

M. BEBLO

"Temperaturverteilung und stoffliche Zusammensetzung  
der Lithosphäre Islands: Interpretation der kurz-  
periodischen Magnetotellurik-Messungen"

Island, die größte Erhebung eines mittelozeanischen Rückens über die Meeresoberfläche, ist durch seine Lage bevorzugtes Studienobjekt geowissenschaftlicher Forschung geworden. Hier können zum Studium des sea-floor-spreading Methoden angewandt werden, die sonst im untermeerischen Bereich erhebliche Schwierigkeiten bereiten.

In Kruste und Mantel unter Island beobachtet man erniedrigte seismische Wellengeschwindigkeit, erniedrigte Dichte und erhöhte elektrische Leitfähigkeit. Alle diese Ergebnisse legen nahe, daß unter Island partiell geschmolzenes Krusten- und Mantelmaterial vorhanden sein muß, aus welchem nach Aufstieg und Abkühlung die ozeanische Kruste sowie der normale obere Mantel entstehen. Detaillierte Kenntnisse über den Übergangsbereich von Kruste und Mantel könnten Fragen geodynamischer Prozesse klären, welche das sea-floor-spreading steuern.

An Hand einiger Abbildungen möchte ich neuere Ergebnisse geophysikalischer Forschung in Island zusammenstellen. Einer der oben genannten Parameter - die elektrische Leitfähigkeit unter Island - soll hierbei bevorzugt behandelt werden (Beblo, Björnsson 1978 und 1980).

Die elektrische Leitfähigkeit im Erdinnern ist, ab einigen Kilometern Tiefe, in erster Linie eine Funktion der Temperatur. Daneben wird sie noch entscheidend vom Pauschalchemismus der Gesteine, sowie dem etwaigen Vorhandensein von Teilschmelzen bestimmt. Kennt man die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Erdinnern, so ist es unter gewissen Annahmen möglich, über den Vergleich mit Labor-messungen, aus der elektrischen Leitfähigkeit Aussagen über die Temperaturverteilung, den Pauschalchemismus und die Existenz von Teilschmelzen zu machen.

Zur Klärung dieser Fragen wurden im Sommer 1977 an 19 Orten im Norden von Island magnetotellurische Messungen durchgeführt (Abbildung 1).

Profil 1, E-W-Profil, 260 km lang, 12 Registrierstationen, liegt nahezu senkrecht zum Streichen des mittelatlantischen Rückens in Island, der sog. Jungvulkanzone. Profil 1 quert symmetrisch zur Riftachse die dominierenden geologischen Strukturen Islands.

Profil 2, SW-NE-Profil, 150 km lang, 8 Registrierstationen, liegt im Streichen der Jungvulkanzone, parallel zum Beobachtungsprofil der Refraktionsseismik RRISP 1977.

