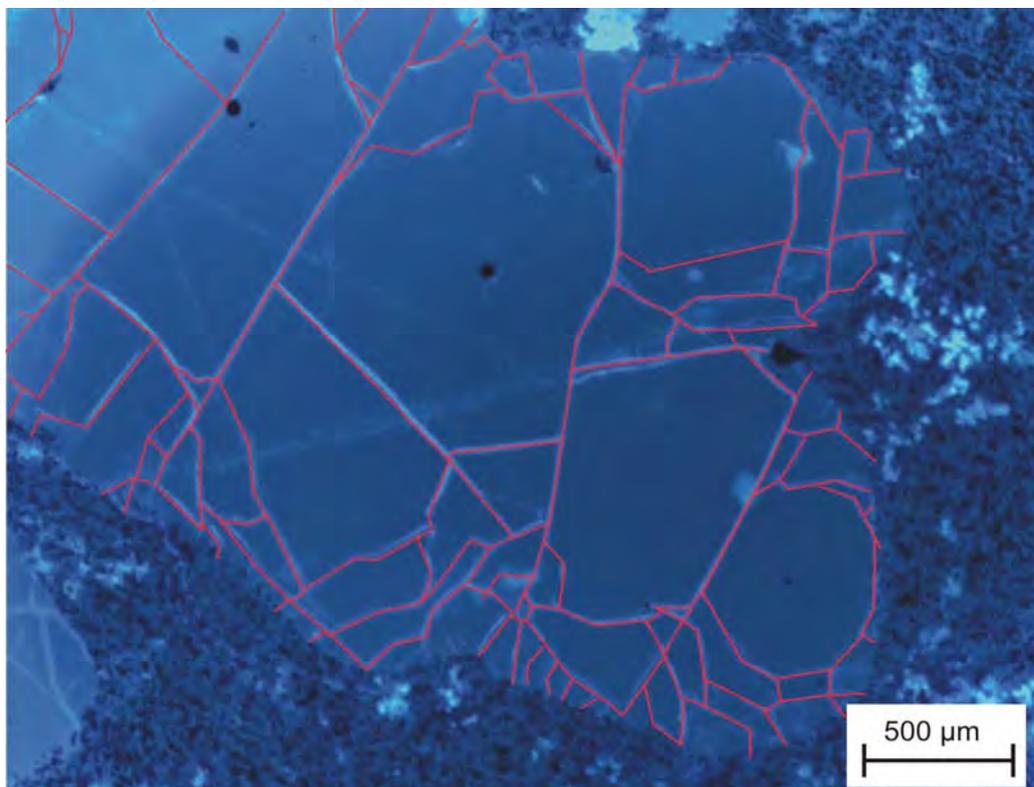


Abb. 12 Fluoreszierender Dünnschliff aus der Hawaii Bohrung HSDP2 (massiver Basalt aus 1088 mbsl) (aus Zimmermann et al., 2005, Abb. 2; Anlage 5). Es handelt sich hier um einen Olivinkristall, der mit Mikrorissen durchsetzt ist. Überlagert ist das Finite Elemente Netz (in rot) zur Modellierung des hydraulischen Flusses.

Der Perkolationsparameter als ein quantitatives Maß für die Vernetzung von zufallsverteilten Klüften lässt sich gemäß Kapitel 2 berechnen. Für die Berechnung sind die Bestimmung der Anzahl der Klüfte und deren Länge notwendig. Wenn man das Netzwerk betrachtet, stellt sich die Frage nach einer geeigneten Definition für eine individuelle Kluft. Geht man von der Vereinfachung der Kluftdefinition als planparallele Struktur aus, so ist eine geeignete Definition eine gerade Linie in der 2-D Projektionsebene eines Dünnschliffs. Es wurde demnach ein Netzwerk von geraden Linien gewählt, die eine maximale Länge aufweisen und sich auch gegenseitig schneiden können. Daraus lässt sich dann auch die mittlere Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft berechnen, eine weitere Größe, die die Vernetzung quantitativ beschreibt.

Es wurden 109 Klüfte bestimmt mit einer mittleren Länge von 269.2 μm . Bei der Längenbestimmung wurde von einer Log-Normalverteilung ausgegangen und der entsprechende Erwartungswert berechnet. Einsetzen ergibt einen Perkolationsparameter von 1.58. Die Kluftdichte λ_A ergibt sich zu $2.18 \times 10^7 \text{ 1/m}^2$. Vergleich mit den Ergebnissen der Dünnschliffanalyse der KTB-Daten zeigt, dass dieses Netzwerk deutlich oberhalb der Perkolationsschwelle liegt, wenn man den kritischen Wert von 1.3 der KTB-Daten zugrunde legt. Außerdem ist die 2-D Vernetzung aufgrund der Betrachtung des Netzwerkes offensichtlich und bestätigt daher nochmals die Gültigkeit des Perkolationsparameters als quantitatives Maß für die Vernetzung.

Die mittlere Anzahl der Schnittpunkte pro Kluft ergibt einen Wert von 3.18. Dieses liegt im Bereich der theoretischen kritischen Werte von Hestir & Long (1990) und Robinson (1984), die Werte von 3.6 und 3.1 Schnittpunkten pro Kluft an der Perkolationsschwelle angeben. Nach dieser Berechnung befindet sich also das Netzwerk im kritischen Bereich der Vernetzung.

5.2 Makroskopische Skala

5.2.1 Ergebnisse aus Bohrlochmessungen (FMS) der KTB-Hauptbohrung

Es wurden hydraulische Modellierungen zur Permeabilitätsabschätzung mit verschiedenen Kluftnetzwerken in ausgewählten Bereichen der KTB-Hauptbohrung durchgeführt, wobei zunächst zur Abschätzung der Variabilität der Ergebnisse nur die Kluftöffnungsweiten (Aperturen) der aus den strukturellen Bohrlochmessungen bestimmten Klüfte mit unterschiedlichen stochastischen Verteilungsfunktionen variiert wurde (Körner, 1997; Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Die Apertur stellt neben der Vernetzung der Klüfte die entscheidende zu bestimmende Größe dar, da sie zur 3. Potenz in die Permeabilität eingeht (cubic-law). Diese einfachen Kluftmodelle spiegeln noch kein reales geklüftetes Medium wider und wurden durch die Hinzunahme weiterer Kluftparameter modifiziert, um zu Kluftnetzwerken zu kommen, die einem realistischeren Modell des Kristallins entsprechen. Dazu wurde die Klufthäufigkeit und die Geometrie (Azimuth, Inklination) aus den Strukturlogs bestimmt und mit Hilfe von Verteilungsfunktionen ein

zweidimensionales stochastisches Netzwerk generiert. Die Auswahl von potentiell offenen Klüften erfolgte aufgrund des Spannungsfeldes (Brudy et al., 1997), weiterhin wurde die Kluftlänge auf endliche Ausdehnungen reduziert; dieses stellt einen weiteren Schritt hin zu realistischen Modellen des Kristallin dar.

Zur Beschreibung der hydraulischen Wegsamkeiten im Bereich der Fränkischen Linie, der tektonischen Hauptstörung der KTB, wurden verschiedene gleichwertige Kluftmodelle erstellt. Ihre Geometrie und ihre hydraulischen Eigenschaften eignen sich, die in situ Bedingungen in der KTB-Hauptbohrung zu reproduzieren und die Möglichkeit makroskopischer Fluid-Leitungsvorgänge im Kristallin zu unterstreichen (Körner, 1997, Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Die aus den Kluftdaten abgeleiteten stochastischen Parameter, lineare Häufigkeit und Orientierungsverteilung, sind direkt in die 2-dimensionalen Kluftnetze umgesetzt worden. Sie bilden die grundlegenden Größen, die allen Kluftnetzen gemeinsam sind und die aus einer Bohrung mit bestimmten Einschränkungen und Abweichungen bestimmt werden können. Die unbekannt, für ein 2-dimensionales Kluftnetz charakteristischen Parameter Kluftlänge und hydraulische Öffnungsweite wurden für alle Modelle mit unterschiedlichen Verteilungsfunktionen variiert. Die Kluftlänge ist dabei mit dem Vernetzungsgrad gekoppelt und führt bei einer Verringerung der mittleren Kluftlänge zu einem impermeablen Netzwerk, d.h. die Perkolationschwelle wird unterschritten.

Die Modellierung zur Bestimmung der makroskopischen Kluftpermeabilität gliedert sich in verschiedene Schritte. Aus den strukturellen Bohrlochmessungen werden zunächst die geometrischen Größen der hydraulisch aktiven Klüfte identifiziert. Danach werden aus diesen originären Eingangsdaten deterministische und stochastische Netzwerke konstruiert und anschließend die Permeabilität dieser Netzwerke bestimmt. Die Modellierung des hydraulischen Flusses erfolgt nach dem Darcy-Gesetz, welches ein laminares Strömungsverhalten voraussetzt.

Die Konstruktion von realistischen Netzwerken, die die hydraulischen Eigenschaften hinreichend genau widerspiegeln, stellt ein unterbestimmtes Problem dar, d.h., die Anzahl der bekannten Größen ist nicht vollständig. Daher sind zusätzliche Informationen und Kalibrierungen für eine Abschätzung der Permeabilität notwendig. Darüber hinaus ergibt sich eine Diskussion und Limitierung der unbekannt Parameter sowie deren Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften der Netzwerke. Die Vorgehensweise ist folgendermaßen gestaltet. Zuerst werden mit Hilfe der strukturellen Bohrlochmessungen, die ein Abbild der Klüfte auf der Bohrlochwand erzeugen, die Geometrie und die Teufe der Klüfte bestimmt. Anschließend muss darüber entschieden werden, ob es sich um offene oder geschlossene Klüfte handelt und hierfür muss ein Auswahlkriterium geschaffen werden. Betrachtet man das Strukturlog, welches einen Kontrast unterschiedlicher elektrisch leitfähiger Strukturen identifiziert, so ist hier zwischen Kluftstrukturen mit elektrolytischem Ursprung, also beispielsweise saline Fluide, und anderen konduktiven Strukturen wie Graphit oder Erzminerale zu unterscheiden. Dieses ist jedoch nicht ohne weitere Informationen möglich. Daher wird als zusätzliche Information das Spannungsfeld als ein Auswahlkriterium für potentiell offene

und geschlossene Klüfte verwendet. Dieses führt dann abschließend zu einem reduzierten Datensatz mit potentiell offenen Klüften für die Modellbildung.

Die Apertur der Kluft, die Kluftlänge sowie die zugehörigen Verteilungsfunktionen stellen unbekannte Parameter dar. Geht man von einem Netzwerk oberhalb der Perkolationschwelle aus, stellt die Apertur den dominierenden Faktor für die hydraulischen Eigenschaften dar. Nach dem 'cubic law' ergibt sich aufgrund einer linearen Änderung der Apertur eine Änderung der Permeabilität zur 3. Potenz. Im Bereich der Perkolationschwelle stellt auch die Kluftlänge einen kritischen Parameter dar, da sie die Konnektivität kontrolliert und die Permeabilität an der Perkolationschwelle einem Potenzgesetz gehorcht. Durch die Wahl von äquivalenten zwei-dimensionalen Netzwerkmodellen mit unterschiedlichen Kluftlängen, die aus den ein-dimensionalen Ausgangsdaten generiert wurden, wurde der Einfluss der Kluftlänge auf die hydraulischen Eigenschaften untersucht (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**).

Die Orientierungen und die Größen der in situ Hauptspannungen in den KTB Bohrungen wurden von Brudy et al. (1997) durch eine kombinierte Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen (breakouts) und bohrungsinduzierten (drilling-induced) Rissen bestimmt. Diese beschreiben eine Reaktion des Spannungszustandes der Formation auf die Bohrlochwand (Zoback et al., 2003). Der Spannungszustand der Formation wird durch die Bohrung gestört und führt zu Bohrlochrandausbrüchen aufgrund der Relaxation in Richtung der minimalen horizontalen Hauptspannung. Dagegen befinden sich die bohrungsinduzierten Risse senkrecht zu den Bohrlochrandausbrüchen und sind daher in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung orientiert. Aus diesen Daten wurde von Brudy et al. (1997) die Richtung der horizontalen Hauptspannung als Funktion der Tiefe bestimmt.

In der KTB Hauptbohrung wurde im Teufenbereich um 6018 m ein Frac-Experiment durchgeführt, welches dazu diente, die Größen der horizontalen Hauptspannung abzuschätzen (Brudy et al, 1997). Für die minimale horizontale Hauptspannung ergab sich ein Wert von $\sigma_h = 110$ MPa, die maximale horizontale Hauptspannung konnte aufgrund der Limitierung des Maximaldruckes nicht bestimmt werden. Die unteren und oberen Grenzen der minimalen und maximalen horizontalen Hauptspannungen ließen sich jedoch aus den Bohrlochrandausbrüchen von Brudy et al. (1997) abschätzen. Eine erweiterte Analyse zur Bestimmung der maximalen horizontalen Hauptspannung basierend auf Untersuchungen von Bohrkernen unter in situ simulierten triaxialen Spannungsbedingungen konnte die Ergebnisse von Brudy et al. bestätigen (Haimson & Chang, 2002). Die vertikale Hauptspannung (vertikale Auflast des Gebirges) lässt sich aus der vertikalen Mächtigkeit z (hier 7000 m) und der mittleren Dichte ρ (2800 kg/m³) berechnen. Es ergibt sich für die maximale horizontale Hauptspannung σ_H in 7000 m Teufe ein Intervall von 250 MPa - 330 MPa und eine Orientierung von N164°. Für die minimale horizontale Hauptspannung σ_h erhält man in dieser Teufe Werte zwischen 130 MPa und 160 MPa und die Orientierung N74°. Die vertikale Auflast σ_v beträgt 192 MPa.

