

## Wärmeproduktion und Krustenmodelle

U. Haack (Giessen)

### Einleitung

Die Vorhersagen über die zu erwartende Temperatur in 10 km Tiefe hatten großen Einfluß auf die Entscheidung, die KTB-Bohrung nicht im Schwarzwald, sondern in der Oberpfalz anzusetzen. Die Bohrung wird zeigen, ob diese Voraussagen einigermaßen richtig waren oder nicht. Das ist nicht nur deshalb wichtig, weil es das Bohren und die Technik unmittelbar betrifft, sondern weil sich erweisen wird, ob unsere Vorstellungen über den Aufbau der Kruste und ihre thermische Struktur einigermaßen zutreffen oder nicht.

Faktoren, welche in die Temperaturvorhersage eingingen, waren der Wärmefluß im Umfeld der geplanten Bohrungen (gemessen von der Karlsruher Gruppe Jäger, Stiefel, Wilhelm und der Berliner Gruppe Burkhardt, Honarmand, Wägerle) und die Wärmeproduktionsraten der Gesteine aus dem Zerfall von U, Th und K. Dazu führte unsere Gruppe in Göttingen nahezu 1000 Messungen der natürlichen Radioaktivität mit Hilfe der  $\gamma$ -Spektrometrie aus, um ihren Beitrag zur Entscheidung über den Standort der Bohrung zu leisten. Die radiogene Zerfallswärme A kann aus den Konzentrationen von U, Th und K nach folgender Formel berechnet werden.

$$(1) \quad A_0 = \frac{S}{100} (9,52 U + 2,56 Th + 3,48 K) \mu W m^{-3}$$

(U und Th in ppm, K in %)

Für die Temperatur T (z) in einer bestimmten Tiefe sind aber nicht nur die Größe der Wärmeproduktionsrate A<sub>0</sub> sondern auch die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine und die vertikale Verteilung der Wärmequellen maßgebend, wie aus der folgenden Formel (für den stationären Fall) leicht zu ersehen ist:

$$(2) \quad T(z) = T_0 + \frac{Q_0 \cdot z}{\lambda} - \frac{Az^2}{2\lambda}$$

wobei T<sub>0</sub> die Temperatur an der Oberfläche,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit, Q<sub>0</sub> der Wärmefluß an der Oberfläche und A die als konstant gedachte Wärmeproduktionsrate in dieser Schicht sind.

A<sub>0</sub> an der Oberfläche oder in den flachen Bohrlöchern konnten wir messen, die vertikale Verteilung in der Kruste indessen kennen wir nicht. Sie ist jedoch besonders wichtig, weil sie maßgebenden Einfluß auf deren thermische Struktur und damit auf die tektonischen und chemischen Eigenschaften ausübt. Nur so viel ist klar, daß - global gesehen - die wärmeerzeugenden Elemente U, Th und K ganz stark in der Erdkruste angereichert sind und daß sie außerdem in dieser wiederum stark nach oben hin konzentriert sein müssen. Diesem Postulat liegt folgende Überlegung zugrunde: Der in einer Schicht der Dicke s entstehende Wärmefluß ist gegeben durch

$$(3) \quad Q_s = A_s \cdot s$$

Wäre nun die ganze Kruste so radioaktiv wie durchschnittliche Oberflächengesteine, so würde eine 20-30 km dicke Kruste genügen, den gesamten gemessenen Wärmestrom aus ihr alleine abzuleiten, der Erdmantel trüge gar nichts bei. Diese Vorstellung, ist aber nicht mit unserem Wissen über Schmelzvorgänge im Erdmantel vereinbar. Weiterhin kennen wir in den Granuliten Gesteine aus der Unterkruste, die meist - aber nicht immer - an U und Th verarmt sind. Es spricht also alles dafür, daß die radioaktiven Elemente nicht nur in der Kruste gegenüber dem Erdmantel stark angereichert sind, sondern sich außerdem in ihr noch einmal in den obersten Schichten konzentriert haben. Wollte man diese Vorstellung nicht akzeptieren, so müßte man aktive Kühlung der Erdkruste, z.B. durch großflächige und tief absteigende Wässer oder durch gerade im Gang befindliche Regionalmetamorphose, die endotherm verläuft, postulieren.

Die Tiefbohrung wird auch über diesen Aspekt des Wärmehaushaltes Auskunft geben.

Eine häufig festgestellte lineare Korrelation besteht zwischen Wärmefluß  $Q_0$  und Wärmeproduktion  $A_0$  an der Erdoberfläche. Das zeigt Fig. 1. Die Beziehung hat die Form

$$(4) \quad Q_0 = Q + D \cdot A_0$$

wobei  $Q$  der sogen. reduzierte Wärmefluß ist. Man könnte ihn auffassen als den Wärmefluß, der von unten in eine Schicht der Dicke  $D$  mit der Wärmeproduktionsrate  $A_0$  eintritt. Lachenbruch (1968) hat Argumente dafür vorgebracht, daß diese Beziehung besser anders interpretiert wird, nämlich als Ausdruck einer exponentiell mit der Tiefe  $z$  abnehmenden Wärmeproduktionsrate der Form