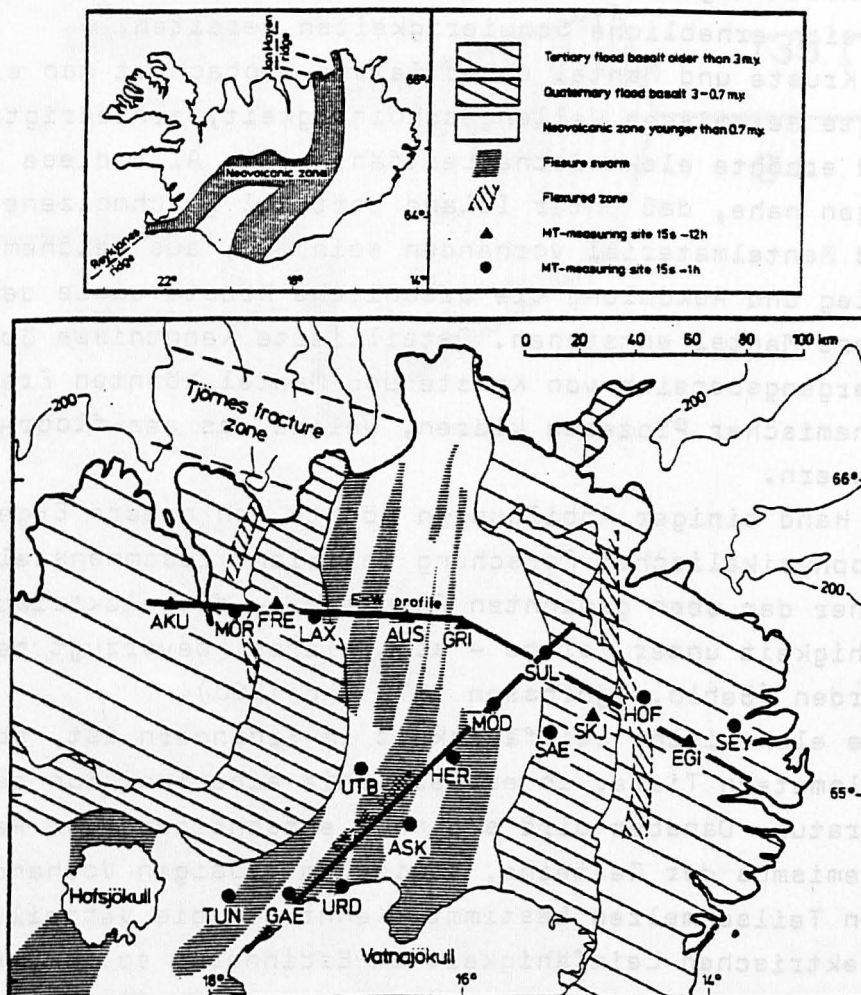


Abbildung 1, nach Beblo und Björnsson 1978, 1980

Beobachtet wurde an allen Stationen ein Intervall der natürlichen Variationen mit Perioden von 15 sec bis 1 Std. Aus dem Registriermaterial wurden mit Fourier-Analyse Übertragungskoeffizienten, hieraus die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit und die Phasendifferenzen als Funktion der Periode ermittelt. Zur Interpretation der Daten wurden Modelle mit ein- und zweidimensionaler Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe, gesondert für jede Station, berechnet (Abbildung 2).

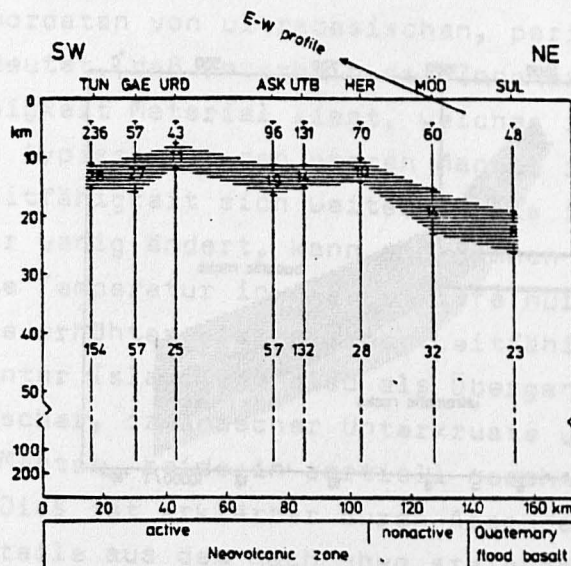
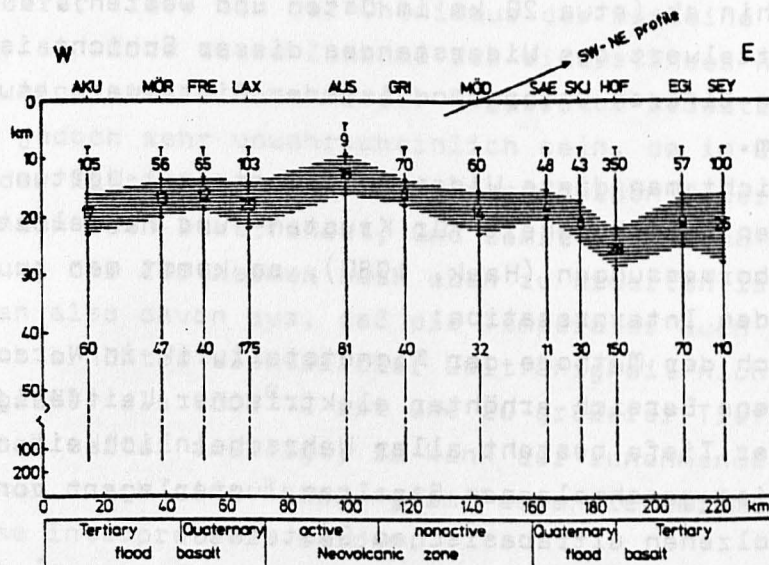


Abbildung 2, aus Beblo und Björnsson 1980

Für alle 19 Stationen erhält man nahezu dasselbe Modell: Unter einer Deckschicht von einigen Zehner- bis Hunderter  $\Omega m$  für den spezifischen Widerstand, folgt in 10-20 km Tiefe eine etwa 5 km mächtige Schicht mit deutlich geringerem Widerstand (im Mittel 15  $\Omega m$ ). Der tiefere Untergrund ist wiederum um eine Größenordnung schlechter leitend. Die Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit ist direkt unter der Riftachse am höchsten gelegen (etwa 10 km) und sinkt mit zunehmendem Abstand von der Riftachse zu größerer Tiefe hin ab (etwa 20 km im Osten und Westen). Der Mittelwert des Widerstandes dieser Schicht ist 15  $\Omega m$ , für den tieferen Untergrund ist der Mittelwert etwa 80-100  $\Omega m$ .