Dieses Ergebnis zeigt, dass die vertikale Hauptspannung in 7000 m Tiefe, also im Teufenbereich des Fränkischen Lineaments, die mittlere Spannung darstellt ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$), es handelt sich also bei dem rezenten Spannungsfeld um ein strike-slip Regime (Zoback & Harjes, 1997). Dieses Ergebnis wurde von Bohnhoff et al. (2004) bestätigt, die Herdflächenlösungen (fault plane solutions) von Mikrobeben untersuchten, die während eines Langzeit-Injektionsexperiment im Jahr 2000 registriert wurden.

Das Fränkische Lineament zeigt sich als eine Grenze zwischen dem süddeutschen Permo-Mesozoischen Sedimentbecken und dem Variszischen Grundgebirge mit einer Nordwest-Südost Orientierung an der Oberfläche. Höchstwahrscheinlich bildete sie sich im Spät-Paleozoikum und wurde als Aufschiebung (reverse fault) im Mesozoikum reaktiviert (Wagner et al., 1997). Wagner et al. konnten aufgrund von Überprägungen die Kluft- und Riss-Strukturen in Spät-Variszische und Post-Variszische Strukturen trennen. Die Spät-Variszischen Deformationen erscheinen als subvertikale Extensionsrisse und spröde-duktilen Aufschiebungsklüfte, hingegen sind die Post-Variszischen Strukturen subhorizontale Extensionsrisse und spröde Klüfte aufgrund von Aufschiebungen und Abschiebungen.

Die Entkopplung des Fluiddrucks vom lithostatischen Druck ist nur dann möglich, wenn die Kluftsysteme als Folge des Spannungszustandes offen bleiben und in vertikaler Richtung eine Ausdehnung von mehreren Kilometern besitzen. Dieses gewährleistet eine hydraulische Kommunikation der Formationsfluide (Huenges et al., 1997). Die steil stehenden Aufschiebungsklüfte, welche die jüngsten Deformationsstrukturen darstellen, können so über lange Zeiten (im geologischen Sinn) unter dem rezenten Spannungsregime offen bleiben und sind für ein hydraulisch aktives Kluftsystem verantwortlich.

Als Ergebnis dieser Überlegungen ergeben sich zwei Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um eine Unterscheidung zwischen potentiell offenen und geschlossenen Klüften zu ermöglichen (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**):

- 1) der Azimut der Kluftflächen (Richtung des Dip) ist für offene Klüfte senkrecht zur maximalen horizontalen Hauptspannung σ_H ;
- 2) offene Klüfte sind steil stehend mit einem Dip-Winkel ähnlich dem des SE1 Reflektors (ca. $50^\circ - 55^\circ$).

Die erste Bedingung ist die wichtigere und unverzichtbare von beiden Bedingungen; die zweite ist eine Zusatzbedingung, die in der KTB nahezu immer erfüllt ist mit seiner steil stehenden Formation. Dieses ergibt daher Kluftflächen, die nahezu senkrecht zur minimalen horizontalen Hauptspannung stehen.

Zur Auswahl der potentiell hydraulisch aktiven Klüfte wurde eine Abweichung von der Vorzugsorientierung von 20° zugelassen. Dieser Wert rührt daher, dass hohe Leitfähigkeitskontraste in den FMS Messungen für diese Klüfte gefunden wurden; dieses stellt eine weitere Unterstützung des eingeführten

Spannungskriteriums dar. Wenn man nur positive Dip-Winkel zulässt, ergeben sich zwei Datensätze mit einer Differenz im Azimut von 180° . Das zweite Spannungskriterium (steil stehende Klüfte) ist in diesem Fall für alle ausgewählten Klüfte automatisch erfüllt.

In dem Teufenintervall des Fränkischen Lineaments (6900 m bis 7140 m) wurden 312 Klüfte durch FMS Messungen gefunden, von diesen sind aufgrund der Spannungskriterien jedoch nur 67 Klüfte potentiell offen. Dieses ergibt zwei Datensätze mit jeweiligen Azimuts von $N75^\circ$ bzw. $N255^\circ$ und Dip-Winkeln von jeweils 55° . Diese beiden Datensätze wurden anschließend noch einmal mit den FMS Messungen verglichen und ergaben den höchsten Leitfähigkeitskontrast gegenüber den restlichen nicht berücksichtigten Klüften. Daraus lässt sich schließen, dass ein hoher Leitfähigkeitskontrast ein zusätzliches Indiz für potentiell offene Klüfte sein kann, wenn er auch keine eindeutige Indikation darstellt.

Aus den geometrischen Daten wurde ein deterministisches Netzwerk generiert mit konstanter Kluftöffnungsweite für alle Klüfte. In diesem Modell wurde die Kluftöffnungsweite variiert und die Permeabilitäten in Abhängigkeit der Kluftöffnungsweiten bestimmt (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Eine Apertur (Kluftöffnungsweite) von $25\ \mu\text{m}$ ergibt eine Permeabilität des Netzwerkes, die vergleichbar ist mit der abgeschätzten mittleren in situ Permeabilität aus den hydraulischen Untersuchungen. Daher soll dieser Wert auch für die stochastischen Modellierungen verwendet werden. Bei stochastischer Variation der Apertur der einzelnen Klüfte wird für die unterschiedlichen Verteilungsfunktionen in den Modellen der Erwartungswert (Mittelwert) gleich $25\ \mu\text{m}$ gesetzt.

Im Gegensatz zu den deterministischen Modellen werden bei den stochastischen Netzen anstatt der individuellen Kluftparameter deren stochastische Größen verwendet und daraus Kluftnetzwerke generiert (Zimmermann et al., 2000; **Anlage 3**). Diese Vorgehensweise erlaubt die Generierung von Kluftnetzwerken mit unterschiedlichen Kluftlängen, und stellt daher eine Verallgemeinerung des deterministischen Netzwerkes dar. Dabei ist zu beachten, dass die Kluftlängen einen unbekanntes, d.h. nicht messbaren Parameter darstellen, und man daher einen weiteren Freiheitsgrad erzeugt. Man erhält demzufolge unterschiedliche Netzwerke, die im Sinne ihrer Ausgangsdaten äquivalent sind. Bei diesen Modellierungen wurden die Kluftlängen, die man nicht direkt bestimmen kann, variiert, um deren Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit abzuschätzen.

Es wurden Modelle erstellt mit Kluftlänge von 10 m, 30 m, 50 m und 100 m, die äquivalent hinsichtlich ihrer Eingangsdaten sind (Abb. 13). Die Flächenhäufigkeiten λ_A der Netzwerken mit unterschiedlichen Kluftlängen wurde entsprechend den aus den Bohrlochmessungen bestimmten linearen Häufigkeiten λ_L für die beiden Vorzugsrichtungen berechnet.

Die hydraulischen Eigenschaften senkrecht und parallel zur Bohrlochachse der stochastischen Netzwerke zeigen einen signifikanten Trend zu kleineren Durchlässigkeiten für Netzwerke mit geringeren Kluftlängen,

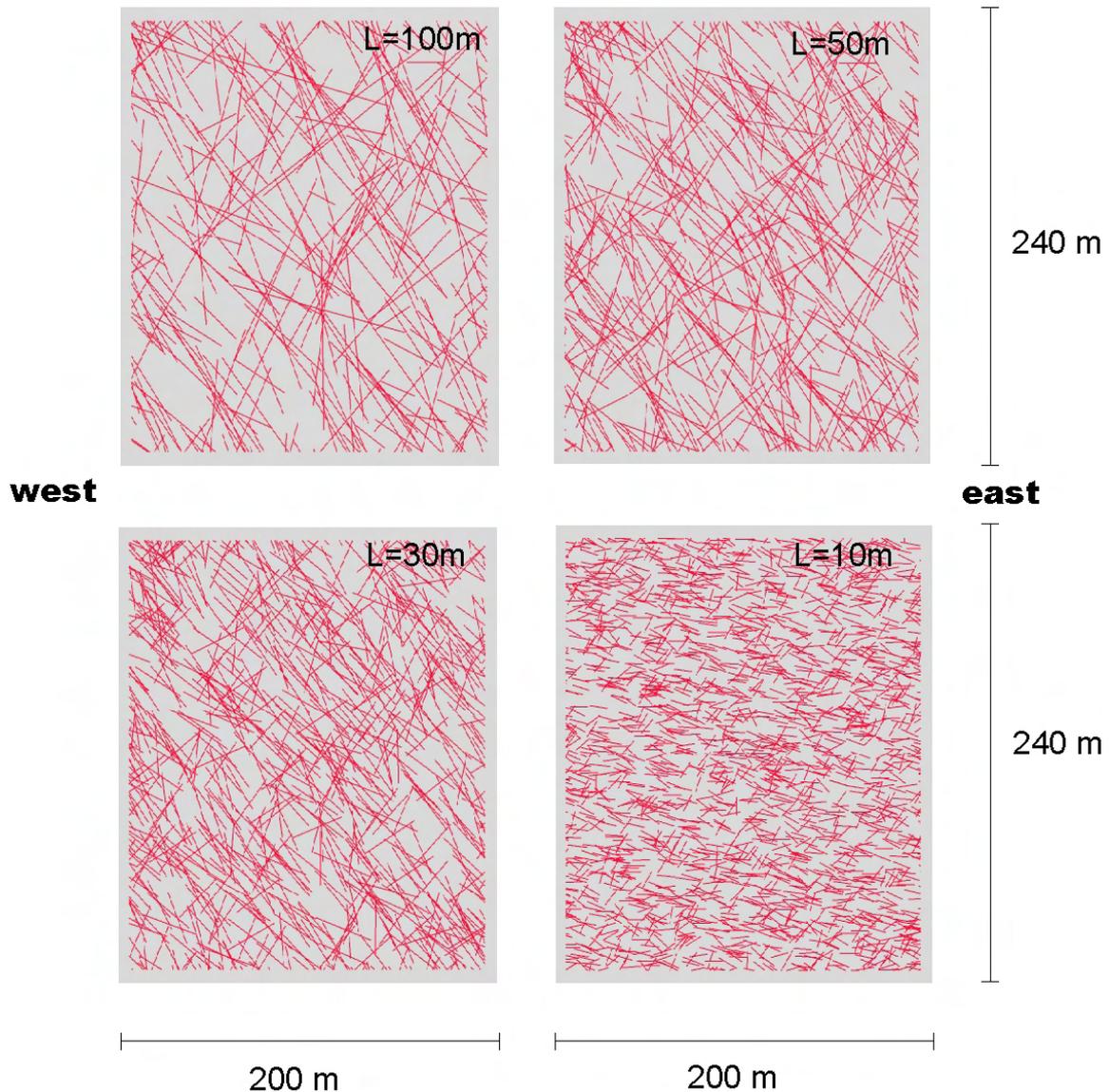


Abb. 13 Stochastische Kluft-Netzwerke der KTB-Hauptbohrung, basierend auf Daten des Fränkischen Lineaments (6900m bis 7140m) mit unterschiedlichen Kluftlängen (aus Zimmermann et al., 2000, Abb. 4; Anlage 3)

obwohl die Anzahl der Klüfte in den Netzwerken mit geringeren Kluftlängen linear ansteigt ($\lambda_A \sim L$ bei $\lambda_L =$ konstant). Wird die Kluftlänge L weiter verringert, sollte man annehmen, dass diese Netzwerke weiterhin durchlässig bzw. vernetzt bleiben und die Permeabilität sich auf einen konstanten Wert stabilisiert. Bei dem Modell mit der Kluftlänge von $L=10\text{m}$ führt dieses jedoch zu dem zunächst überraschenden Ergebnis, dass bei gleichen Eingangsparametern wie bei den anderen Netzwerken mit größerer Kluftlänge ein stochastisches Netzwerk entsteht, welches in horizontaler und vertikaler Richtung hydraulisch undurchlässig ist. Dieser Effekt von Netzwerken an der Grenze ihrer hydraulischen Durchlässigkeit wird in Kap. 5.4 mit Hilfe der Perkolations-theorie erklärt.

5.2.2 Ergebnisse aus Bohrlochmessungen (BHTV) der HSDP2-Bohrung

Als Datenbasis zur Quantifizierung von Klüften in der HSDP2 Bohrung stehen Borehole Televiever Daten (BHTV) und Photos der Kerne zur Verfügung. Es wurden zwei verschiedene Borehole Televiever eingesetzt (Abb. 14), der erste in einem begrenzten Teufenbereich von 783.5 mbsl (meter below sea level) bis 1147.5 mbsl, der zweite im Teufenbereich von 600 mbsl bis 1800 mbsl (Zimmermann et al., 2002a; **Anlage 6**).