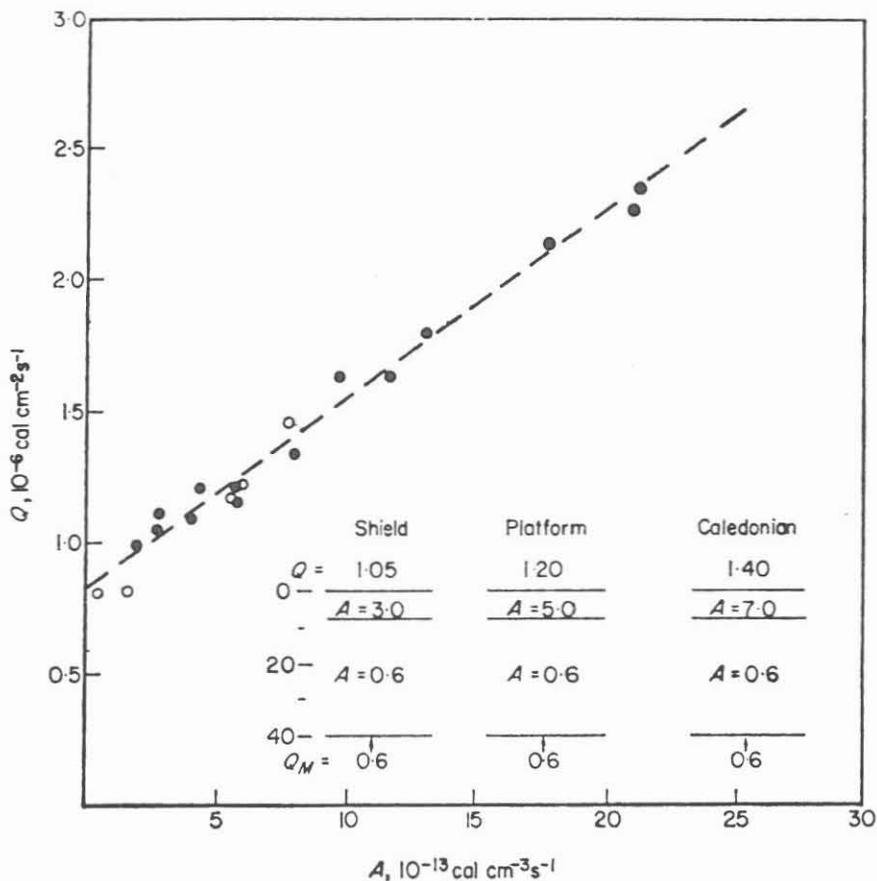


Fig. 1  
Lineare Korrelation von Wärmefluß  $Q$  und Wärmeproduktionsrate  $A$  für Plutone von Neu-England (ausgefüllte Kreise) und der Zentralen Stablen Region (offene Kreise). Aus Roy et al. (1968).

$$(5) \quad A(z) = A_0 \cdot e^{-z/D}$$

D wird aus Gl.(4) gewonnen, hat die Dimension (km) und liegt zwischen 4 und 20, meist bei 10 km. Die geplante Tiefe der Bohrung liegt also in der gleichen Größe und eröffnet somit die Chance, evtl. vorhandene Gradienten zu erfassen. Gl.(5) folgt allerdings nicht zwingend aus Gl.(4). Es sind auch andere Modelle der Abnahme von A mit der Tiefe, z.B. in Stufen, denkbar. Fig. 2

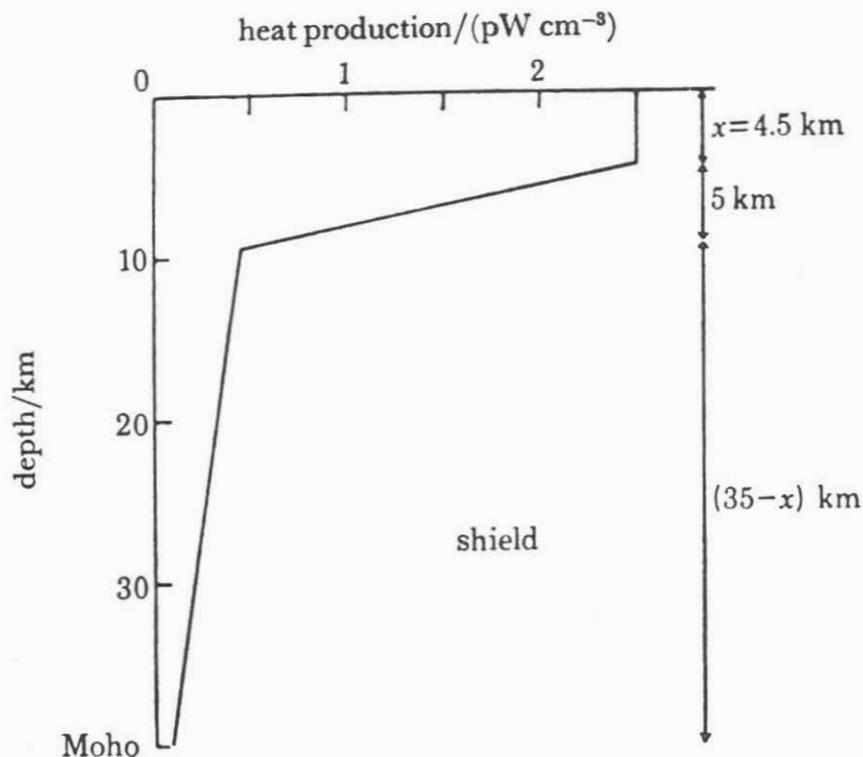


Fig. 2  
Modell der stufenweisen Abnahme der Wärmeproduktionsrate mit der Tiefe für den südwestaustralischen Schild (aus Lambert und Heier, 1968)

zeigt ein Beispiel dafür. Wie Fig. 3 zeigt, wurden weder in der Oberpfalz noch im Schwarzwald besonders klare Korrelationen zwischen Wärmefluß und Wärmeproduktion gefunden. In der Oberpfalz bilden die Punkte für die Gneise eine eng gescharte Gruppe, während die für zwei Granite und einen Redwitzit weit ab liegen. Letztere haben zwar hohe Wärmeproduktionsraten  $A_0$ , aber damit geht keineswegs ein entsprechend höherer Wärmefluß einher. Die Lage der Punkte für die Gneise muß wahrscheinlich in zwei Fällen korrigiert werden: Sowohl der Eklogit von Weißenstein als auch der Amphibolit von Rammelberg sind kleine Gesteinskörper und ausgesprochen arm an wärmeerzeugenden Elementen. In ihnen dominiert der aus der Umgebung eintretende Wärmestrom bei weitem. Folglich muß man ihn auch mit der Wärmeproduktionsrate der Umgebung korrelieren. Wenn man dies tut, bilden die Gneise der Oberpfalz - gleichgültig ob saxothuringisch oder moldanubisch -