Vergleicht man diese Widerstandswerte mit Werten der elektrischen Leitfähigkeit für Krusten- und Mantelmaterial von Labormessungen (Haak, 1980), so kommt man zu der folgenden Interpretation:

Der nach der Methode der Magnetotellurik in Nordost-Island gefundene Bereich erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in geringer Tiefe besteht aller Wahrscheinlichkeit nach aus teilweise geschmolzenen Basalten, unterlagert von partial geschmolzenen ultrabasischen Gesteinen.

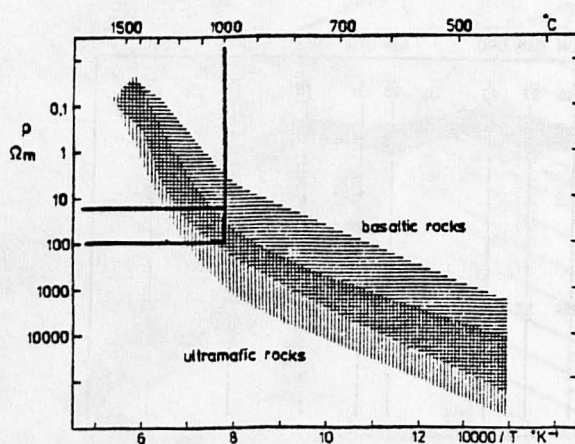


Abbildung 3, aus Beblo und Björnsson 1980

Nach Abbildung 3 ergibt ein Widerstand von  $15 \Omega \text{ m}$  für den guten Leiter im Vergleich mit Labordaten für trockene Basalte mittlere Temperaturen von etwa  $1000^\circ \text{ C}$ . Bei dieser Temperatur beginnt das Aufschmelzen der Basalte. Der Schmelzanteil in der festen Matrix kann aus den Ergebnissen der Magnetotellurik nicht sicher angegeben werden, er könnte im Bereich um 10 Prozent liegen.

Unterhalb dieser gut leitenden Zone steigt der Widerstand um etwa eine Zehnerpotenz auf rund  $100 \Omega \text{ m}$  an. Würde sich zu größerer Tiefe hin der Chemismus der Gesteine nicht ändern, so würde diese Zunahme des Widerstandes nach Abbildung 3 eine starke Abnahme der Temperatur bedeuten. Dies dürfte jedoch sehr unwahrscheinlich sein, da im Gegensatz unter der Riftachse ein Transport an heißen Materials von unten nach oben stattfindet, und damit verbunden eine Verschiebung der Isothermen nach oben zu erwarten ist.

Geht man also davon aus, daß die Temperatur auch unterhalb der Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit nicht wesentlich kleiner als  $1000^\circ \text{ C}$  ist und zu größerer Tiefe hin eher noch weiter ansteigt, so kann der zunehmende Widerstand nur durch eine Änderung im Pauschalchemismus der Gesteine interpretiert werden.

$1000^\circ \text{ C}$  und  $100 \Omega \text{ m}$  passt nach Abbildung 3 recht gut zu den Labordaten von ultrabasischen, peridotitischen Gesteinen. Das bedeutet, daß unterhalb der Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit Material liegt, welches in seiner Zusammensetzung typisch für den oberen Mantel ist. Da die elektrische Leitfähigkeit sich weiterhin bis in etwa 100 km Tiefe nur sehr wenig ändert, kann angenommen werden, daß sich auch die Temperatur in dieser Tiefe nur wenig ändert.

Die Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in geringer Tiefe unter Island ist also als Übergangsbereich zwischen basaltischer, ozeanischer Unterkruste und ultrabasischem oberen Mantel, beide in partiell geschmolzener Form, anzusehen. Dies ist erklärbar durch Absonderung leichtflüchtiger Bestandteile aus dem nach oben steigenden Mantelmaterial an der Kruste-Mantel Grenze.