Aus den Strukturen der Bohrlochwand konnten im Teufenbereich von 783.5 mbsl und 1147.4 mbsl 337 Klüfte identifiziert werden. Dieses Teufenintervall wurde gewählt, da hier beide Televiever zur Auswertung zur Verfügung standen. Die lineare Häufigkeit der Klüfte λ_L (auch 1-D Dichte) berechnet sich als Quotient aus der Anzahl der Klüfte und dem Teufenintervall zu 0.927 1/m. Setzt man für die unbekannte Kluftöffnungsweite einen mittleren Wert für alle Klüfte von 100 μm an, ergibt sich eine makroskopische Permeabilität in der Größenordnung von $7.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (77 mDarcy) für den oberen Teufenbereich der Bohrung. Nach Erweiterung des Bohrlochdurchmessers unterhalb von 1829 m wurde 2003 eine weitere Televiever-Messung im offenen Bohrlochabschnitt von 1829 mbsl und 2896 mbsl durchgeführt. Es wurden insgesamt 247 Klüfte registriert; daraus ergibt sich eine mittlere Kluflhäufigkeit von 0,23 1/m für das untere Intervall der Bohrung (Morin & Wilkens, 2005). Die zugehörige Permeabilität unter Annahme einer gleichen Kluftöffnungsweite von 100 μm wie im oberen Bereich der Bohrung liegt bei $1.9 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (19 mDarcy).

Die lineare Häufigkeit der Klüfte kann verwendet werden, um die kritische Kluflänge zu bestimmen. Dieses ist die Länge, die notwendig ist, damit das zugehörige Netzwerk vernetzt und damit oberhalb der Perkolationschwelle liegt. Geht man von konstanten Kluflängen aus, ist der kritische Perkolationsparameter nach Bour & Davy (1997) gleich $p_{\text{crit}} = 5.6$ für ein unendlich ausgedehntes zweidimensionales Netzwerk mit zufallsverteilten Klüften bezüglich der Orientierung und des Aufpunkts. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich aus der linearen Häufigkeit und dem kritischen Perkolationsparameter die kritische Länge abschätzen. Mit $\lambda_L = 0.927 \text{ 1/m}$ und $p_{\text{crit}} = 5.6$ ergibt sich für die makroskopische kritische Kluflänge $l_{\text{crit}} = 6.0 \text{ m}$ im oberen Abschnitt der Bohrung. Das bedeutet, dass unter den gemachten Annahmen eine makroskopische Kluflänge von mindestens 6 m notwendig ist, um ein hydraulisch permeables Kluftnetzwerk zu erzeugen. Für den unteren Teil der Bohrung basierend auf den Auswertungen von Morin & Wilkens (2005) ergibt sich eine kritische Kluflänge von $l_{\text{crit}} = 24 \text{ m}$. Diese aus diesem Zusammenhang abgeleiteten Größen, die nicht direkt messbar sind, stellen einen substantiellen Parameter für die Konstruktion realistischer Kluftnetzwerkmodelle für die Simulation des hydraulischen Flusses dar. Mit diesen unteren Schranken kann die Anzahl der möglichen Modelle erheblich eingeschränkt werden.

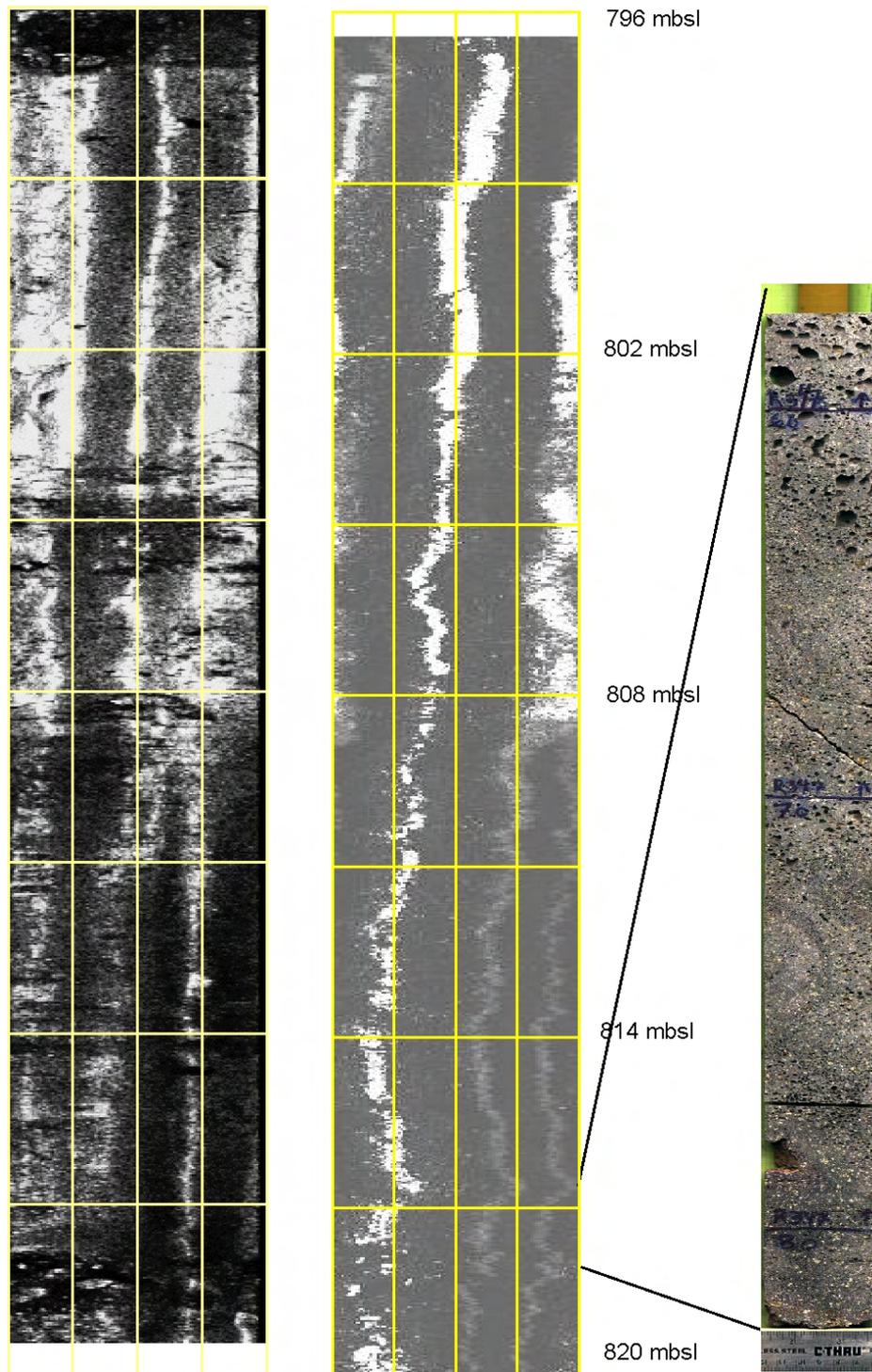


Abb. 14 Borehole-Televiever (BHTV) Abbildungen von zwei unterschiedlichen Einfahrten der HSDP2 Bohrung. Die rechte Seite zeigt eine Kernaufnahme aus dem unteren dargestellten Bohrlochabschnitt (aus Zimmermann et al., 2005, Abb. 2; Anlage 6).

5.3 Megaskopische Skala

In der megaskopischen Skala, also im regionalen Maßstab, standen nur Daten aus dem Umfeld der KTB-Bohrungen zur Verfügung, daher musste sich die Analyse in der megaskopischen Skala auf die KTB Lokation beschränken.

5.3.1 Seismische Reflektoren im Umfeld der KTB-Bohrungen

Seismischen Reflektoren stellen geeignete Strukturen in der megaskopischen Skala dar, die als aktive hydraulische Systeme interpretiert werden können (Emmermann & Lauterjung, 1997; Harjes et al., 1997). Das durchgeführte seismische Messprogramm zeigte, dass der überwiegende Teil der registrierten Strukturen tektonischen Ursprungs ist und Kluftzonen und Verwerfungen darstellen (Harjes et al., 1997; O'Brian et al., 1997; Wagner et al., 1997; Zillmer et al., 2002) und daher als hydraulisch signifikante Strukturen zu bezeichnen sind. Im Gegensatz dazu sind die lithologischen Grenzen weniger wichtig und spiegeln sich nicht in den seismischen Strukturen wider.

Diese seismischen Strukturen formen ein Netzwerk von individuellen Klüften, die im Zentrum eine durchgängige Vernetzung besitzen, so dass dieses 2-D Netzwerk nach dem optischen Eindruck hydraulisch permeabel ist (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Betrachtet man das gesamte Bild, stellt man fest, dass hier keine durchgängige Vernetzung vorhanden ist (Abb. 15). Im Folgenden wurden die zugehörigen Netzwerkparameter bestimmt, um festzustellen, ob der optische Eindruck mit den theoretischen Werten vereinbar ist.

Es wurde die mittlere Länge der seismischen Strukturen (Klüfte) und die Kluftdichte (2-D Dichte) bestimmt. Als Verteilungsfunktion für die Kluftlängen ergab sich wie für die Dünnschliffe eine Log-Normalverteilung. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für die Orientierung der Klüfte. Analog zu den Dünnschliffen erhält man eine bimodale Verteilung.

Anhand der Mittelwerte der Kluftlängen und der Dichten wurde der Perkolationsparameter für die gesamte Schnittebene und für den zentralen Bereich berechnet. Für den gesamten Bereich ergab sich ein Perkolationsparameter $p = 1.12$, der zu einem nichtvernetzten Netzwerk gehört. Die Einschränkung auf den zentralen vernetzten Bereich führte zu einem Wert von $p = 1.82$. Geht man wie bei den Dünnschliffen von einem kritischen Wert von 1.3 aus, sind diese Ergebnisse in der megaskopischen Skala konsistent mit denjenigen der mikroskopischen Skala. Ein Grund hierfür scheint zu sein, dass die Verteilungsfunktionen für die Kluftlängen und die Orientierungen für beide Skalen qualitativ übereinstimmen.

Im zentralen vernetzten Bereich wurde der horizontale hydraulische Fluss modelliert und die Permeabilität abgeschätzt. Die obere und untere Begrenzung des Modells wurde als nicht-durchlässig definiert (so

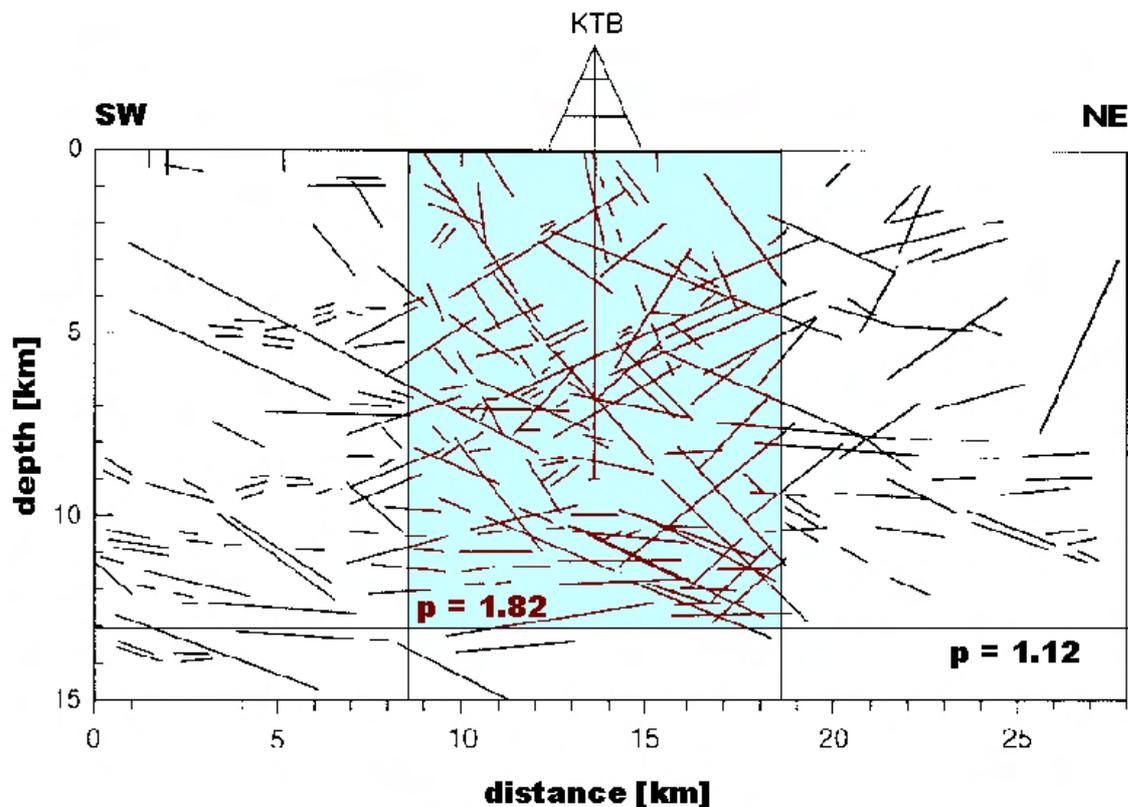


Abb. 15 Seismische Reflektoren im Umfeld der KTB-Bohrungen (aus Zimmermann et al., 2003, Abb. 7; Anlage 3). Der Perkolationsparameter p ergibt sich zu 1.82 für den zentralen vernetzten Bereich; für das gesamte Netz, das keine durchgängige Vernetzung aufweist, ist der Perkolationsparameter 1.12.

genannte no-flow boundaries). Soweit das Modell vernetzt ist, ist der bestimmende Faktor für die Permeabilität die Apertur, die in der dritte Potenz eingeht (cubic law). Diese ist zunächst nicht bekannt, es gibt aber Hinweise, die für die Abschätzung der Permeabilität und der Apertur im regionalen megaskopischen Maßstab hilfreich sein können. Zum einen zeigt die Zusammenstellung der Permeabilitätsmessungen kristalliner Gesteine von Clauser (1992), dass die Permeabilität im Bereich der Bohrlochmessungen und daher der makroskopischen Skala sich im gleichen Rahmen wie die Permeabilität in der regionalen megaskopischen Skala verhält. Das bedeutet, dass Permeabilitäten im Bereich von 10^{-17} m^2 bis 10^{-16} m^2 (10 bis 100 μ Darcy) zu erwarten sind. Der zweite Hinweis kommt von Laboruntersuchungen an einem Bohrkern mit einer makroskopischen hydraulisch aktiven Kluft aus der KTB-Vorbohrung aus 3800 m von Durham (1997), die eine schmale Zone erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit kennzeichnet. Durham (1997) konnte eine mittlere Kluftöffnungsweite (Apertur) dieser Makrokluft von ca. 100 μ m abschätzen, wobei er in situ Druckbedingungen berücksichtigte. Übernimmt man diesen Wert für alle Elemente des

Netzwerks, erhält man eine Permeabilität in horizontaler Richtung von $2.71 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ (27.1 μDarcy), die konsistent zu der erwarteten Größenordnung der ersten Annahme ist.