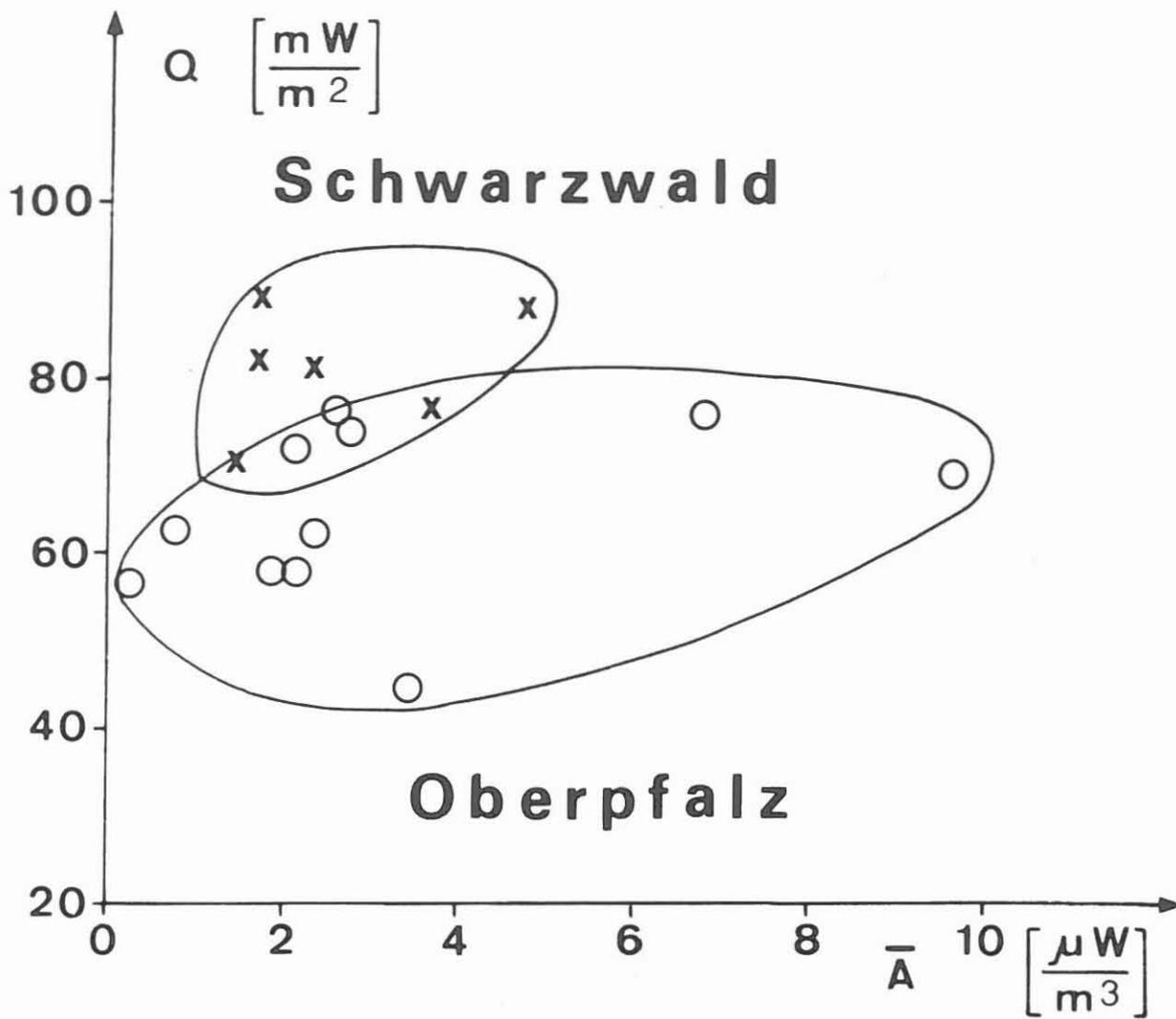


Fig. 3  
Wärme flu ß vs. Wärme produktion für Schwarzwald und Oberpfalz

eine einzige Gruppe. Das ist in Fig. 4 gezeigt. Ihre darstellenden Punkte scharen sich eng um eine Gerade mit der schlecht definierten Neigung von ca. 20 km. Sollte Gl.(5) hier anwendbar sein, so müßte das bedeuten, daß die Wärmeproduktionsrate nur sehr langsam mit der Tiefe abnimmt.

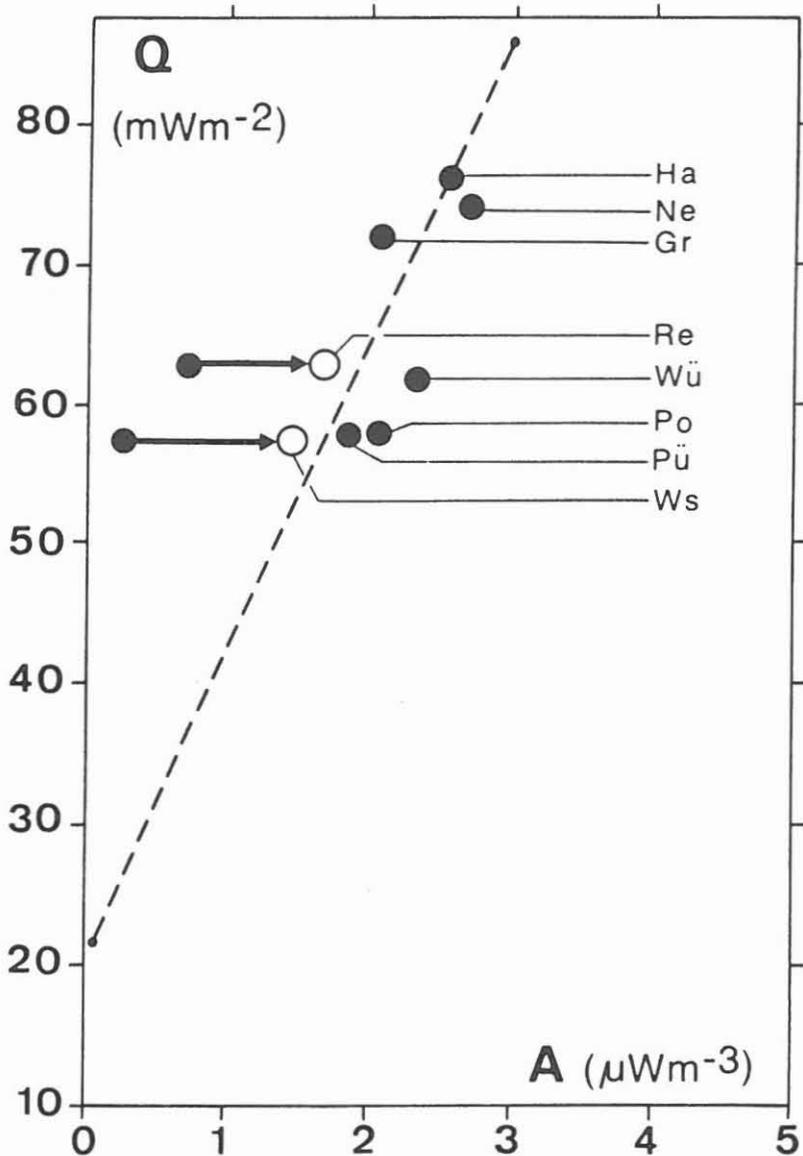
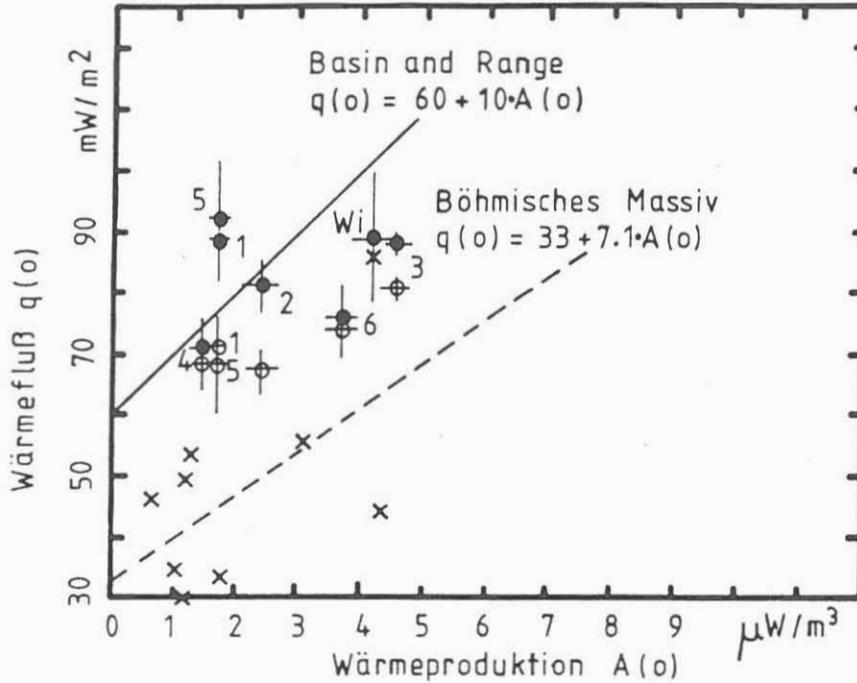