Diese Interpretation stützen die Ergebnisse der Refraktionsseismik in Island 1977 (Gebrande, Miller, Einarsson 1980).  
Abbildung 4, Großbuchstaben = Schußpunkte, Zahlen = Geschwindigkeiten in km/sek.

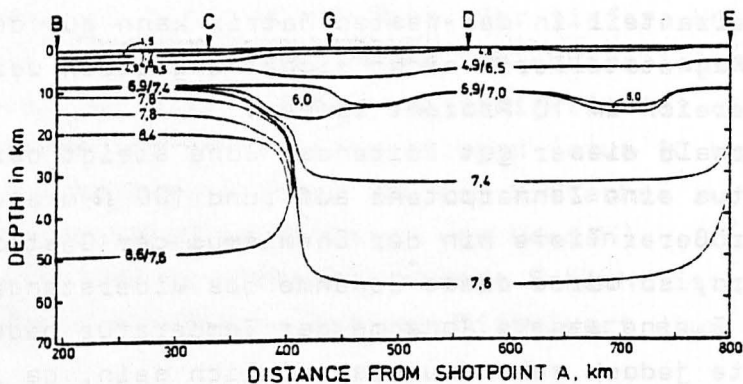


Abbildung 4, aus Gebrande, Miller und Einarsson 1980

Dieses sehr detaillierte Krusten-Mantel Modell zeigt einen ungestörten Verlauf der ozeanischen Schichten layer 1 bis 3 vom Reykjanes ridge nach Island (p-Wellengeschwindigkeit 4.6-7.0 km/sek). Layer 4 (7.0-7.4 km/sek) ist nur unter Island gefunden worden. Außerhalb der Schelfkante liegt normaler ozeanischer Aufbau der Lithosphäre vor. Im Bereich der Schelfkante erfolgt ein plötzlicher Übergang von einer ozeanischen Lithosphäre mit hohen seismischen Wellengeschwindigkeiten zu einem oberen Mantel unter Island mit anomal niederen Wellengeschwindigkeiten.

Eingelagert in die Unterkruste erkennt man in Abbildung 4 kissenförmige Strukturen mit Geschwindigkeiten um 6 km/sek. Diese starke Geschwindigkeitsinversion kann nur durch das Auftreten von Schmelzen in diesem Tiefenbereich gedeutet werden.

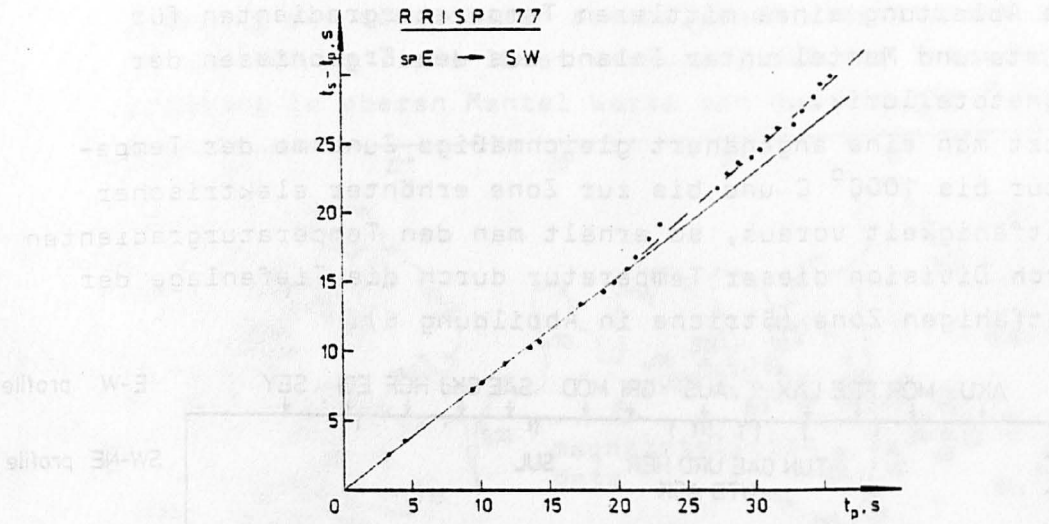


Abbildung 5, aus Gebrande, Miller und Einarsson 1980

Abbildung 5 zeigt das Verhältnis der seismischen p- und s-Wellen. Innerhalb der isländischen Kruste (kleine Laufzeiten) hat die Steigung der Geraden den für basisches Material normalen Wert von 1.76. Für längere Laufzeiten, größere Eindringtiefen, werden Werte der Steigung zwischen 1.96 und 2.2 erreicht. Solch hohe Werte können nur durch Teilschmelzen von ultrabasischem Material erklärt werden. Aus den beobachteten p- und s-Wellengeschwindigkeiten kann ein Schmelzanteil von größer 17 Prozent abgeleitet werden.