5.4 Kritische Parameter an der Perkolationsschwelle

Zur Bestimmung der kritischen Netzwerkparameter an der Perkolationsschwelle wurden die stochastischen Netzwerke verwendet, deren Datenbasis die Strukturinformationen der KTB Hauptbohrung im Bereich der Fränkischen Linie ist. Die untersuchten stochastischen Netzwerke basieren alle auf der gleichen Datenbasis und sind daher äquivalent im Sinne der Eingangsdaten (Abb. 13). Sie bestehen aus der Anzahl der detektierten Klüfte sowie deren geometrische Orientierung. Diese Informationen wurden zur Generierung der stochastischen zweidimensionalen Netzwerke verwendet, wobei die Kluftlänge eine unbekannte Größe und daher einen Freiheitsgrad darstellt. Es wurden daher Modelle mit unterschiedlichen Kluftlängen generiert und die Durchlässigkeit dieser Modelle in horizontaler und vertikaler Richtung bestimmt. Es zeigte sich eine Abhängigkeit der Durchlässigkeit dieser Modelle von ihrer mittleren Kluftlänge, obwohl die Kluftdichte entsprechend verändert wurde, sodass alle Modelle hinsichtlich der Ausgangsdaten äquivalent waren. Eine Reduzierung der Kluftlänge auf 10 m führte zu einem nicht permeablen Netzwerk, d.h. die Klüfte spannen kein makroskopisches Netzwerk auf, sondern sind höchstens lokal verbunden. Aufgrund der theoretischen Überlegungen sollten die zugehörigen Netzwerkparameter sich genauso verhalten und zu Werten führen, die unterhalb der kritischen Schwellen liegen. Es wurde daher für alle Netzwerke der Perkulationsparameter und die mittlere Anzahl der Schnittpunkte pro Kluft berechnet und mit der Permeabilität der Netzwerke verglichen. Dadurch ist es möglich, den Übergang von einem durchlässigen Netzwerk zu einem undurchlässigen Netzwerk zu quantifizieren.

Die Permeabilität als Funktion des Perkulationsparameters folgt an der Perkolationsschwelle einem Potenzgesetz (Zimmermann et al., 2002b; **Anlage 7**). Die Bestimmung des kritischen Perkulationsparameters p_{crit} erfolgt durch Approximation an eine Geradengleichung. Aus dem Achsenabschnitt der Gerade lässt sich dann p_{crit} bestimmen und einfügen. Anschließend können die Parameter des Potenzgesetzes berechnet werden (Abb. 16).

Die gleiche Vorgehensweise gilt für die Anzahl der Schnittpunkte pro Kluft ξ an der Perkolationsschwelle. Auch hier ergibt sich der kritische Parameter ξ_{crit} durch Näherung einer Geradengleichung. Anschließend wird ξ_{crit} eingesetzt und die Parameter des Potenzgesetzes bestimmt.

Es wurden für die Kluftlängen 100 m, 50 m und 30 m jeweils 20 unterschiedliche Realisationen dieser Netzwerke berechnet. Für diese Realisationen wurde die Durchlässigkeit zwischen den einzelnen Knotenpunkten stochastisch variiert, um Netzwerke mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften zu generieren. Dann wurde der hydraulische Fluss in vertikaler und in horizontaler Richtung berechnet. Die

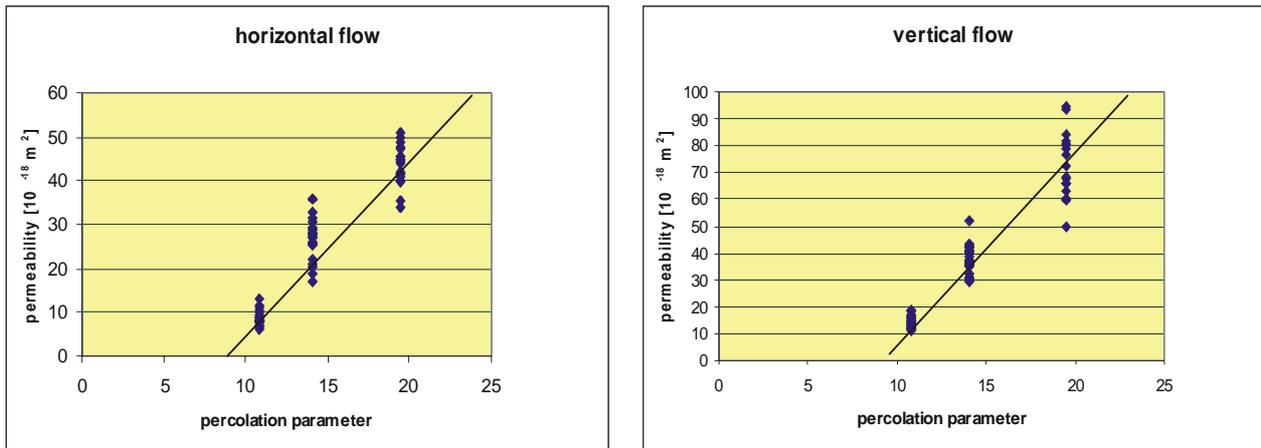


Abb. 16 Kluft-Permeabilitäten als Funktion des Perkulationsparameters (aus Zimmermann et al., 2002b, Abb. 1; Anlage 7). Aus den Regressionsgeraden lassen sich die kritischen Perkulationsparameter berechnen.

Regressionsanalyse ergibt einen kritischen Perkulationsparameter p_{crit} von 9.14 in vertikaler Richtung und 8.72 in horizontaler Richtung. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei $R = 0.953$ bzw. $R = 0.955$. Die kritischen Perkulationsparameter sind etwas höher als der von Bour & Davy (1997) theoretisch berechnete Wert von 5.6 für zufallsverteilte Klüfte. Dieses hat seine Ursache darin, dass aufgrund der Vorzugsorientierungen der Klüfte in der KTB Bohrung die notwendige Kluftdichte größer sein muss, um ein durchlässiges Netzwerk zu generieren.

Für die gleichen Netzwerke wurde eine Regressionsanalyse mit der Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft ξ als abhängige Variable durchgeführt (Abb. 17). Es ergibt sich für den Fluss in vertikaler Richtung ein kritischer Parameter von $\xi = 3.94$ und in horizontaler Richtung ein Wert von $\xi = 3.61$. Der Korrelationskoeffizient liegt in diesen Fällen bei $R = 0.948$ für den vertikalen Fluss und bei $R = 0.942$ bei horizontalem Fluss.

Die Bestimmung der kritischen Kluftlänge l_{crit} ist mit zwei unabhängigen Methoden möglich. Zum einen kann diese Größe direkt berechnet werden, wenn der kritische Perkulationsparameter bekannt ist. Es ergibt sich durch Einsetzen des kritischen Perkulationsparameters bei der Simulation des vertikalen Flusses eine kritische Kluftlänge von $l_{\text{crit}} = 21.6$ m; für die Simulation des horizontalen Flusses erhält man $l_{\text{crit}} = 20.6$ m. Eine andere Methode nutzt die kritische Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft ξ zur Abschätzung der kritischen Kluftlänge. Für die Berechnung wurden zwei weitere Netzwerke mit Kluftlängen von 20 m und 10 m hinzugenommen und zwei unterschiedliche Kurvenanpassungen berechnet. Der Korrelationskoeffizient liegt bei $R = 0.988$. Einsetzen der zwei kritischen Parameter für die Anzahl der Schnittpunkte pro Kluft ξ_{crit} , die für die vertikale und horizontale Richtung berechnet wurden, ergibt für die

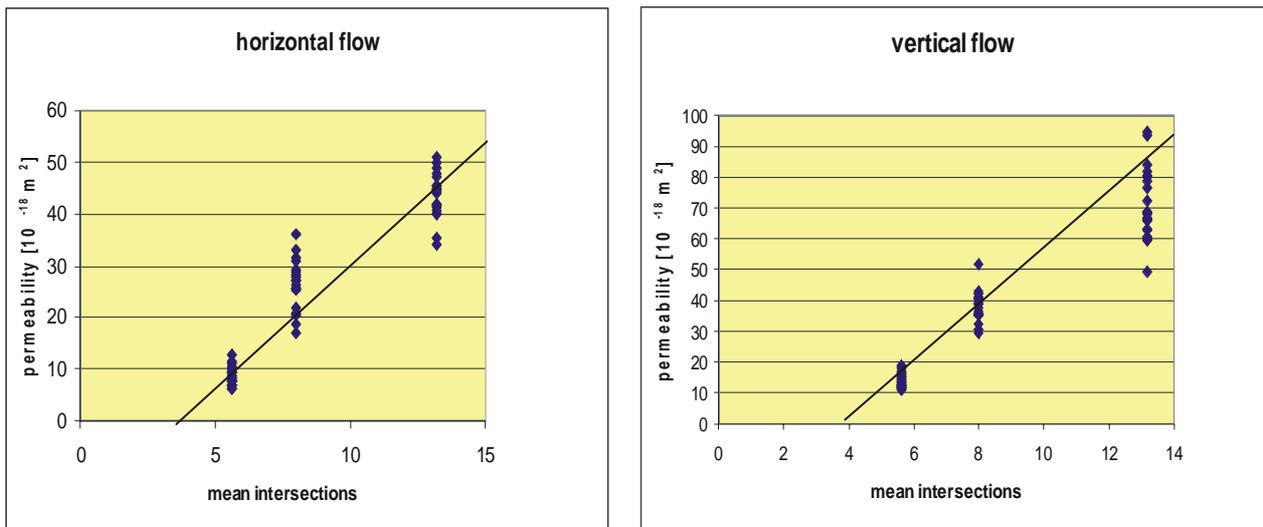


Abb. 17 Kluft-Permeabilität als Funktion der Anzahl der Schnittpunkte (intersections) pro Kluft (aus Zimmermann et al., 2002b, Abb. 2; Anlage 7). Aus den Regressionsgeraden lässt sich jeweils die kritische Anzahl der Schnittpunkte berechnen.

kritische Kluftlänge $l_{\text{crit, vert}} = 18.1 \text{ m}$ und $l_{\text{crit, horiz}} = 17.0 \text{ m}$. Die Kurvenanpassung mit Hilfe eines Potenzgesetzes ergibt einen Korrelationskoeffizient von $R = 0.993$. Einsetzen von ξ_{crit} für beide Flussrichtungen ergibt für die kritischen Kluftlängen $l_{\text{crit, vert}} = 17.8 \text{ m}$ und $l_{\text{crit, horiz}} = 16.5 \text{ m}$.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der kritischen Kluftlänge besteht durch Vergleich mit theoretisch bestimmten Werten der mittleren Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft an der Perkolationschwelle ξ_{crit} . Hestir & Long (1990) berechneten einen Wert von $\xi_{\text{crit}} = 3.6$ für Klüfte, die bezüglich ihrer Orientierung und ihres Ursprungs zufallsverteilt sind. Für ein orthogonal orientiertes Kluftsystem erhält Robinson (1984) einen Wert von $\xi_{\text{crit}} = 3.1$. Nimmt man diese Werte als mögliches Intervall für die kritischen Kluftlänge, so erhält man bei Anwendung des linearen Zusammenhangs folgendes Intervall der kritischen Kluftlänge:

$$\xi_{\text{crit}} = [3.1; 3.6] \Rightarrow l_{\text{crit}} = [15.3 \text{ m}; 17.0 \text{ m}]$$

Bei Anwendung des Potenzgesetzes ergibt sich:

$$\xi_{\text{crit}} = [3.1; 3.6] \Rightarrow l_{\text{crit}} = [14.5 \text{ m}; 16.5 \text{ m}]$$

Zur Bestimmung der Parameter der Potenzgesetze, die die Permeabilität k an der Perkolationschwelle in Abhängigkeit von dem Perkolationsparameter p und der mittleren Anzahl von Schnittpunkten pro Kluft beschreiben, werden die kritischen Werte dieser Parameter in die Formeln eingesetzt und die Formeln entsprechend parametrisiert. Es ergeben sich Exponenten um den Wert $\alpha \sim 1$, welches auf ein in erster Näherung lineares Verhalten der Permeabilität an der Perkolationschwelle schließen lässt (Zimmermann et al., 2002b; Anlage 7).