Fig. 4  
Wärmefluß vs. Wärmeproduktion für die Gneise der Oberpfalz. Die Lage der Bohrpunkte Remmelberg und Weißenstein korrigiert (s. Text).

Im Schwarzwald bilden Punkte für Granit und Gneise eine einheitliche Gruppe mit schlechter Korrelation. Bringt man jedoch Korrekturen für thermische Effekte der Erosion an, so stellt sich eine ganz gute Korrelation ein. Das zeigt Fig. 5, die aus den



**Geothermische Vorbohrungen:**

- |                |                |
|----------------|----------------|
| 1: Hechtsberg  | 4: Kunklerwald |
| 2: Schön matt  | 5: Ettersbach  |
| 3: Moosengrund | 6: Geschahse   |

- : topographiekorr. Werte
- : erosionskorr. Werte

**Literaturdaten**

- Wi: Wildbad (Kiderlen, 1977)
- X: Böhmisches Massiv (Čermák, 1980)

Fig. 5  
Wärmefluß vs. Wärmeproduktion für den Schwarzwald mit Korrekturen. Zum Vergleich Angaben für die Basin und Range Provinz und die Böhmisches Masse, Aus Stiefel et al (1986).

Berichten der Karlsruher Gruppe stammt. Aus Fig. 3 kann man entnehmen, daß im Schwarzwald bei niedrigerer Wärmeproduktionsrate  $A_0$  der Wärmefluß  $Q_0$  viel höher ist als in der Oberpfalz. Diese Beobachtung ist letztlich der Grund, warum für die Temperatur in 10 km Tiefe für den Schwarzwald eine viel höhere Temperatur vorhergesagt wurde als für die Oberpfalz. Die Erklärung dieses Unterschiedes kann nicht in der Radioaktivität der Oberkruste liegen, denn diese ist im Schwarzwald ja deutlich geringer als in der Oberpfalz. Zur Deutung sind wir deshalb auf Annahmen angewiesen. Insbesondere sind solche über die vertikale Verteilung der wärmeproduzierenden Elemente notwendig. Und damit ist impliziert, daß man über den lithologischen Aufbau der Kruste spekulieren muß. Auch die Rolle hydrothermalen Konvektion ist im Schwarzwald ganz beträchtlich, wie die Karlsruher Gruppe plausibel gemacht hat.

#### U, Th und K in den Gesteinen

Bei einem durchschnittlichen Verhältnis Th/U von 3.8-4 tragen sowohl U als auch Th jeweils 40-45% zur radiogen erzeugten Wärme bei. Nun schwanken die Gehalte dieser Elemente sowohl kleinräumig, d.h. im mm- bis cm- Bereich, als auch großräumig äußerst stark. Das kommt vor allem daher, daß sie quasi punktförmig hochkonzentriert in Spurenmineralen vorkommen. Deshalb ist es sehr schwierig, eine für das Gesamtgestein repräsentative Probe zu ziehen. Wir haben zwar zur Messung jeweils 1/2 kg verwendet, aber trotzdem gibt es Schwankungen, weil die Proben nicht vollständig repräsentativ sind. Viel größer aber sind noch die geologisch vorgegebenen Unterschiede von Probe zu Probe. Das machen die Fig. 6 und 7 deutlich. Dargestellt sind hier die Ergebnisse unserer Messungen in den Geothermiebohrungen: Vertikal die Tiefe, horizontal die Wärmeproduktionsraten. Die Fläche integriert ergibt die mittlere Wärmeproduktionsrate (1. Zahl unter jeder Darstellung). Fast immer sind die arithmetischen Mittel wie auch die Mediane sehr gute Schätzungen der mittleren Wärmeproduktionsraten. Es zeigte sich, daß etwa 10 - 15 Messungen pro Bohrloch - auch bei stark schwankenden Gehalten - ausgereicht hätten, um selbst Gesteinspakete mit sehr variabler Lithologie ausreichend hinsichtlich der mittleren Wärmeproduktionsrate zu charakterisieren. Sinngemäß übertragen ist es also plausibel, aus den Werten für einigermaßen wahllos genommene - aber dennoch geographisch breitgestreute - Proben, Mittelwerte für bestimmte Gesteinseinheiten, z. B. die Gneise der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß, zu berechnen. Es zeigte sich auch eine weitgehende Ähnlichkeit zwischen den Mittelwerten für Proben von der Oberfläche und solchen aus Bohrlöchern.

#### Modelle

Die Wärmeproduktionsraten  $A_0$  und die gemessenen Wärmeflüsse  $Q_0$  haben eine wichtige Rolle bei der Diskussion des Aufbaues der Kruste in den beiden Lokationen gespielt. Obwohl es sicherlich nicht ganz der Realität entspricht, wurde bei diesen Modellbetrachtungen vorausgesetzt, daß hydrothermale Konvektion vernachlässigt werden kann. Höchstwahrscheinlich ist diese Voraussetzung im Schwarzwald schlechter erfüllt als in der Oberpfalz. Weiterhin wurde vorausgesetzt, daß sich die Gebiete beider Lokationen im thermischen Gleichgewicht befinden, also nicht durch bedeutende Vertikalbewegungen gestört sind.