Aus den Ergebnissen der Magnetotellurik und Seismik kann man ableiten, daß das Auftreten von Teilschmelzen an der Kruste-Mantel Grenze nicht alleine an die schmale Zone des rezenten Vulkanismus und riftings - die Jungvulkanzone - gebunden ist, sondern in lokal unterschiedlicher Konzentration unter ganz Island auftritt.

Ausgehend von der Tatsache, daß die Leitfähigkeits-Tiefenmodelle an allen Meßstationen nahezu gleich sind, erlaubt die Ableitung eines mittleren Temperaturgradienten für Kruste und Mantel unter Island aus den Ergebnissen der Magnetotellurik.

Setzt man eine angenähert gleichmäßige Zunahme der Temperatur bis  $1000^{\circ}\text{C}$  und bis zur Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit voraus, so erhält man den Temperaturgradienten durch Division dieser Temperatur durch die Tiefenlage der leitfähigen Zone (Striche in Abbildung 6).

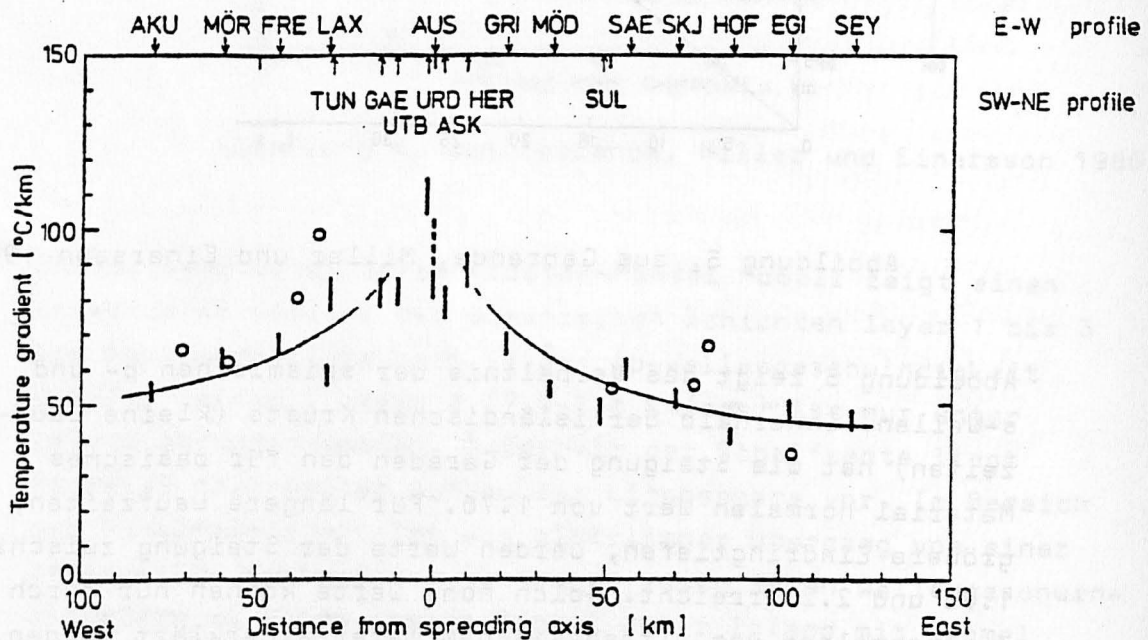


Abbildung 6, nach Beblo und Björnsson 1978

In der Kruste Islands ist der Temperaturgradient direkt unterhalb der Riftachse mit Werten um  $100^{\circ}\text{C/km}$  relativ groß. Der Temperaturgradient sinkt mit zunehmendem Abstand von der Riftachse auf Werte um  $50-60^{\circ}\text{C/km}$ . Diese Werte für den Temperaturgradienten, abgeleitet aus den Ergebnissen der Magnetotellurik, stimmen recht gut mit Werten des Temperaturgradienten überein, welche aus Bohrlochmessungen im Meßgebiet gewonnen wurden (Kreise in Abbildung 6).



Der Temperaturgradient im oberen Mantel kann aus den bisherigen Ergebnissen nur abgeschätzt werden. Die geringe Änderung des scheinbaren spezifischen Widerstandes zwischen 20 und 100 km Tiefe lässt vermuten, daß der Temperaturgradient im oberen Mantel Werte von nur einigen  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$  hat.