5.5 Vergleich struktureller und hydraulischer Eigenschaften der KTB-Bohrung

Die Verteilungsfunktionen der Kluftlängen scheinen für die mikroskopische und für die megaskopische Skala der KTB-Datensätze übereinzustimmen und annähernd Log-Normalverteilungen zu sein. Diese Resultate sind jedoch kritisch zu betrachten, wenn man anmerkt, dass aufgrund der Auflösungsvermögen der einzelnen Methoden kleinskalige Strukturen nicht mehr in einer repräsentativen Anzahl erfasst werden. Daraus folgt konsequenterweise, dass sich die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte mit der Länge der Strukturen verringert und die 'wahre' Verteilungsfunktion nicht bestimmt wird. Berücksichtigt man diesen Umstand, scheint ein Potenzgesetz plausibler zu sein als eine Log-Normal-Verteilung. Dieses stimmt mit Ergebnissen anderer Autoren überein, die auch Potenzgesetze für Kluftlängen und Abstände gefunden haben (Kojima et al., 1989; Balberg et al., 1991; Neuman, 1994; Bour & Davy, 1997; Gavrilenko & Guéguen, 1998; Bonnet et al., 2001). Fasst man die Kluftdichten aller Netzwerke, die oberhalb der Perkolationschwelle liegen, zusammen, so erhält man eine klare Indikation für ein Potenzgesetz der folgenden Form:

$$\lambda_A \propto \mu_l^m$$

mit

λ_A = 2-D Kluftdichte

μ_l = mittlere Kluftlänge

m = charakteristische Konstante

Die Kluftdichten als Funktion der Kluftlängen zeigen dieses Verhalten; in einer doppelt-logarithmischen Skala sind sie durch eine Gerade mit der Steigung $m = -1.9 \pm 0.05$ verbunden (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Diese Darstellung ist äquivalent zu einem Histogramm im logarithmischen Maßstab und entspricht demzufolge der Verteilungsfunktion der Kluftlänge (Abb. 18). Daher stellt dieses ein Potenzgesetz dar in Übereinstimmung mit den oben zitierten Arbeiten.

Die geometrischen Parameter der Netzwerke in den unterschiedlichen Skalen variieren über mehrere Größenordnungen. Der einzige Parameter, der scheinbar unabhängig von der Messskala zu sein scheint, ist die Konnektivität der Netzwerke und damit der Perkulationsparameter als quantitatives Maß der Vernetzung. Der Perkulationsparameter führt zu ähnlichen Werten für die mikroskopische und die megaskopische Skala, für die stochastischen Netzwerke in der Skala dazwischen (der makroskopischen Skala) ergeben sich größere Werte. Der Unterschied rührt von der unterschiedlichen Konstruktion der Netzwerke her; die stochastischen Netzwerke besitzen eine konstante Kluftlänge und stochastisch verteilte Aufpunkte, die durch eine Poisson-Verteilung realisiert wurden. Dieses führt dann zu Perkulationsparametern, die konsistent sind mit den theoretischen Werten. Ein kleinerer Perkulationsparameter in den mikroskopischen und

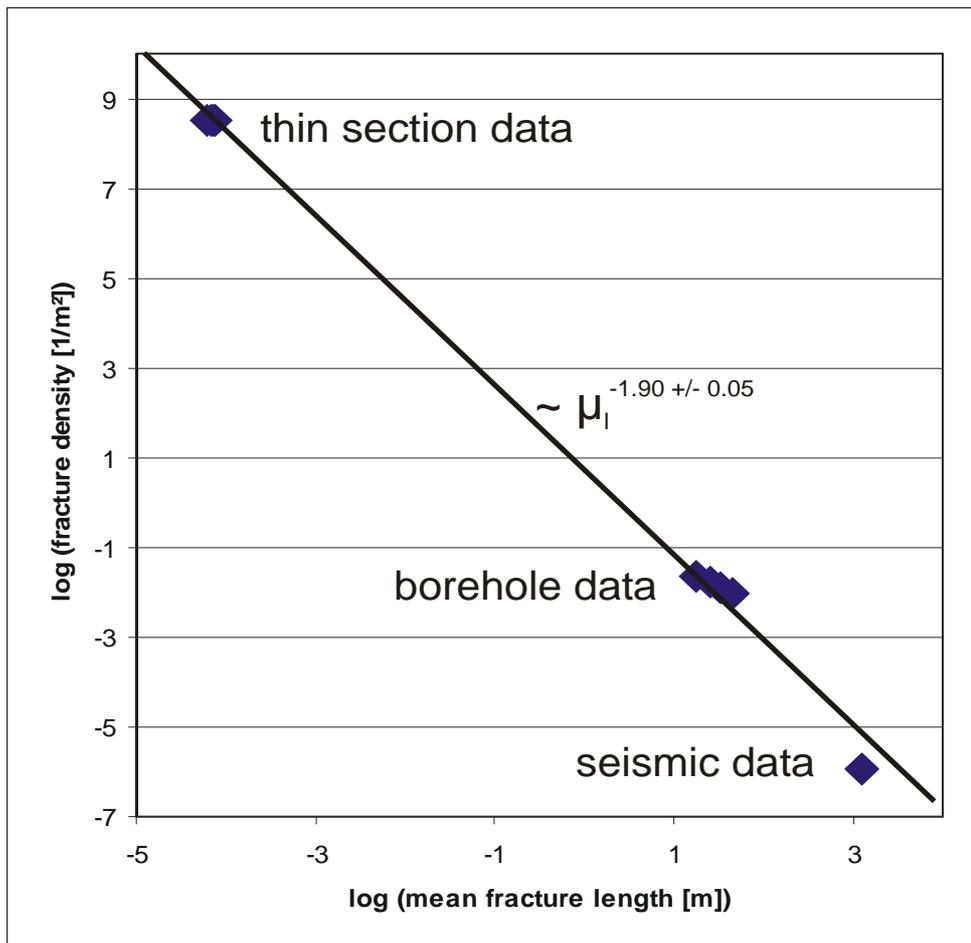


Abb. 18 Doppelt-logarithmische Darstellung der Kluftdichte als Funktion der Kluftlänge der unterschiedlichen untersuchten Datensätze der KTB Bohrungen (nur die Daten oberhalb der Perkolationschwelle wurden berücksichtigt) (aus Zimmermann et al., 2003, Abb. 9; Anlage 2).

megaskopischen Netzwerken lässt sich folgendermaßen erklären. Einerseits kann man von einer 'Clusterisierung' der Klüfte ausgehen, d.h. sie sind nicht zufallsverteilt. Andererseits zeigt die Verteilung der Kluftlängen ein nichtlineares Verhalten, was zu einer 'schiefen' Verteilung führt und damit zu einer Erhöhung der Konnektivität gegenüber einer konstanten Kluftlänge und bei gleicher Kluftanzahl. Der Grund hierfür ist offensichtlich der dominante Einfluss der wenigen ausgedehnten Klüfte.

Für die makroskopischen stochastischen Kluftnetzwerke, die die Skala der Bohrung darstellen, sind alle konstruierten Netzwerke aufgrund ihrer Ausgangsdaten gleichwertig. Um zu entscheiden, welches dieser Netzwerke das plausibelste ist hinsichtlich der hydraulischen Situation an der KTB-Bohrung, sind weitere Informationen notwendig. Die berechnete Permeabilität dieser stochastischen Netzwerke wird geringer mit Verkleinerung der Kluftlänge unter Beibehaltung der gemessenen linearen Häufigkeit der Klüfte λ_L . Eine Verkürzung der Kluftlänge zu 10 m führt zu einem stochastischen Netzwerk, welches weder in der

horizontalen noch in der vertikalen Richtung vernetzt ist. Es handelt sich also um ein Netzwerk, das sich unterhalb der Perkolationsschwelle befindet und impermeabel ist. Die hydraulische Situation im Umfeld der KTB fordert aber eine makroskopische Kluftvernetzung, welches sich durch die Kommunikationsexperimente zwischen der Vorbohrung und der Hauptbohrung gezeigt hat (Kessels & Kück, 1995; Huenges et al., 1997). Dieser Sachverhalt schränkt demzufolge die Auswahl der plausiblen Netzwerke durch eine untere Schranke ein, da zumindest eine makroskopische Vernetzung vorauszusetzen ist und ein solches realistisches Netzwerk oberhalb der Perkolationsschwelle sein sollte. Der kritische Wert l_{crit} der Kluftlänge wird bei etwa 15 m erreicht und stellt damit die theoretisch untere Grenze eines realistischen Modells dar.

Eine obere Schranke ergibt sich, wenn man annimmt, dass sich das kristalline Gestein der KTB-Bohrungen gerade an dieser Grenze befindet. Unter Berücksichtigung dieser speziellen hydraulischen Situation erscheint dann von allen modellierten Netzwerken das Netzwerk mit der konstanten Kluftlänge von 30 m das plausibelste zu sein, da es den geringsten Perkolationsparameter aller vernetzten Modelle besitzt. Dieses ist in Übereinstimmung mit den Überlegungen von Guéguen et al. (1991), die vermuten, dass sich natürliche Gesteinsinformationen in der Nähe der Perkolationsschwelle befinden, falls der Grad der Heterogenität des Gesteins ein Maß erreicht, dass kein repräsentatives Elementarvolumen (REV) und damit kein statistisch homogenes (ergodisches) Medium definierbar ist (Guéguen et al., 1997). Die hydraulisch-mechanische Kopplung resultiert in einem fraktalen Rissnetzwerk. Dieses Netzwerk entsteht durch hydraulische Rissbildung (hydraulic fracturing) aufgrund von Porendruckänderungen und findet so lange statt, bis die Perkolationsschwelle überschritten wird und ein makroskopisch durchlässiges Netzwerk von Rissen und Klüften entstanden ist. Danach wird dieser Prozess beendet und das Kluftnetzwerk befindet sich in einem Gleichgewichtszustand an der Perkolationsschwelle. Diese Argumentation wird für die Gesteine der KTB konkret gestützt durch Arbeiten von Zoback & Harjes (1997), die von einer kritisch gespannten permeablen Kluftzone in der oberen Kruste im Umfeld der KTB berichten, die sich bis unterhalb der Fränkischen Linie bei ca. 7000 m fortsetzt, und die bis in den Bereich der spröde-duktilen Übergangszone reicht. Nach Barton et al. (1995a, 1995b) ist dieses verbunden mit einem Anstieg der Permeabilität in diesen kritisch gespannten Bereichen. Barton et al. (1995a, 1995b) untersuchten den Zusammenhang zwischen der in situ Spannung und dem hydraulischen Fluss im geklüfteten Kristallingestein. Sie konnten zeigen, dass sich bis zu 80 % der hydraulisch leitfähigen Klüfte in einem kritisch gespannten Zustand und einem Reibungsgleichgewicht (frictional equilibrium) mit dem in situ Spannungsfeld befinden. Darüber hinaus konnten Zoback & Harjes (1997) zeigen, dass Mikrobeben in den Kluftzonen der KTB induziert wurden durch extrem geringe Druckänderungen (< 1 MPa). Dieses ist ein weiteres Indiz für eine hydraulische Situation oberhalb der Perkolationsschwelle mit makroskopischen hydraulischen Wegsamkeiten, die mehr als eine lokale Ausdehnung aufweisen.

5.6 Skalenübergreifende Zusammenhänge - Vergleich der KTB und HSDP Bohrungen

Es wurde die Skalenabhängigkeit der Kluftdichte (2-D Dichte) als Funktion der Kluftlänge für die KTB Daten untersucht (Abb. 18) und ein Potenzgesetz mit einem Exponenten von 1.9 ± 0.05 gefunden (Zimmermann et al., 2003; **Anlage 2**). Es wurden alle Netzwerke in die Analyse einbezogen, die oberhalb der Perkolationschwelle lagen, also vernetzt und permeabel waren. Daraus folgte die Interpretation der Geraden in der log-log Darstellung als kritische Grenze zwischen vernetzten und nicht-vernetzten Modellen. Ergänzt man nun die Ergebnisse aus den Hawaii Daten (Abb. 19), ergibt sich für den Dünn schliff ein Ergebnis an der Grenze zu der kritischen Geraden (Zimmermann et al., 2005; **Anlage 5**). Für die BHTV Daten wurden die linearen Häufigkeiten in die Kluftdichten für den oberen Bohrlochabschnitt (eigene Auswertung, Zimmermann et al., 2005; **Anlage 5**) und unteren Bohrlochabschnitt (nach Morin & Wilkens, 2005) umgerechnet und ergeben als zusätzlichen Freiheitsgrad die Kluftlängen.