Man steht dann bei diesen Modellen immer vor folgender Situation: Man kennt einen bestimmten Wärmefluß  $Q_0$  und eine Wärme-

## Oberpfalz

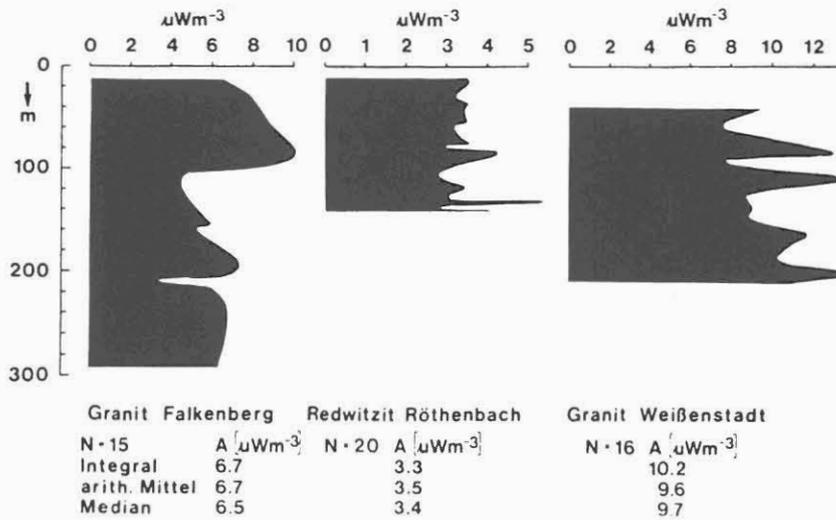
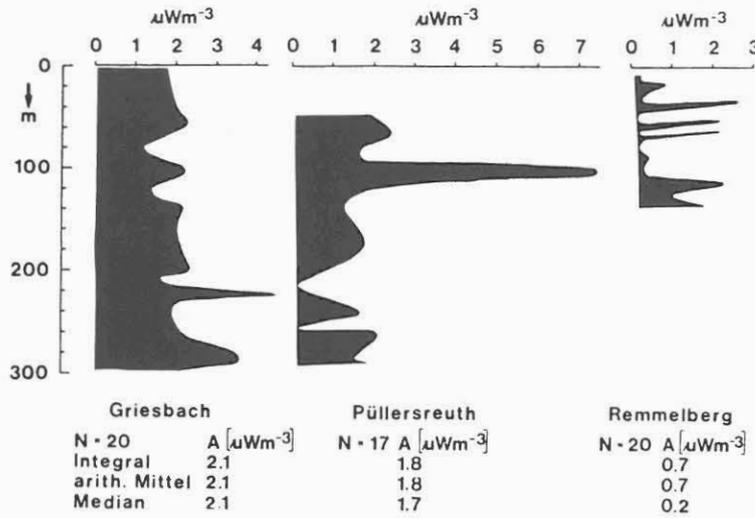
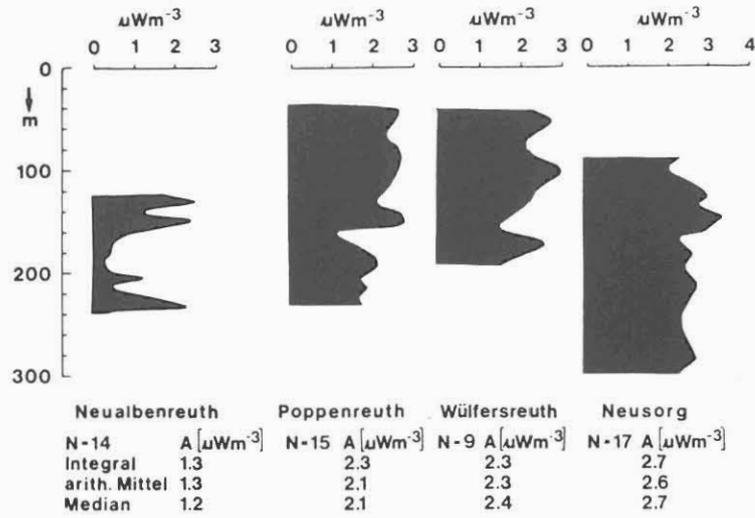


Fig. 6  
Wärmeproduktion vs. Tiefe für die Vorerkundungsbohrungen in der Oberpfalz.