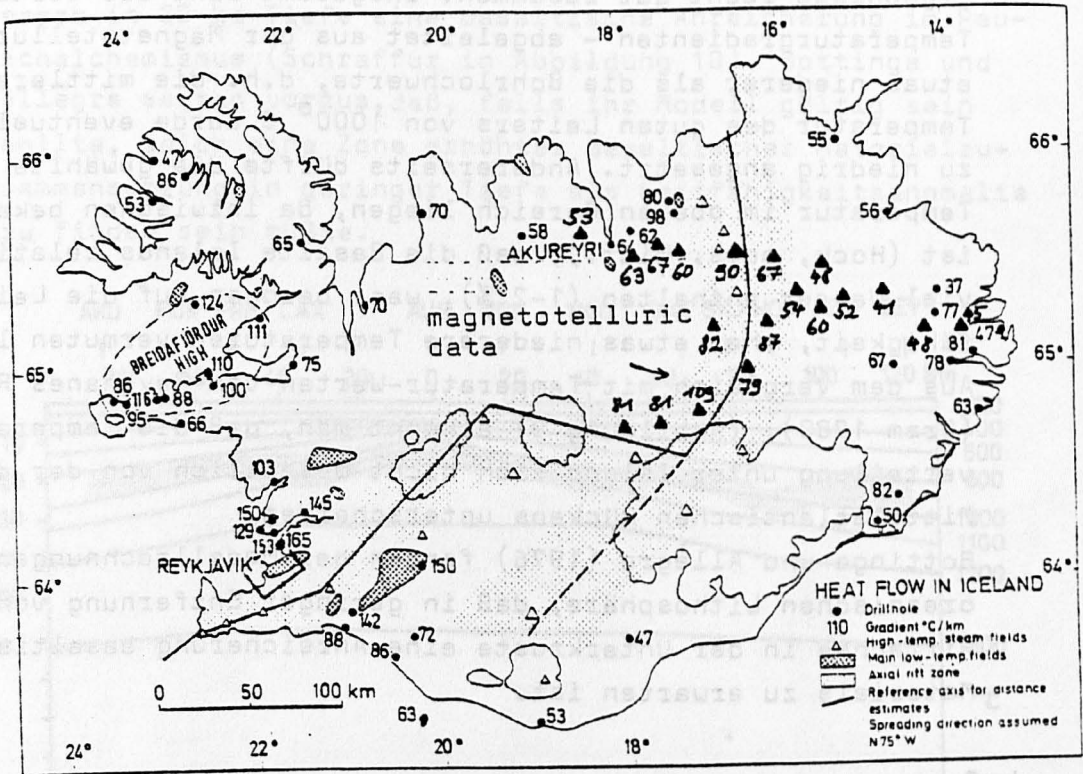


Abbildung 7, nach Pálmason et al. 1979

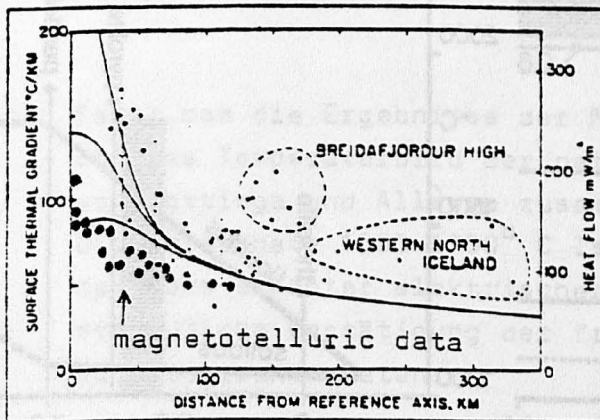


Abbildung 8,  
nach Pálmason et al. 1979

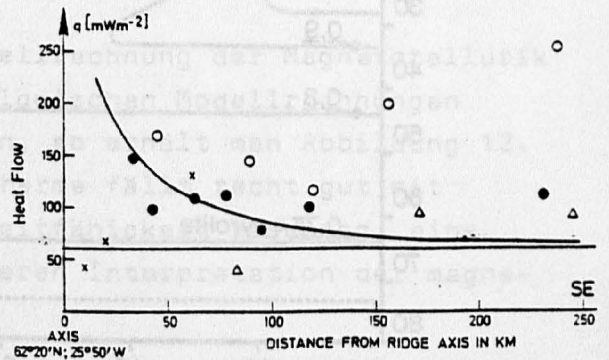


Abbildung 9,  
aus Bram 1980

In Abbildung 7 und 8 (nach Pálmason 1978) sind die aus der Magnetotellurik abgeleiteten Werte in Darstellungen des Krusten-Temperaturgradienten aus Bohrlochmessungen eingezeichnet worden. Wie schon Abbildung 6 zeigte, passen die Ergebnisse recht gut zusammen. Insgesamt sind die Werte des Temperaturgradienten - abgeleitet aus der Magnetotellurik - etwas niedriger als die Bohrlochwerte, d.h. die mittlere Temperatur des guten Leiters von  $1000^{\circ}\text{C}$  wurde eventuell zu niedrig angesetzt. Andererseits dürfte die gewählte Temperatur im oberen Bereich liegen, da inzwischen bekannt ist (Hock, pers. Mitt.), daß die Basalte Islands relativ viel Wasser enthalten (1-2 %), was, bezogen auf die Leitfähigkeit, eher etwas niedrigere Temperaturen vermuten ließe. Aus dem Vergleich mit Temperatur-Werten vom Reykjanes Ridge (Bram 1980), (Abbildung 9) erkennt man, daß die Temperaturverteilung unter Island sich nicht wesentlich von der des Mittelatlantischen Rückens unterscheidet.