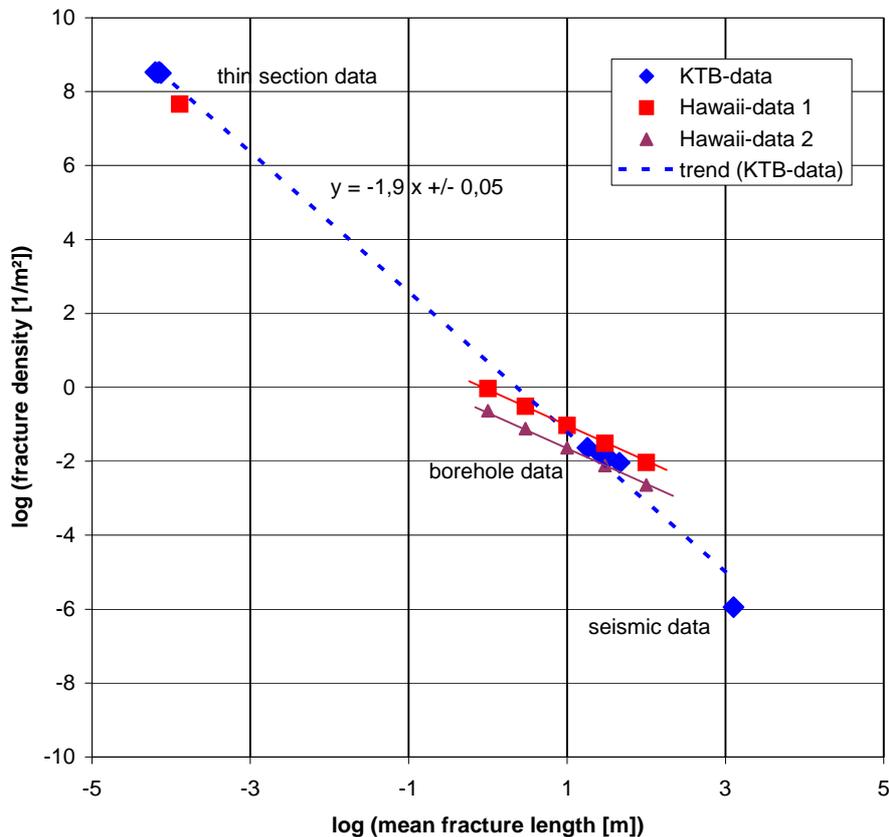


Abb. 19 Zusammenstellung der Kluftdichten als Funktion der mittleren Kluftlängen in den einzelnen Skalenbereichen. Die mit „Hawaii-data 1“ gekennzeichneten Kluflhäufigkeiten wurden aus BHTV- Messungen im Bohrlochintervall von 783,5 - 1147,5 mbsl in Kluflhäufigkeiten umgerechnet. Die mit „Hawaii-data 2“ gekennzeichneten Ergebnisse basieren auf BHTV Untersuchungen von Morin & Wilkens (2005) im unteren Teufenintervall von 1829 - 2896 mbsl (weitere Erläuterungen im Text).

Analog zu den stochastischen makroskopischen Netzwerken der KTB sind alle Netzwerke gleichwertig hinsichtlich ihrer Ausgangsdaten zu betrachten, eine Einschränkung kann nur aufgrund weiterer Überlegungen (z.B. Vernetzungsgrad) erfolgen. Man erkennt für das untere Bohrlochintervall, dass die Modelle mit Kluftlängen von 1 m und 3 m sich links von der kritischen Geraden befinden. Falls es sich hier um ein universelles Charakteristikum handelt, sollten diese Netzwerke nicht vernetzt sein. Die untere Grenze der kritischen Kluftlänge liegt also bei etwa 10 m. Dieses deckt sich mit der Abschätzung aus der Perkolationstheorie, in dem eine kritische Kluftlänge von 6 m abgeschätzt werden konnte. Für das untere Bohrlochintervall ergibt sich eine kritische Grenze der Kluftlänge bei etwa 30 m; auch dieser Wert ist in Übereinstimmung mit der Abschätzung aus der Perkolationstheorie, die einen Wert von 24 m ergibt. Unter der Annahme, dass ein makroskopisches hydraulisches System in diesen Teufenbereichen der HSDP Bohrung existiert, ergibt sich für realistische Modelle eine Mindestlänge für die makroskopischen Klüfte. Diese Annahme wird gestützt durch die Ergebnisse von Dannowski & Huenges (2000), Dannowski (2002) und Büttner & Huenges (2003), die aus Temperaturmessungen Zuflusszonen identifizieren konnten.

6 Schlussfolgerungen

Die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften von Kluftsystemen bilden die Grundvoraussetzungen für das Verständnis der dynamischen Prozesse, der Temperatur und des Spannungsfeldes in der oberen Kruste. Es war die Zielsetzung dieser Arbeiten, Strukturen von Kluftsystemen und die Skalenabhängigkeiten der hydraulischen Parameter zu untersuchen und Zusammenhänge, die diese Größen verbinden, zu erklären. Als Datenbasis wurden die kristallinen Gesteine des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) und die vulkanischen Gesteine des Hawaii Bohrprojekts (HSDP) untersucht. Schlüsselparameter zur Charakterisierung von Klüften und zur Bestimmung der hydraulischen Permeabilität sind die Kluftweite, die Anzahl der Klüfte und die daraus berechneten Häufigkeiten sowie die Kluftvernetzungen in den unterschiedlichen Skalenbereichen. Als Datenbasis zur quantitativen Beschreibung der Riss-Strukturen dienten strukturelle Bohrlochmessungen, seismische Strukturen und Dünnschliffe, die unterschiedliche Skalenbereiche abdecken. Daraus wurden sowohl deterministische als auch stochastische Netzwerke konstruiert und mit Hilfe von Modellrechnungen der hydraulische Fluss zur Abschätzung der Permeabilität simuliert.

Der Perkolationsparameter und der Vernetzungsgrad der Klüfte (Konnektivität) stellen potentielle Invarianten über mehrere Skalen dar. Anhand der Beispiele wurde diese Hypothese für die gewählten Lokationen überprüft. Es zeigte sich, dass die untersuchten Kluft-Netzwerke diese Gemeinsamkeiten aufweisen. Diese zusätzlichen skaleninvarianten Eigenschaften konnten verwendet werden, um ergänzende Kluftparameter in den unterschiedlichen Skalen zu bestimmen. Für die Häufigkeitsverteilung von Klüften folgt dann, dass sie eine analytische Funktion ihrer mittleren Kluftlänge ist. Man erhält also zusätzliche Informationen aus den gemeinsamen Struktureigenschaften der Kluftnetzwerke in den unterschiedlichen Skalen.

Die Verteilungsfunktionen vieler Variablen folgen den gleichen Gesetzmäßigkeiten in den verschiedenen Skalen. Lässt sich diese Eigenschaft also in einer Skala bestimmen, kann diese Information in eine andere Skala übertragen werden, wenn dort diese Eigenschaft nicht bestimmt werden kann. Dieses gilt beispielsweise für die Kluftlängenverteilung, die aus den Dünnschliffanalysen bestimmt wurde, und die Abschätzung der Kluftöffnungsweiten aus den stochastischen Netzwerken aus den Bohrlochdaten der KTB-Hauptbohrung.

Aus den Ergebnissen ergeben sich einige grundlegenden Fragen hinsichtlich der geometrischen Größen in den unterschiedlichen Skalenbereichen. Falls die mittlere Kluftlänge in der makroskopischen Skala kleiner ist als die für eine Vernetzung notwendige, ergibt sich daraus die Schlussfolgerung, dass der hydraulische Transport nicht nur durch makroskopische Klüfte dominiert wird, sondern der Einfluss der Matrix in Form

von Mikrorissen einen entscheidenden Beitrag liefert. Dem steht gegenüber, dass sich z. B. durch die Kommunikationsexperimente zwischen den beiden KTB-Bohrungen gezeigt hat, dass eine sinnvolle Verbindung nur in Form makroskopischer Klüfte möglich ist; nur durch eine Verbindung über mikroskopische Wegsamkeiten sind entsprechende Antwortsignale nicht zu erwarten. Daraus lässt sich als Schluss ziehen, dass Teufenbereiche in der KTB existieren, die oberhalb der Perkolationschwelle liegen; einschränkend muss man aber auch sagen, dass dieses nicht für die gesamte Bohrung gelten muss. Es ist vielmehr nach dem jetzigen Stand zu erwarten, dass sich die Bohrungen an der Perkolationschwelle befinden und auch Abschnitte aufweisen, die unterhalb dieser Schwelle liegen, obwohl sie mit makroskopischen Klüften durchsetzt sind, von denen man aber nicht sagen kann, wie weit sie in das Gestein ragen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die Hawaii Bohrung. Die identifizierten Zuflussbereiche der HSDP Bohrung sind nur plausibel durch ein makroskopisch vernetztes hydraulisches System erklärbar, dass sich demzufolge oberhalb der Perkolationschwelle befinden muss. Geht man auch hier von einem Zustand im Bereich der kritischen Perkolationschwelle aus, lassen sich aus der Bestimmung der Klufthäufigkeiten zweidimensionale Kluftdichten abschätzen, um zu realistischen Modellvorstellungen der hydraulischen Fließwege zu gelangen.

Die Anzahl der erfassbaren Eigenschaften des gesamten hydraulischen Systems ist beschränkt, daher bleibt das Gesamtsystem unterbestimmt. Durch die Hinzunahme von zusätzlichen Informationen aus theoretischen Zusammenhänge ist es möglich, erweiterte plausible Systeme zu konstruieren, die die Natur realistisch widerspiegeln. In diesen Arbeiten wurde sich aufgrund der vorgestellten Datenbasis auf zweidimensionale Netzwerke beschränkt, die Erweiterung auf drei-dimensionale Modelle ist möglich, wenn zusätzliche Informationen vorhanden sind. In der Megaskopischen Skala sind als Ergänzung beispielsweise die Einbindung einer 3D-Seismik und die Erfassung der Mikroseismizität während hydraulischer Frac-Tests zur Quantifizierung von Wegsamkeiten nutzbar, um Aussagen über die regionalen hydraulischen Eigenschaften zu erhalten.

Eine direkte Erfassung der hydraulischen Eigenschaften im Umfeld von Bohrungen liefern Hydraulische Produktions- und Injektions- Tests. Diese Tests sind sehr kostenintensiv und ergeben nur ein integrales Ergebnis des untersuchten Teufenabschnitts. Daher beschränkt man sich im Rahmen von wissenschaftlichen Bohrprojekten meist auf wenige relativ kurze Tests, die jedoch nur eine begrenzte Aussagefähigkeit bezüglich der hydraulischen Eigenschaften liefern, da sie nur ein begrenztes Volumen erfassen. Nur durch die ergänzende Analyse von hydraulischen Informationen in den unterschiedlichen Skalen und deren Verknüpfung ist eine quantitative Interpretation der Fluid-Eigenschaften möglich.

Wagt man einen Blick in die Zukunft, so sind vielfältige Ergänzungen der hier vorgestellten Analysen zur Beschreibung des Fluid-Transports in den unterschiedlichen Skalen denkbar. Diese Ergänzungen beziehen sich zum einen auf eine verbesserte Beschreibung der Geometrie und der individuellen Charakterisierung

von Rissen durch beispielsweise der Einbeziehung der Rauigkeit der Risse und zum anderen auf die Modellierung des Fluid-Transports durch Kopplung unterschiedlichster Wechselwirkungen. Das dynamische Verhalten von Klüften in Abhängigkeit vom Spannungsfeld, d.h. unter welchen Bedingungen bleiben Klüfte offen oder werden geschlossen, kann nur durch die Einbindung der mechanisch-hydraulischen Gesteins-Wechselwirkung erfolgen. Dazu müssen die Modellierungen durch eine hydraulisch-mechanische Kopplung ergänzt werden. Das gleiche gilt für hydraulische Tests, hier wird der Formationsdruck entweder erhöht (bei Injektion) oder verringert (bei Förderung) und verändert die Geometrie der Klüfte. Injiziert man mit Wasser, das eine Temperaturdifferenz zur Formationstemperatur besitzt (das ist der Regelfall), kommt zur hydraulisch-mechanischen Kopplung die thermische Kopplung zur Beschreibung des Fluid-Transports hinzu. Für eine Prognose des Langzeitverhaltens hydraulischer Eigenschaften sind die Berücksichtigung von geochemischen Prozessen (z.B. Ausfällungsreaktionen) und die daraus resultierenden Veränderungen der Durchlässigkeit der Gesteine unerlässlich. Daher wird in zukünftigen Arbeiten die Kopplung unterschiedlichster Prozesse (z.B. thermisch-hydraulisch-mechanisch-geochemische Kopplung) unter Einbeziehung der Geometrie der Fließwege zu immer komplexeren Modellen führen, die die Dynamik der Fluide in geklüfteten Gesteinen immer besser widerspiegelt.