# Schwarzwald

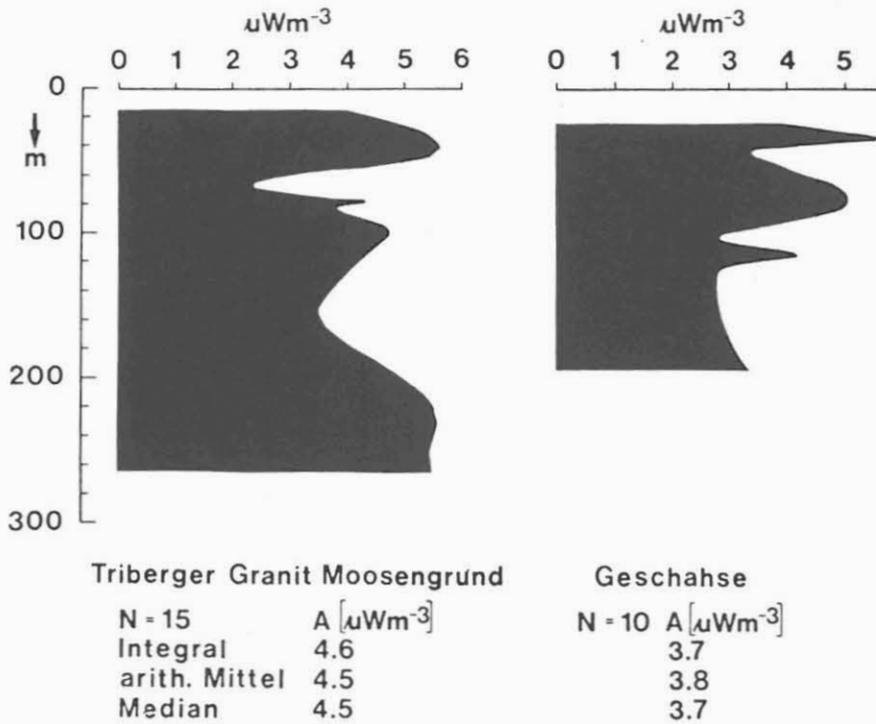
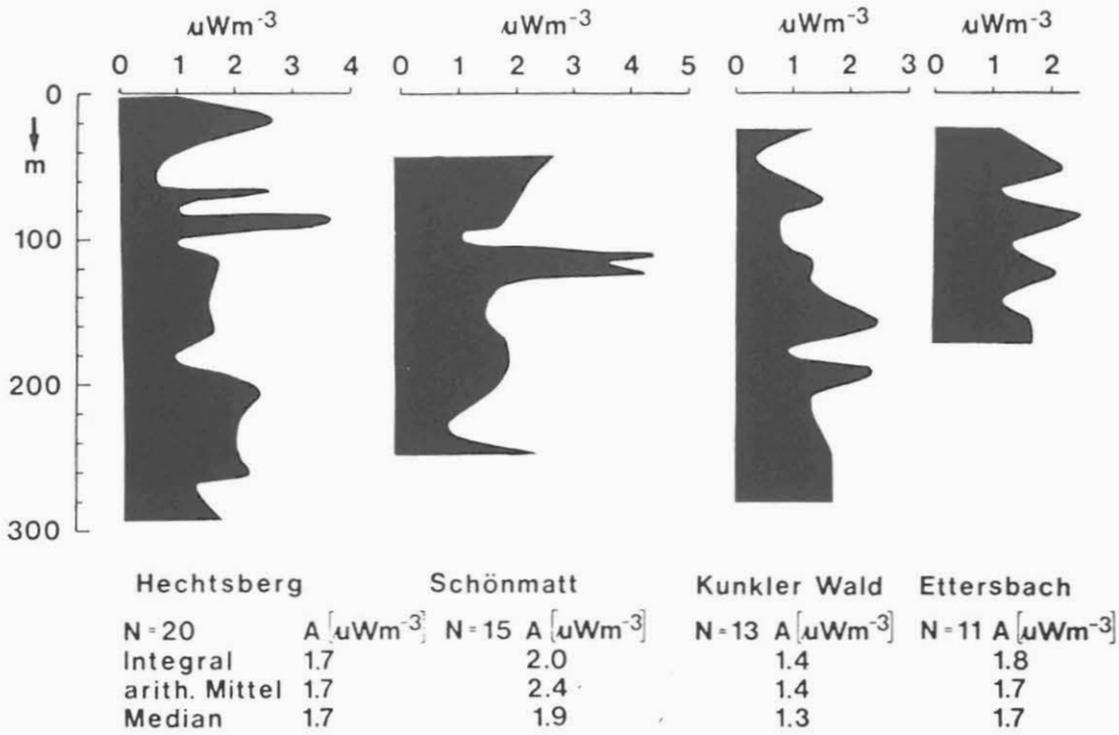


Fig. 7  
Wärmeproduktion vs. Tiefe für die Vorerkundungsbohrungen im Schwarzwald.

produktionsrate  $A_0$ , beide an der Erdoberfläche. Aus dem Erdmantel kommt sicher auch ein Teil des Wärmeflusses, man weiß nur nicht wieviel. Es gibt nun zwei Möglichkeiten:

Möglichkeit a: Man schreibt dem Erdmantel einen bestimmten Wärmefluß  $Q_m$  zu, der an der Moho in die Kruste eintritt. Dann muß die Differenz

$$Q_k = Q_0 - Q_m$$

aus der Erdkruste stammen. Jede Schicht der Erdkruste steuert ihren Anteil

$$Q_s = A_s \cdot s$$

bei, je nachdem wie groß ihre mittlere Wärmeproduktion  $A_s$  und ihre Dicke  $s$  sind. Über den Aufbau der Kruste bestehen bestimmte Ansichten, welche u.a. die Mächtigkeit der Einheiten und ihre Lithologie betreffen. Mit der Lithologie läßt sich dann eine plausible Annahme über  $A_s$  begründen. Man entnimmt diese Werte entweder der Literatur oder man verwendet die Ergebnisse von Oberflächenproben, wenn man vermutet, daß diese Gesteine auch in der Tiefe vorkommen. Alle Werte  $Q_s$  addiert ergeben dann den Beitrag, den eine dem Modell entsprechende Kruste zum Wärmefluß  $Q_0$  liefert. Weicht das Ergebnis von dem Wert  $(Q_0 - Q_m)$  deutlich ab, so kann entweder

- der angenommene Wert für  $Q_m$  falsch sein,
- der angenommene Aufbau der Kruste verkehrt sein
- die Dicke einzelner Einheiten falsch geschätzt sein
- die Annahmen über  $A_s$  nicht zutreffen

oder eine Kombination von allem.

Stimmt hingegen die Summe von  $Q_s$  mit dem Wert  $(Q_0 - Q_m)$  überein, so sind entweder

- alle Annahmen richtig
- oder Effekte einiger falscher Annahmen heben sich gegenseitig auf.

Übereinstimmung bedeutet also nicht unbedingt Richtigkeit des Modells, aber Nicht-Übereinstimmung zeigt eindeutig an, daß mindestens eine wichtige Voraussetzung nicht so sein kann, wie in dem Modell angenommen.

Möglichkeit b: Man gibt einen bestimmten Krustenaufbau vor, charakterisiert die einzelnen Einheiten insbesondere hinsichtlich ihrer Mächtigkeit  $s$  und ihrer Wärmeproduktionsrate  $A_s$ . Man berechnet auf diese Weise den Anteil  $Q_k$ , den die Kruste zum Wärmefluß  $Q_0$  beisteuert. Aus der Differenz

$$Q_0 - Q_k = Q_m$$

ergibt sich  $Q_m$  d. h. der Wärmefluß aus dem Mantel. Man diskutiert, ob für  $Q_m$  ein plausibler Wert herauskommt.

Auch hier ist das Ergebnis genauso wenig eindeutig wie bei Möglichkeit a.

Beide Möglichkeiten bieten dennoch wertvolle Hilfen, ganz unrealistische Vorstellungen über den Aufbau der Kruste von solchen zu unterscheiden, die innerhalb einer gewissen Variationsbreite

noch plausibel sind. Wir werden sehen, daß die Bandbreite der Möglichkeiten im Schwarzwald größer ist als in der Oberpfalz.