Bottinga und Allègre (1976) fanden bei Modellrechnungen der ozeanischen Lithosphäre, daß in geringer Entfernung von der Riftachse in der Unterkruste eine Anreicherung basaltischen Materials zu erwarten ist.

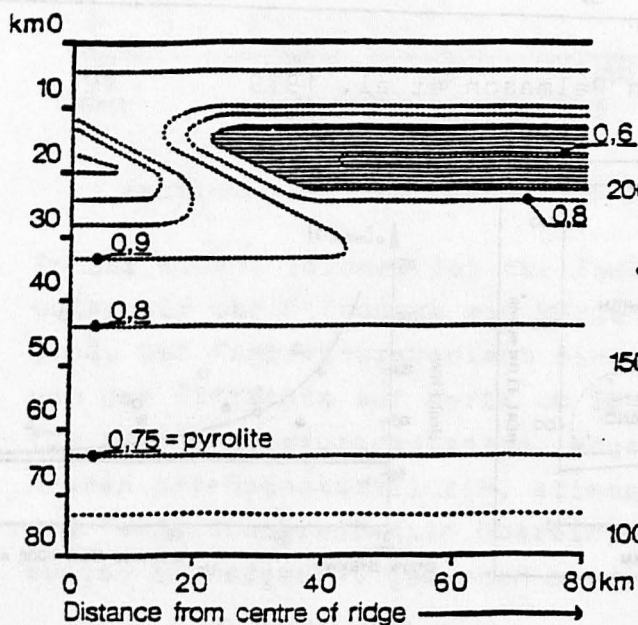


Abbildung 10,

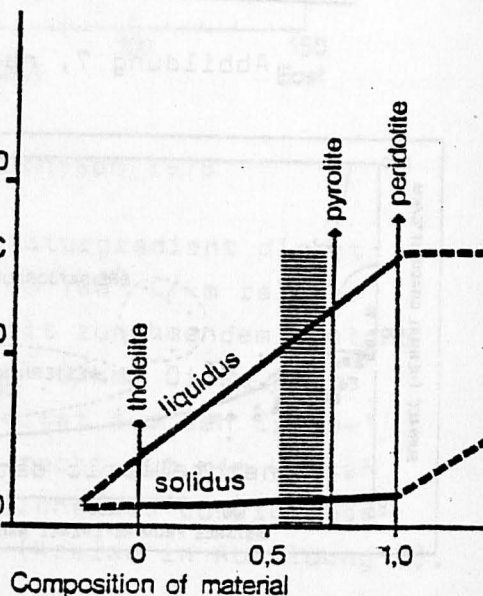


Abbildung 11,

beide nach Bottinga und Allègre 1976

Abbildung 10 beschreibt den Endzustand der chemischen Zusammensetzung ihres rein pyrolitischen (25 % Basalt, 75 % Peridotit) Ausgangsmodells. In Abbildung 11 ist die Materialzusammensetzung als Zahlenmodell zwischen 0 (= Basalt) und 1 (= Peridotit) dargestellt (0.75 = Pyrolit). Ihr Endmodell ergab in 20 km Tiefe eine basaltische Anreicherung im Pauschalchemismus (Schraffur in Abbildung 10). Bottinga und Allègre sagten voraus, daß, falls ihr Modell gültig sein sollte, solch eine Zone erhöhter basaltischer Materialzusammensetzung in geringer Tiefe als Leitfähigkeitsanomalie zu finden sein müßte.