7 Literaturverzeichnis

- Acuna, J., Yortsos, Y., 1995. Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient, *Water Resour. Res.*, **31**, 3, 527-540
- Adler, P.M., Thovert, J.-F., 1998. Real porous media: Local geometry and macroscopic properties, *Appl. Mech. Rev.*, **51**, 9, 537-585
- Adler, P.M., Jacquin, C.G., Thovert, J.-F., 1992. The Formation Factor of Reconstructed Porous Media, *Water Resour. Res.*, **28**, 6, 1571-1576
- Bahr, K., 1997. Electrical anisotropy and conductivity distribution functions of fractal random networks and of the crust: the scale effect of connectivity, *Geophys. J. Int.*, **130**, 649-660
- Balberg, I., 1985. "Universal" percolation-threshold limits in the continuum, *Phys. Rev. B*, **31**, 6, 4053-4055
- Balberg, I., 1986. Excluded-volume explanation of Archie's law, *Phys. Rev. B*, **33**, 5, 3618-3620
- Balberg, I., Anderson, C.H., Wagner, S.A., 1984. Excluded volume and its relation to the onset of percolation, *Phys. Rev. B*, **30**, 7, 3933-3943
- Balberg, I., Berkowitz, B., Drachler, G.E., 1991. Application of a Percolation Model to Flow in Fractured Hard Rocks, *J. geophys. Res.*, **96**, B6, 10015-10021
- Barton, C.A., Hickman, S., Morin, R., Zoback, M.D., Finkbeiner, T., Sass, J., Benoit, D., 1995. Fracture Permeability and its Relationship to In Situ Stress in the Dixie Valley, Nevada, Geothermal Reservoir, *Proceedings of the VIIIth International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling - Tsukuba, Japan*
- Barton, C.A., Zoback, M.D., Moss, D., 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock, *Geology*, **23**, 8, 683-686
- Bear, J., Tsang, C., de Marsily, G., 1993. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press
- Berkowitz, B., 1994. Modelling flow and contaminant transport in fractured media, *Advances in Porous Media*, **2**, 397-451
- Berkowitz, B., Adler, P.M., 1998. Stereological analysis of fracture network structure in geological formations, *J. geophys. Res.*, **103**, 15339-15360
- Berkowitz, B., Balberg, I., 1993. Percolation Theory and Its Application to Groundwater Hydrology, *Water Resour. Res.*, 29(4), 775-794
- Berkowitz, B., R.P. Ewing, 1998. Percolation Theory and Network Modeling Applications in Soil Physics, *Surveys in Geophysics*, **19**, 23-72
- Berkowitz, B., Hadad, A., 1997. Fractal and multifractal measures of natural and synthetic fracture networks, *J. geophys. Res.*, **102**, B6, 12205-12218
- Bernabe, Y., 1995. The transport properties of networks of cracks and pores, *J. geophys. Res.*, **100**, B3, 4231-4241
- Bohnhoff, M., Baisch, S., Harjes, H.-P., 2004. Fault mechanisms of induced seismicity at the superdeep German Continental Deep Drilling Program (KTB) borehole and their relation to fault structure and stress field, *J. geophys. Res.*, **109**, B02309, doi:10.1029/2003JB002528
- Bonnet, E., Bour, O., Odling, N.E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., Berkowitz, B. 2001, Scaling of fracture systems in geological media, *Reviews in Geophysics*, **39**, 3, 347-383
- Bour, O., Davy, P., 1997. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution, *Water Resour. Res.*, 33(7), 1567-1583
- Bour, O., Davy, P., 1998. On the connectivity of three-dimensional fault networks, *Water Resour. Res.*, 34(10), 2611-2622
- Bour, O., Davy, P., Darcel, C., 2002. A statistical model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway), *J. geophys. Res.*, **107**(B6), doi:10.1029/2001JB000176

- Brace, W.F., 1984. Permeability of crystalline rocks: new in situ measurements, *J. geophys. Res.*, **89**, 4327-4330
- Broadbent, S.R., Hammersley, J.M., 1957. Percolation processes. I Crystals and Mazes, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **53**, 629-641
- Brown, S.R., 1987 Fluid Flow Through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness, *J. geophys. Res.*, **92**, B2, 1337-1347
- Brown, S.R., 1995. Simple mathematical model of a rough fracture, *J. geophys. Res.*, **100**, B4, 5941-5952
- Brown, S.R., Bruhn, R.L., 1998. Fluid permeability of deformable fracture networks, *J. geophys. Res.*, **103**, B2, 2489-2500
- Brown, S.R., Kranz, R.L., Bonner, B.P., 1986. Correlation between the surface of natural rock joints, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 13, 1430-1433
- Brown, S.R., Scholz, C.H., 1985. Broad Bandwidth Study of the Topography of Natural Rock Surfaces, *J. geophys. Res.*, **90**, B14, 12575-12582
- Brown, S.R., Scholz, C.H., 1986. Closure of Rock Joints, *J. geophys. Res.*, **91**, B5, 4939-4948
- Brudy, M., Zoback, M.D., Fuchs, K., Rummel, F., Baumgärtner, J., 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength, *J. geophys. Res.*, **102**, 18453-18475
- Büttner, G., Huenges, E., 2003. The heat transfer in the region of the Mauna Kea (Hawaii) – constraints from borehole temperature measurements and coupled thermo-hydraulic modeling, *Tectonophysics*, **371**, 1-4, 23-40
- Burkhardt, H., Zimmermann, G., 1995. Integrierte Auswertung von Bohrlochmessungen zur Bestimmung der in-situ Porosität und Permeabilität, Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Bu298/14-3
- Buysch, A., Pechnig, R., Wohlenberg, J., Kück, J., Harms, U., 2000. Interpretation geophysikalischer Messungen in der Forschungsbohrung "HSDP – Hawaii Scientific Drilling Project" Hilo/Hawaii, Abstract KTB/ICDP Kolloquium in Bochum
- Clauser, C., 1992. Permeability of crystalline rocks, *Eos.-Trans.-AGU*, **73**(21), 233-237
- Cox, L.B., Wang, J.S.Y., 1993. Fractal Surfaces: Measurement and Applications in the Earth Sciences, *Fractals*, **1**, 1, 87-115
- Dannowski, G., 2002. Untersuchung des thermo-hydraulischen Feldes und der Wärmeflussdichte in der Nähe eines aktiven Mantelplumes (Insel Hawaii) mit Hilfe von Bohrlochtemperaturmessungen, *Scientific Technical Report STR02/03*, GeoForschungsZentrum Potsdam
- Darcel, C., Bour, O., Davy, P., 2003. Stereological analysis of fractal fracture networks, *J. geophys. Res.*, **108**, B9, 2451, doi:10.1029/2002JB002091
- David, Ch., 1993. Geometry of Flow Paths for Fluid Transport in Rocks, *J. geophys. Res.*, **98**, B7, 12267-12278
- David, C., Guéguen, Y., Pampoukis, G. 1990. Effective Medium Theory and Network Theory Applied to the Transport Properties of Rock, *J. geophys. Res.*, **95**, 6993-7005
- Davy, P., 1993. On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system, *J. geophys. Res.*, **98**, B7, 12141-12151
- Davy, P., Sornette, A., Sornette, D., 1992. Experimental discovery of scaling laws relating fractal dimensions and the length distribution exponent of fault systems, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 4, 361-363
- DePaolo, D.J., Stolper, E., Thomas, D.M., 2001. Deep Drilling into a Hawaiian Volcano, *Eos Trans. AGU*, Vol. 82, 13, 149-155
- Durham, W.B., 1997. Laboratory observations of the hydraulic behavior of a permeable fracture from 3800 m depth in the KTB pilot hole, *J. geophys. Res.*, **102**, B8, 18405-18416
- ELEKTG Group, 1997. KTB and the electrical conductivity of the crust, *J. geophys. Res.*, **102**, 18289-18305

- Emmermann, R., Lauterjung, J., 1997. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results, *J. geophys. Res.*, Vol. **102**, No. B8, 18179-18201
- Gavrilenko, P., Guéguen, Y., 1998. Flow in fractured media: A modified renormalization method, *Water Resour. Res.*, **34**, 177-191
- Glover, P.W.J., Matsuki, K., Hikima, R., and Hayashi, K., 1999. Characterising rock fractures using synthetic fractal analogues. *Geothermal Science and Technology*, **6**.
- Grawinkel A. and B. Stöckhert, 1997. Hydrostatic pore fluid pressure to 9 km depth – Fluid inclusion evidence from the KTB deep drill hole; *Geophys. Res. Letters*, **24**, 3273-3276.
- Guéguen, Y., Palciauskas, V., 1994. *Introduction to the physics of rocks*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey
- Guéguen, Y., Chelidze, T., Le Ravalec, M., 1997. Microstructures, percolation thresholds, and rock physical properties, *Tectonophysics*, **279**, 23-35
- Guéguen, Y., David, C., Gavrilenko, P., 1991. Percolation networks and fluid transport in the crust, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 5, 931-934
- Guéguen, Y., Gavrilenko, P., Le Ravalec, M., 1996. Scales of rock permeability, *Surveys in Geophysics*, **17**, 245-263
- Haimson, B.C., Chang, C., 2002. True triaxial strength of the KTB amphibolite under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in situ stress, *J. geophys. Res.*, **107**, B10, 2257, doi:10.1029/2001JB000647
- Harjes, H.-P., Bram, K., Dürbaum, H.-J., Gebrande, H., Hirschmann, G., Janik, M., Klöckner, M., Lüschen, E., Rabbel, W., Simon, M., Thomas, R., Tormann, J., Wenzel, F., 1997. Origin and nature of crustal reflections: Results from integrated seismic measurements at the KTB superdeep drilling site, *J. geophys. Res.*, **102**, 18267-18288
- Hestir, K., Long, J.C.S., 1990. Analytical Expressions for the Permeability of Random Two-Dimensional Poisson Fracture Networks Based on Regular Lattice Percolation and Equivalent Media Theories, *J. geophys. Res.*, **93**, B13, 565-581
- Huenges, E., Erzinger, J., Kück, J., Engeser, B. and Kessels, W., 1997. The permeable crust: Geohydraulic properties down to 9101 m depth, *J. geophys. Res.*, **102**, 18255-18265
- Huenges, E., Zimmermann, G., 1999. Rock permeability and fluid pressure at the KTB: Implications from Laboratory - and Drill Hole - Measurements, *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, **54**, 6, 689-694
- Kessels, W., 1990. Zielsetzung und Durchführung Hydraulischer Untersuchungen in der Vohrung KTB—Oberpfalz VB. In Kessels KTB—Report 90-5, NLFb, Hannover
- Kessels, W., Kück, J., 1995. Hydraulic communication in crystalline rocks between the two borehole of the Continental Deep Drilling Programme in Germany, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, **32**, 37-47
- Kim, H.M., Inoue, J., 2003. Analytical approach for anisotropic permeability through a single rough rock joint and shear deformation, *J. geophys. Res.*, **108**, B8, 2366, doi:10.1029/2002JB002283
- A. Körner, 1997. *Untersuchung hydraulischer Wegsamkeiten von Kluftsystemen mittels stochastischer Modelle im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB)*, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin
- Kojima, K., Tosaka, H., Ohno, H., 1989. *An approach to wide-ranging correlation of fracture distributions using the concept of fractal*, 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Morgantown, West Virginia, 211-218
- Kolditz, O., 1992. Kontinuum-Konzept für das geklüftete Medium, *NLFb-Bericht*, 110327, Hannover
- Kolditz, O., 1996. Physikalisch-Mathematische Modellbildung, Lehrgang: Prozeßsimulation im Kluftgestein - Aquifere und Geologische Barriere, 24.06. - 26.06.1996 Hannover
- Kolditz, O., 2002. *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Kolditz, O., Kosakowski, G., 1996. Strukturmodelle für Kluftgesteine, Lehrgang: Prozeßsimulation im Kluftgestein - Aquifere und Geologische Barriere, 24.06. - 26.06.1996 Hannover

- Kosakowski, G., 1994. Simulation von Strömung und Wärmetransport im variszischen Grundgebirge: Vom natürlichen Kluftsystem zum numerischen Gitternetzwerk, *NlfB-Bericht*, 112046, Hannover
- Kosakowski, G., 1996a. Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüfteten Medien: Vom natürlichen Kluftsystem zum numerischen Gitternetzwerk, *VDI Verlag*, Reihe 7, Nr. 304, 124 Seiten
- Kosakowski, G., 1996b. Hydraulik Fraktaler Netzwerke, Lehrgang: Prozeßsimulation im Kluftgestein - Aquifere und Geologische Barriere, 24.06. - 26.06.1996 Hannover
- Lege, T., Kolditz, O., Zielke, W., 1996. Strömungs- und Transportmodellierung, *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Bd. 2, Springer Verlag
- Long, J.C.S., Gilmour, P., Witherspoon, P.A., 1985. A Model for Steady Fluid Flow in Random Three-Dimensional Networks of Disc-Shaped Fractures, *Water Resour. Res.*, **21**, 8, 1105-1115
- Long, J. C. S., Witherspoon, P. A., 1985. The Relationship of the Degree of Interconnection to Permeability in Fracture Networks, *J. geophys. Res.*, **90**, B4, 3087-3098
- Madadi, M., VanSiclen, C.D., Sahimi, M., 2003. Fluid flow and conduction in two-dimensional fractures with rough, self-affine surfaces: A comparative study, *J. geophys. Res.*, **108**, B8 2396; doi:10.1029/2002JB002332
- Madden, T.R., 1983. Microcrack Connectivity in Rocks: a Renormalization Group Approach to the Critical Phenomena of Conduction and Failure in Crystalline Rocks, *J. geophys. Res.*, **88**, B1, 585-592
- McDermott, C.I., Kolditz, O., 2004. Hydraulic-Geometrical effective stress model: Determination of discrete fracture network parameters from a pump test and application to geothermal reservoir modelling, *Proc. Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2004, SGP-TR-175
- Meakin, P., 1991. Fractal Aggregates in Geophysics, *Reviews of Geophysics*, **29**, 3, 317--354
- Méheust, Y., Schmittbuhl, J., 2001. Geometrical heterogeneities and permeability anisotropy of rough fractures, *J. geophys. Res.*, **106**, B2, 2089-2102
- Millich E., Neugebauer, H.J., Huenges, E., Nover, G., 1998. Pressure Dependence of Permeability and Earth Tide Induced Flow; *Geophys. Res. Letters*, **25**, 809-812
- Möller, P., Weise, S.M., Althaus, E., Bach, W., Behr, H.J., Borhcardt, K., Bräuer, K., Drescher, J., Erzinger, J., Faber, E., Hansen, B.T., Horn, E.E., Huenges, E., Kämpf, H., Kessels, W., Kirsten, T., Landwehr, D., Lodemann, M., Machon, L., Pekdeger, A., Pielow, H.-U., Reutel, C., Simon, K., Walther, J., Weinlich, F.H., Zimmer, M. 1997. Paleofluids and Recent fluids in the upper continental crust: Results from the German Continental Deep Drilling Program (KTB), *J. geophys. Res.*, **102**, 18223-18254
- Moreno, L., Tsang, Y.W., Tsang, C.F., Hale, F.V., and Neretnieks, I., 1988. Flow and Tracer Transport in a Single Fracture - a Stochastic-Model and Its Relation to Some Field Observations. *Water Resources Research*, **24**, 2033-48.
- Morin, R.H. & Paillet, F.L. 1996. Analysis of fracture intersecting Kahi Puka Well 1 and its relation to the growth of the island of Hawaii, *J. geophys. Res.*, **101**, B5, 11695-11699.
- Morin, R.H., Wilkens, R.H., 2005. Structure and stress state of Hawaiian island penetrated by the Hawaii scientific Drilling Project deep core hole,), *J. geophys. Res.*, **110**, B07404, doi:10.1029/2004JB003410
- Neuman, S.P., 1994. Generalized Scaling of Permeabilities: Validation and Effect of Support Scale, *Geophys. Res. Letters*, **21**, 5, 349-352
- Olson, J.E., 2003. Sublinear scaling of fracture aperture versus length: An exception or the rule? *J. geophys. Res.*, **108**(B9), 2413; doi: 10.1029/2001JB000419
- Ozkaya, S.I., Mattner, J., 2003. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs, *Computers & Geosciences*, **29**, 143-153
- Pechinig, R., Buysch, A., Wohlenberg, J., Harms, U., Kück, J., Dannowski, G., Huenges, E., Steveling, E., Stoll, J., Leven, M., de Wall, H., Kontny, A., Zimmermann, G., 2000. Hawaii Scientific