### Modelle für den Schwarzwald

$Q_0$  wurde nicht am vorgesehenen Bohrpunkt bei Haslach gemessen, sondern in der Nähe. Daraus ergibt sich, daß  $Q_0$  bei Haslach nahe an  $85 \text{ mWm}^{-2}$  liegen dürfte. Die Relation  $Q_0$  vs.  $A_0$  liefert nach Korrektur für Effekte der Erosion  $Q = 61 \text{ mWm}^{-2}$  und  $D = 4 \text{ km}$  (Jäger, Stiefel, Wilhelm). Setzte man als gültig voraus, daß die Wärmeproduktion exponentiell wie nach Gl.(5) mit der Tiefe abnimmt, so würde dies bedeuten, daß die Radioaktivität der Kruste nur etwa  $1/4$  zum gesamten Wärmefluß der Erdkruste beiträgt und der Mantel annähernd  $61 \text{ mWm}^{-2}$  liefert, ein Wert wie in der Basin und Range Provinz und unplausibel hoch.

Es ist deshalb sinnvoll, Mehrschichtmodelle zu betrachten. Das einfachste wäre ein Zweischicht-Modell. Die obere Schicht sei  $4 \text{ km}$  dick und aus der unteren Schicht trete der Wärmefluß von  $61 \text{ mWm}^{-2}$  in die obere Schicht ein. Diese muß dann also eine Wärmeproduktionsrate von  $5-6 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$  aufweisen, kann also nur Granit sein. Setzt man nun - willkürlich - als Beitrag des Erdmantels zum Wärmefluß  $30 \text{ mWm}^{-2}$  fest, so müssen aus den unteren  $22 \text{ km}$  der Kruste  $31 \text{ mWm}^{-2}$  stammen. Das führt zu einer mittleren Wärmeproduktionsrate von  $1.4 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$  oder einem Wert, der etwa den Ergebnissen für die Gneise der Bohrung B4 Kunkler Wald ( $1.39 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ ) entspricht. Dieses Ergebnis bedeutet, daß die untere Kruste aus Gneisen, nicht aus Granuliten besteht und keineswegs verarmt an U, Th und K ist. Setzt man hingegen den Wärmefluß aus dem Erdmantel - ebenfalls willkürlich und ohne Beweis - auf  $50 \text{ mWm}^{-2}$  an, so können die unteren  $22 \text{ km}$  nur noch  $11 \text{ mWm}^{-2}$  liefern und die mittlere Wärmeproduktionsrate liegt bei  $0.5 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ . Dieses Ergebnis bedeutet: Die Kruste unterhalb  $4 \text{ km}$  enthält nur Granulite, keine Granite oder Gneise.

Man kann aber auch anders vorgehen und die Ergebnisse der Seismik den Modellen zugrundelegen: Diese ergab nach Lüschen et al. (1987) eine Dreigliederung der Kruste, nämlich:

- 1) die Oberkruste mit einzelnen markanten Reflexionen  $0 - 7 \text{ km}$
- 2) die mittlere Kruste sehr transparent  $7 - 14 \text{ km}$
- 3) die untere Kruste stark lamelliert  $14 - 26 \text{ km}$

Setzt man nun - willkürlich und ohne Beweis - den Mantelwärmefluß auf  $30 \text{ mWm}^{-2}$  fest, so liefert die Kruste  $55 \text{ mWm}^{-2}$ . Aus den Gneisen der oberen  $7 \text{ km}$  stammt der Anteil  $Q_s = 7 \times 1.90 = 13.3 \text{ mWm}^{-2}$ . Die Granulite der Unterkruste liefern  $12 \times 0.7 = 8.4 \text{ mWm}^{-2}$ . Die mittlere Kruste muß also  $55 - (13.3 + 8.4) = 32.3 \text{ mWm}^{-2}$  liefern. Da sie  $7 \text{ km}$  mächtig ist, muß ihre Wärmeproduktionsrate  $4.6 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$  betragen, also etwa so viel wie diejenige des Triberger Granites. Es ist deshalb durchaus möglich, daß die mittlere Kruste Granite enthält.

Die seismischen Ergebnisse erlauben auch, sich die oberen  $14 \text{ km}$  insgesamt aus Gneis aufgebaut zu denken. Die unteren  $12 \text{ km}$  sollen aus Granulit bestehen. Dann liefert die Kruste  $26.6 + 8.4 = 35 \text{ mWm}^{-2}$ , und dem Erdmantel muß man den recht hohen Wärmeflußanteil von  $50 \text{ mWm}^{-2}$  zuschreiben.

Die Modelle laufen also auf folgendes hinaus: Entweder man nimmt einen durchschnittlichen Mantelwärmefluß von etwa  $30 - 35 \text{ mWm}^{-2}$ , wie er häufig vorkommt, an. Dann muß man in der mittleren Kruste

mit Gesteinen recht hoher Wärmeproduktion, z.B. Graniten rechnen. Oder man geht von den seismischen Ergebnissen aus, die Granite zwar nicht ausschließen, aber mehr auf Gneise und Granulite passen, dann resultiert ein ungewöhnlich hoher Wärmefluß aus dem Erdmantel. Alle diese Überlegungen wären jedoch hinfällig oder zumindest in ihrer Aussage sehr eingeschränkt, sofern bedeutende Bewegungen hydrothermalen Wasser den Wärmefluß an der Erdoberfläche dominieren sollten.

Modelle für die Oberpfalz

Der Wärmefluß ist in der Oberpfalz sehr niedrig, er beträgt bei Püllersreuth in der Nähe der Bohrung nur  $57 \text{ mWm}^{-2}$  (d.h. 25 - 28  $\text{mWm}^{-2}$  weniger als in Haslach im Schwarzwald). Für die Gesamtheit der Meßpunkte der Oberpfalz konnte keine Korrelation  $Q_0$  vs.  $A_0$  gefunden werden, lediglich für die Gneise nach Korrekturen. Deshalb stehen Mehrschichtmodelle im Vordergrund, die sich an der Interpretation der Seismik orientieren (Bortfeld et al. 1988). Die Modelle der Kruste sind dadurch zu charakterisieren, daß moldanubische auf saxothuringische Kruste aufgeschoben wurde. Alle bis in 12 - 15 km Tiefe vermutlich auftretenden Gesteine sind deshalb auch an der Oberfläche zu finden und somit hinsichtlich ihrer Wärmeproduktionsrate zu charakterisieren. Es bietet sich an, den Wärmefluß in 2 Anteile aufzuspalten: Der eine stammt aus den oberen 12 km und errechnet sich aus dem vorgeschlagenen lithologischen Aufbau und der Wärmeproduktion der oberen 12 km. Der andere Anteil  $Q$  setzt sich zusammen aus den Beiträgen des Mantels und der unteren Kruste und wird als überall gleich vorausgesetzt. Beispiele sind:

