6 Geothermischer Gradient im Tertiär

Spaltspurdaten liefern Informationen über die Temperaturgeschichte einer Probe. Um Temperaturpfade in das räumliche Koordinatensystem zu übertragen und in Bezug auf Exhumation bzw. Versenkung zu interpretieren, müssen Annahmen über den paläogeothermischen Gradienten im betreffenden Zeitraum und an der jeweiligen Probenlokalität getroffen werden. In Orogenen wird als plausibler Wert meist ein konstanter geothermischer Gradient von 20-30°C/km angenommen (z.B. Benjamin et al., 1987; Masek et al., 1994). Ein veränderlicher Temperaturgradient liegt jedoch vor, wenn z.B. die Isothermen durch Wärme-Advektion bei rascher Exhumation angehoben werden (Kap. 9.4), oder wenn sich der krustale Wärmefluss im betrachteten Zeitraum ändert (Kap. 9.1). Der Gradient hängt zudem von der Wärmeleitfähigkeit der Gesteinssäule ab, über die er besteht. Bei einem bestimmten Wärmefluss $Q = \lambda * (dT/dz)$ ist der Temperatur-Gradient dT/dz umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ, d.h. ein hoher Gradient besteht in schlecht wärmeleitenden Gesteinen und umgekehrt. Dies bei Abschätzungen von Exhumationsraten zu berücksichtigen, ist selten sinnvoll und möglich, da die Unsicherheit über den Paläowärmefluss meist größer ist und die Wärmeleitfähigkeit der erodierten Gesteine nur geschätzt werden kann. Für einige Fragestellungen innerhalb dieser Arbeit erschien jedoch die Berücksichtigung der Leitfähigkeit angebracht, z.B. um Maximaltemperaturen der Spaltspurdaten in Tiefe zu übertragen. Im Altiplano und in der Ostkordillere besteht ein deutlicher Leitfähigkeitskontrast zwischen den tertiären Ablagerungen und den altpaläozoischen Metasedimenten. Eine bestimmte Temperatur für einen Probenpunkt kann durch eine sehr viel geringmächtigere Versenkung unter tertiären Sedimenten mit niedrigem λ erzielt werden als durch die Überlagerung mit altpaläozoischen Gesteinen mit hohem λ (siehe Kap. 7.3.3, 7.4.2, 7.6.6). Zudem bestehen aus den zentralen Anden teilweise umfangreiche geothermische Daten (Kap. 6.1), auf deren Grundlage die Annahmen paläogeothermischer Gradienten nach generalisierten Gesteinseinheiten und nach morphostrukturellen Einheiten differenziert wurden (Kap. 6.2).

6.1 Daten zur rezenten Wärmeflussdichte

Aus Explorations-Bohrungen in Bolivien und Nordchile (15-24°S) wurden Temperatur-Gradienten, Wärmeleitfähigkeiten und Oberflächenwärmeflussdichten bestimmt (kompiliert in Springer and Förster, 1998), die im Folgenden diskutiert werden, um plausible Wertebereiche einzugrenzen.

Folgende **Temperatur-Gradienten** wurden bestimmt: Im rezenten magmatischen Bogen 24 °C/km und 40 °C/km (Springer and Förster, 1998), im Altiplano 39 ± 9 °C/km (± 1σ, N=5 Bestimmungen; Henry and Pollack, 1988), in der Ostkordillere 25 ± 8.0 °C/km (N=11; Henry and Pollack, 1988) und im Subandin und Chaco 22 ± 3 °C/km (N=24; Springer and Förster, 1998). Die Variabilität des regionalen geothermischen Gradienten im gesamten Untersuchungsgebiet liegt demnach in der Größenordnung von 10-15 °C. Der mittlere geothermische Gradient in der Ostkordillere ist nur etwa 5 °C höher als im Subandin-Chaco, obwohl der Wärmefluss (siehe unten) doppelt so hoch ist. Dies ist durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Ordoviz in der Ostkordillere und die verhältnismäßig niedrigen Wärmeleitfähigkeiten aller Formationen des Subandins bedingt (Springer, 1996).

Wärmeleitfähigkeiten bestimmten Henry and Pollack (1988) im *divided bar*-Verfahren an Gesteinsscheiben aus Bohrungen im Altiplano und in der Ostkordillere Boliviens. Nur zwei Bohrungen liegen in