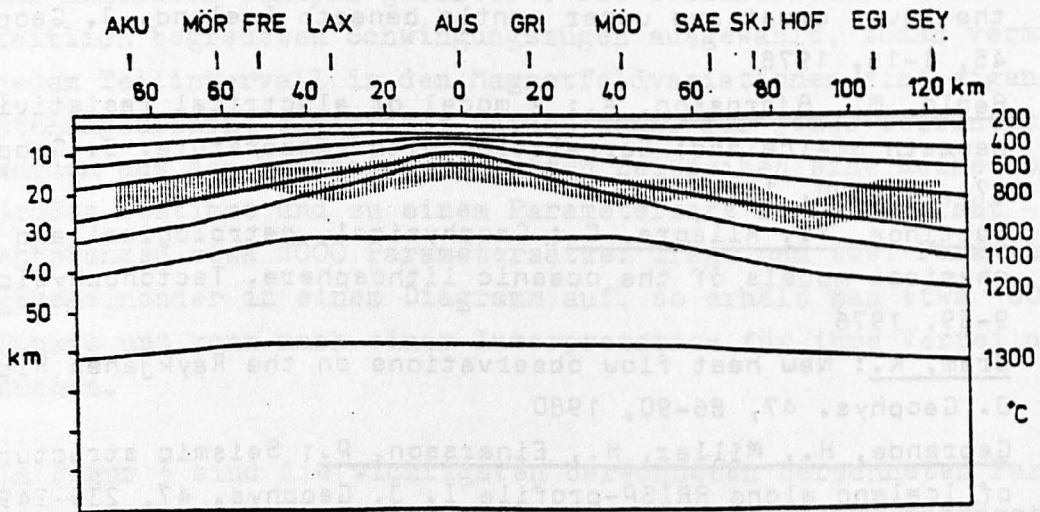


Abbildung 12, nach Bottinga und Allègre 1976  
nach Beblo und Björnsson 1980

Fasst man die Ergebnisse der Modellrechnung der Magnetotellurik und das Temperaturbild der petrologischen Modellrechnungen von Bottinga und Allègre zusammen, so erhält man Abbildung 12. Die berechnete 1000-1100° C Isotherme fällt recht gut mit der Zone erhöhter elektrischer Leitfähigkeit zusammen, eine erfreuliche Bestätigung der früheren Interpretation der magnetotellurischen Daten.

Während in den obersten Kilometern Tiefe Island eine normale ozeanische Kruste besitzt, muß für den Bereich der Unterkruste und den des oberen Mantels von einer "Anomalie Island" gesprochen werden.

Die Meßergebnisse scheinen eine diapirartige Aufwölbung der Asthenosphäre wiederzugeben, mit Teilschmelzen bis in etwa 50 km Tiefe. Solch eine Anomalie ist ohne eine unter Island lokal erhöhte Konvektion (plume) kaum vorstellbar.

#### Literatur:

Beblo, M., Björnsson, A.: Magnetotelluric investigation of the lower crust and upper mantle beneath Iceland. J. Geophys. 45, 1-16, 1978

Beblo, M., Björnsson, A.: A model of electrical resistivity beneath NE-Iceland; Correlation with temperature. J. Geophys. 47, 184-190, 1980

Bottinga, Y., Allègre, C.: Geophysical, petrological and geochemical models of the oceanic lithosphere. Tectonophysics 32, 9-59, 1976

Bram, K.: New heat flow observations on the Reykjanes Ridge. J. Geophys. 47, 86-90, 1980

Gebrande, H., Miller, H., Einarsson, P.: Seismic structure of Iceland along RRISP-profile I. J. Geophys. 47, 239-249, 1980

Haak, V.: Relations between electrical conductivity and petrological parameters of the crust and upper mantle. Geophys. Surveys in press, 1980

Pálmason, G., Arnórsson, S., Fridleifsson, I.B., Kristmannsdóttir, H., Saemundsson, K., Stefansson, V., Steingrímsson, B., Tómasson, J., Kristjánsson, L.: The Iceland crust: Evidence from drillhole data on structure and processes. In: Deep Drilling Results in the Atlantic Ocean: Ocean Crust. M. Talwani, C.G. Harrison, D.E. Hayes eds. Am. Geophys. Union, Maurice Ewing Series 2, 43-65, 1979