Püllersreuth ( $Q_0 = 57 \text{ mWm}^{-2}$ )

	A ( $\mu\text{Wm}^{-3}$ )	Q ( $\text{mWm}^{-2}$ )	
		Oberkruste	Unterkruste + Mantel
5 km Gneise der ZEV	1.6		
1 km Saxothuringikum Erbendorfkörper	2.2		
5 km Moldanubikum wie Griesbach	2.1		
1 km Ultramafit	0.2	20.9	36.1
Variante mit 30 % Granit wie Falkenberg	6.7	38.7	18.3

Falkenberg ( $Q_0 = 76 \text{ mWm}^{-2}$ )

5 km Granit Falkenberg	6.7		
1 km Saxothuringikum Erbendorfkörper	2.2		
5 km Moldanubikum wie Griesbach	2.1		
1 km Ultramafite	0.2	46.4	29.6
Variante mit exp. Abnahme von A im Granit ( $D = 9.5,$ $z = 5 \text{ km}$ )	5.2	39.0	37.0

Griesbach ( $Q_0 = 72 \text{ mWm}^{-2}$ )

5 km Moldanubikum	2.1		
1 km Saxothuringikum	2.2		
Erbendorfkörper			
5 km Moldanubikum	2.1		
1 km Ultramafite	0.2	23.4	48.6
Variante mit 20% Granit wie Falkenberg	6.7	34.8	37.2

Es ergibt sich, daß in der Oberpfalz die untere Kruste sehr stark an radioaktiven Elementen verarmt ist. Das Saxothuringikum kann also in der Tiefe nicht den Gehalt an U und Th beibehalten, den es an der Oberfläche hat. Auch Granite sind ausgeschlossen. In der Tabelle sind die Modelle des Krustenaufbaus hervorgehoben, welche am besten mit den Wärmeproduktions- und Wärmeflußdaten vereinbar sind. Kriterium ist, daß laut Voraussetzung  $Q$  überall gleich sein soll. Weiterhin darf  $Q$  nicht so niedrig sein, daß die untere Kruste praktisch gar keine radioaktiven Elemente mehr enthalten kann. Dieser Fall tritt für einige Modelle der Lokation Püllersreuth ein, denn der gesamte Wärmefluß an der Oberfläche ist mit  $Q_0 = 57 \text{ mWm}^{-2}$  sehr niedrig. Deshalb erschien das Modell, aus dem der höchste basale Wärmestrom für diese Lokation resultiert, als das plausibelste. Für die anderen Lokalitäten wurde dann dasjenige Modell als das vermutlich zutreffendste ausgewählt, welches den annähernd gleichen basalen Wärmefluß  $Q$  liefert. Besteht die Kruste unterhalb 12 km aus Granulit, so kann der Mantel nur einen Anteil von ca.  $20 \text{ mWm}^{-2}$  zum Wärmefluß beisteuern, was ein relativ niedriger Wert ist. Auf jeden Fall kann ausgeschlossen werden, daß besonders radioaktive Gesteine, wie etwa Granite - unter der Bohrlokation vorkommen. Hingegen wäre ein Granitanteil von 20% unter Griesbach nicht nur mit dem Modell vereinbar sondern geradezu zu fordern. Für Falkenberg muß man postulieren, daß der Granit insgesamt weniger radioaktiv ist als an der heutigen Oberfläche. Er muß z. B. einen Gradienten der Wärmeproduktionsrate wie nach Gl.(5) aufweisen.

#### Schlußbemerkung

Obwohl solche Modelle stark vereinfachend thermisches Gleichgewicht voraussetzen, zahlreiche unbewiesene Annahmen benötigen und deshalb keineswegs eindeutig sind, so sind sie doch nicht ganz wertlos, denn sie geben den Rahmen ab, innerhalb dessen sich die geologische Phantasie bewegen darf.

Insgesamt kann man feststellen, daß wir dringenden Bedarf an mehr Kenntnissen über die Verteilung von U, Th und K haben. Wenn wir erst die Verteilungstypen, die Gradienten und die mineralogischen und chemischen Grundlagen dazu kennen, werden wir auch die Mechanismen der innerkrustalen Differentiationen, d.h. der vermuteten Anreicherung lithophiler Elemente zur Oberfläche hin, verstehen können. So käme der Aufklärung dieser Gradienten Modellcharakter auch für solche Elemente wie Rb, Cs, Ba zu. Bisher wissen wir nicht:

Ist die Ursache für die Anreicherung nach oben:

- Extraktion mit Schmelzen ?
- Extraktion mit Lösungen ?
- Extraktion über die Gasphase ?
- sind Stabilitätsbereiche von Mineralen oder Paragenesen wichtig ?
- ist die Regionalmetamorphose eine Ursache ?

Es ist zu hoffen, daß zumindest ein Teil dieser Fragen durch

Analysen an dem Material der Tiefbohrung beantwortet werden kann, denn die Bohrung wird gerade tief genug sein, um Aussagen zuzulassen. Damit hätten wir sehr viel für das Verständnis des Stoffwechsels der Erdkruste sowie ihrer thermischen Struktur gewonnen.

#### Literatur

R.K. Bortfeld, F. Keller, B. Sieron, W. Söllner, M. Stiller, R. Thomas, W. Franke, K. Weber, A. Vollbrecht, T. Heinrichs, H.-J. Dürbaum, C. Reichert, J. Schmoll, G. Dohr, R. Meissner, R. Bittner, H. Gebrande, M. Bopp, P. Neurieder, T. Schmidt. Results of the DEKORP 4/KTB Oberpfalz deep seismic reflection investigations, J. Geophys. 62, 69 - 101 (1988)

A. H. Lachenbruch: Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada. J. Geophys. Res. 73, 6977 - 6989 (1968)

I. B. Lambert, K. S. Heier: The vertical distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta 31, 377 - 390 (1967)

E. Lüschen, F. Wenzel, K.-J. Sandmeier, D. Menges, Th. Rühl, M. Stiller, W. Janoth, F. Keller, W. Söllner, R. Thomas, A. Krohe, R. Stenger, K. Fuchs, H. Wilhelm, G. Eisbacher: Near vertical and wide-angle seismic surveys in the Black Forest, SW Germany. J. Geophysics, 62, 1-30 (1987)

R. F. Roy, D. D. Blackwell, F. Birch: Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. Earth. Planet. Sci. Lett. 5, 1 -12 (1968)

A. Stiefel, R. Koenig, U. Haack: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Schwarzwald, Geothermische Messungen. 2. KTB-Kolloquium, Seeheim/Odenwald, Poster Programm, 57 (1986)