Drilling Project – Internstruktur und posteruptive Prozesse des Mauna Kea, Expanded Abstract, KTB/ICDP-Kolloquium 2000 in Bochum

- Pechinig, R., Haverkamp, S., Wohlenberg, J., Zimmermann, G., Burkhardt, H., 1997. Integrated log interpretation in the German Continental Deep Drilling Program - Lithology, porosity, and fracture zones, *J. geophys. Res.*, **102**, 18363-18390
- Perfettini, H., Campillo, M., Ionescu, I., 2003a. On the scaling of the slip weakening rate of heterogeneous faults, *J. geophys. Res.*, **108**, B9, 2410, doi:10.1029/2002JB001969
- Perfettini, H., Schmittbuhl, J., Cochard, A., 2003b. Shear and normal load perturbations on a two-dimensional fault: 1. Static triggering, *J. geophys. Res.*, **108**, B9, 2408, doi:10.1029/2002JB001805
- Perfettini, H., Schmittbuhl, J., Cochard, A., 2003c. Shear and normal load perturbations on a two-dimensional fault: 2. Dynamic triggering, *J. geophys. Res.*, **108**, B9, 2409, doi:10.1029/2002JB001805
- Pusch, G., Enachescu, C., Mieke, R., Ostrowski, L., 1991a. Drill stem test analysis in the KTB-V-Well, Part1: fundamentals of hydraulic test analysis, *Scientific Drilling*, **2**, 299-305
- Pusch, G., Enachescu, C., Mieke, R., Ostrowski, L., 1991b. Drill stem test analysis in the KTB-V-Well, Part 2: results of the drill stem test analyses, *Scientific Drilling*, **2**, 299-305
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London
- Renard, F., Schmittbuhl, J., Gratier, J.-P., Meakin, P., Merino, E., 2004. Three-dimensional roughness of stylolites in limestones, *J. geophys. Res.*, **109**, B03209, doi:10.1029/2003JB002555
- Renshaw, C.E., 1998. Sample bias and the scaling of hydraulic conductivity in fractured rock, *Geophys. Res. Letters*, **25**, 1, 121-124
- Robinson, P.C., 1983. Connectivity of fracture systems – a percolation theory approach, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **16**, 605-614
- Robinson, P.C., 1984. Numerical calculations of critical densities for lines and planes, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **17**, 2823-2830
- Rotherth, E., Shapiro, S.A., Buske, S., Bohnhoff, M., 2003. Mutual relationship between microseismicity and seismic reflectivity: Case study at the German Continental Deep Drilling Site (KTB), *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 17, 1893, doi:10.1029/2003GL017848
- Saar, M.O., Manga, M., 1999. Permeability-porosity relationship in vesicular basalts, *Geophysical Research Letters*, **26**, 1, 111-114
- Sahimi, M., 1995. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock – from classical methods to modern approaches*, VCH, Weinheim
- Schmittbuhl, J., Schmitt, F., Scholz, C., 1995. Scaling invariance of crack surfaces, *J. geophys. Res.*, **100**, B4, 5953-5973
- Selyakov, V.I., Kadet, V.V., 1996. *Percolation Models for Transport in Porous Media – with Applications to Reservoir Engineering*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Shapiro S.A., Audigane, P., Royer, J.-J., 1999. Large-scale in situ permeability tensor of rocks from induced microseismicity, *Geophys. J. Int.*, **137**, 207-213
- Shapiro S.A., E. Huenges & G. Borm, 1997. Estimating the Crust Permeability from Fluid-Injection-Induced Seismic Emission at the KTB Site; *Geophys. J. Int.*, **132**, F15-F18.
- Shapiro S.A., Royer, J.-J., Audigane, P., 1998. Estimating the permeability from fluid-injection induced seismic emission, *Poromechanics*, Thimus et al. (eds), Balkema, Rotterdam, 301-305
- Sisavath, S., Mourzenko, V., Genthon, P., Thovert, J.-F., Adler, P.M., 2004. Geometry, percolation and transport properties of fracture networks derived from line data, *Geophys. J. Int.*, **157**, 917-934
- Stauffer, D., Aharony, A., 1995. *Perkolationstheorie: Eine Einführung*, VCH, Weinheim
- Thovert, J.-F., Adler, P.M., 2004. Trace analysis for fracture networks of any convex shape, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22502, doi:10.1029/2004GL021317
- Tsang, C.-F., 1991. Coupled hydromechanical-thermochemical processes in rock fractures. *Rev. Geophys.*, **29**, 537 - 52.

- Tsang, C.-F., Neretnieks, I., 1998. Flow channeling in heterogeneous fractured rocks, *Reviews of Geophysics*, **36**, 2, 275-298
- Tsang, Y.W., 1984. The Effect of Tortuosity on Fluid Flow Through a Single Fracture, *Water Resour. Res.*, **20**, 9, 1209-1215
- Tsang, Y.W., Witherspoon, P.A., 1983. The Dependence of Fracture Mechanical and Fluid Flow Properties on Fracture Roughness and Sample Size, *J. geophys. Res.*, **88**, B3, 2359-2366
- Van Everdingen, D.A., 1995. Fracture characteristics of the Sheeted Dike Complex, Troodos ophiolite, Cyprus: Implications for permeability of oceanic crust, *J. geophys. Res.*, **100**, B10, 19957-19972
- Van Sicle, C.D., 2002. Equivalent channel network model for permeability and electrical conductivity of fractured networks, *J. geophys. Res.*, **107**(B6), doi:10.1029/2000JB000057
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D., Touchard, G., 1991. Fractal patterns of fractures in granites, *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 25-35
- Velde, B., Moore, D., Badri, A., Ledesert, B., 1993. Fractal and Length Analysis of Fractures during Brittle to Ductile Changes, *J. geophys. Res.*, **98**, B7, 11935-11940
- Vollbrecht, A., Weber, K., 1992. Mikrorisse und Quarz-Deformationslamellen in Paragneisen der KTB-Vorbohrung: Indikation für Paläospannungen, KTB-Report 92-4, NLFb, Hannover
- Vollbrecht, A., Dürrast, H., Weber, K., 1993. Open Microcracks: Indicators for In situ Stress Directions, Contributions to the 6. annual KTB-Colloquium, KTB-Report 93-2, NLFb, Hannover
- Vollbrecht, A., Dürrast, H., Kraus, J., Weber, K., 1994. Paleostress directions deduced from microcrack fabrics in KTB core samples and granites from the surrounding area, *Sci. Drill.*, **4**, 233-241
- Wagner, G.A., Coyle, D.A., Duyster, J., Henjes-Kunst, F., Peterek, A., Schröder, B., Stöckert, B., Wemmer, K., Zulauf, G., Ahrendt, A., Bischoff, R., Hejl, E., Jacobs, J., Menzel, D., Nand Lal, Van den haute, P., Vercautere, C., Welzel, B., 1997. Post-Variscan thermal and tectonic evolution of the KTB site and its surroundings, *J. geophys. Res.*, **102**, 18221-18232
- Walsh, J.B., 2003. A theoretical analysis of sliding of rough surfaces, *J. geophys. Res.*, **108**, B8, 2385, doi:10.1029/2002JB002127
- Wang, J.S.Y., Narasimhan, T.N., Scholz, C.H., 1988. Aperture Correlation of a Fractal Fracture, *J. geophys. Res.*, **93**, B3, 2216-2224
- Warren, J.E., Root, P.J., 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs, *Society of Petroleum Engineers Journal, AIME*, **228**, 245-255
- Watanabe, K., Takahashi, H., 1995. Fractal geometry characterization of geothermal reservoir fracture networks, *J. geophys. Res.*, **100**, B1, 521-528
- Wollrath, J., 1990. Ein Strömungs- und Transportmodell für klüftiges Gestein und Untersuchungen zu homogenen Ersatzsystemen, Dissertation, Universität Hannover
- Zillmer, M., Müller, G., Stiller, M., 2002. Seismic reflections from crystalline crust below the Continental Deep Drilling Site KTB: Modeling and inferences on reflector properties, *J. geophys. Res.*, **107**, B9, 2180, doi:10.1029/2001JB000843
- Zimmermann, G., 1991. Integrierte Auswertung von Bohrlochmessungen der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) mit Verfahren der Multivariaten Statistik, Dissertation, Technische Universität Berlin
- Zimmermann, G., Bucker, C., Melchert, M., Wöhr, T., 1992a. Comparison of Gamma-ray Log and Core Measurements in the KTB Oberpfalz VB - a Method to Estimate the Depth Offset between Logging and Coring, *Scientific Drilling*, **3**, 1 - 5
- Zimmermann, G., Burkhardt, H., Melchert, M., 1992b. Estimation of porosity in crystalline rock by a multivariate statistical approach, *Scientific Drilling* **3**: 27-35
- Zimmermann, G., Burkhardt, H., 1995. Abschätzung der Porosität aus Bohrlochmessungen der KTB, 55. Jahrestagung der DGG in Hamburg

- Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2002a. Scale dependence of hydraulic and structural parameters in fractured rock, Proc. of the 2nd Biot Conference on Poromechanics, Auriault et al. (eds), Poromechanics II, 593-596
- Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2002b. Abschätzung struktureller Parameter von Kluftnetzwerken an der Perkolationschwelle, Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband III, 80-85
- Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2003. Scale dependence of hydraulic parameters in the crystalline rock of the KTB, Pure appl. geophys., 160, 1067-1085
- Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2005. Scale dependence of hydraulic and structural parameters in fractured rock, from borehole data (KTB and HSDP), in: Petrophysical Properties of Crystalline Rocks, Harvey, P.K., Brewer, T.S., Pezard, P.A. & Petrov, V.A. (eds), Geological Society, London, Special Publications, 240, 37-45
- Zimmermann, G., Huenges, E., Burkhardt, H., 1996. Permeabilitätsprofil im Kristallin - Meßergebnis und Netzwerkmodellierungen in der KTB -, *KTB/ICDP-Kolloquium Gießen*
- Zimmermann, G., Körner, A., Burkhardt, H., 2000. Hydraulic pathways in the crystalline rock of the KTB, *Geophys. J. Int.*, **142**, 4-14
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut, D.J., 2004. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **40**, 1049-1076
- Zoback, M.D., Harjes, H.-P., 1997, Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany, *J. geophys. Res.*, **102**, 18477-18491

Anlagen

Anlage 1

Huenges, E., **Zimmermann, G.**, 1999. Rock permeability and fluid pressure at the KTB: Implications from laboratory- and drill hole- measurements, *Oil & Gas Science and Technology*, Rev. IFP, **54**(6), 689-694

Anlage 2

Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2003. Scale dependence of hydraulic parameters in the crystalline rock of the KTB, *Pure appl. geophys.*, **160**, 1067-1085

Anlage 3

Zimmermann, G., Körner, A., Burkhardt, H., 2000. Hydraulic pathways in the crystalline rock of the KTB, *Geophys. J. Int.*, **142**(1), 4-14

Anlage 4

Pechnig, R., Haverkamp, S., Wohlenberg, J., **Zimmermann, G.**, Burkhardt, H., 1997. Integrated Log Interpretation in the German Continental Deep Drilling Project: Lithology, Porosity and Fracture Zones, *J. Geophys. Res.*, **102**(B8), 18363-18390

Anlage 5

Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2005. Scale dependence of hydraulic and structural parameters in fractured rock, from borehole data (KTB and HSDP), in: *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks*, Harvey, P.K., Brewer, T.S., Pezard, P.A. & Petrov, V.A. (eds), *Geological Society, London, Special Publications*, **240**, 37-45

Anlage 6

Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2002a. Scale dependence of hydraulic and structural parameters in fractured rock, Proc. of the 2nd Biot Conference on Poromechanics, Auriault et al. (eds), *Poromechanics II*, 593-596

Anlage 7

Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2002b. Abschätzung struktureller Parameter von Kluftnetzwerken an der Perkolationsschwelle, *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Sonderband III, 80-85