Ordoviz, die beide mittlere Wärmeleitfähigkeiten von 3.5 W/(mK) ergaben (Tab. A3, Anhang). Die aus empirischen Porositäts/Tiefen-Funktionen für Sand- und Siltsteine (Bond and Kominz, 1984) ermittelte Leitfähigkeit (siehe Kap. 8.2, Abb. 8.3 b) nähert sich in etwa 6 km Tiefe asymptotisch einem maximalen Wert an, da in dieser Tiefe die Residualporosität erreicht wird. Für Siltsteine liegt die maximale Leitfähigkeit bei 2.7 W/(mK) und für Quarz-Sandsteine bei 3.4 W/(mK). Die Versenkungstiefe ordovizischer Gesteine während der oberkarbonen Metamorphose (Kap. 4.1) reichte sicher aus, um die Porosität auf den residualen Wert zu reduzieren. Die ordovizischen Einheiten bestehen überwiegend aus Siltsteinen und feinkörnigen Sandsteinen (Egenhoff, 2000), was einen Leitfähigkeitswert näher an 2.7 W/(mK) nahe legt. Als Wärmeleitfähigkeit für Einheiten des Ordoviz wird 3.1 ± 0.4 W/(mK) angenommen. Aus dem jüngeren Paläozoikum (**Silur und Devon**), das in der westlichen Ostkordillere nördlich von 21°S und im Altiplano aufgeschlossen ist, wurden sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten mit 5.9 W/(mK) für silurische und 3.7 W/(mK) für devonische Gesteine bestimmt (Tab. A3, Anhang). Die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit des Tonstein-dominierten Silurs überrascht, da in der Regel Tonsteine Wärme schlechter leiten als Sandsteine. Das jüngere Paläozoikum wurde nicht metamorph überprägt und weniger tief versenkt, was eher eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als in den ordovizischen Gesteinen vermuten lässt. Die erhöhten Werte könnten aus einer der zahlreichen Fehlerquellen resultieren, denen Leitfähigkeitsbestimmungen unterliegen (Henry and Pollack, 1988). Die Werte von Springer (1996) für silurische und devonische Formationen im Subandin sind sehr viel geringer (siehe unten), was auf die generell hohen Porositäten im Subandin zurückgeführt wurde. Ob das auch für das Silur und Devon im Altiplano zutrifft, kann mangels Daten nicht entschieden werden. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass deren Leitfähigkeit höher als die der ordovizischen Einheiten ist. Daher wird für das Silur und Devon eine mittlere Leitfähigkeit von 2.7 ± 0.4 W/(mK) angenommen.

Die Wärmeleitfähigkeitsdaten von **känozoischen Einheiten** im Altiplano liegen zwischen 1.8 und 3.2 W/(mK) (Tab. A3, Anhang). Aus diesen Daten und Porositäts/Tiefen-Funktionen wird in Kap. 8.2 für das etwa 5 km mächtige Tertiär bei San Cristobal eine mittlere Leitfähigkeit von 2.54 ± 0.16 W/(mK) abgeschätzt. Die Leitfähigkeit variiert in den obersten Kilometern von Sedimentbecken stark mit der Porosität. Daher werden für tertiäre Sedimente bis 2 km bzw. bis 4 km Mächtigkeit mittlere Leitfähigkeiten von 2.2 ± 0.2 bzw. 2.4 ± 0.2 verwendet.

Die Wärmeleitfähigkeiten aller Formationen des <u>Inter- und Subandins</u> von Silur bis Tertiär wurden von Springer (1996) bestimmt und der Einfluss von Temperatur und Porosität für den Tiefenbereich der Bohrungen von 1-4 km berücksichtigt. Daten von Henry and Pollack (1988) wurden von Springer (1996) basierend auf neueren Porositätsdaten (Coudert et al., 1995) überarbeitet, was um etwa 25% niedrigere Werte ergab. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen 1.65 und 2.35 W/(mK), im Mittel bei 1.94 ± 0.29 W/(mK). Die Leitfähigkeiten zeigen keine Abhängigkeit vom Formationsalter, sondern variieren mit der Lithologie: Tonstein-dominierte Formationen weisen mit 1.75 ± 0.25 deutlich geringere Werte auf als Sandstein-dominierte mit 2.0 ± 0.25. Für das Inter- und Subandin wird 1.94 ± 0.29 W/(mK) als Mittelwert der Leitfähigkeit angenommen.

Daten zur **Wärmeflussdichte** in den zentralen Anden wurden von Springer and Förster (1998) aus bestehenden Untersuchungen, revidierten Daten von Henry and Pollack (1988) und eigenen Bestimmungen zusammengestellt. In der Küstenkordillere liegt mit etwa 20 mW/m^2 ein Minimum der Wärmeflussdichte. Im *Forearc* steigen die Werte auf 40-60 mW/m^2 an. Die Datendichte im magmatischen Bogen der Westkordillere (N=3) und im Altiplano (N=6) ist sehr gering; die Werte streuen zwischen 50 und 180 mW/m^2. Der Mittelwert liegt im magmatischen Bogen bei 80 mW/m^2 und im Altiplano bei 100 mW/m^2.

Ein vergleichbar hoher Wärmefluss um 80 mW/m^2 (N=12) kennzeichnet die Ostkordillere. Der mittlere Wärmefluss nimmt auf 40 mW/m^2 im Subandin (N=21) und im Chaco (N=5) ab.

6.2 Interpretation des paläogeothermischen Gradienten

Zur Übertragung der Temperatur-Informationen in räumliche Daten wurden regional und nach generalisierten Gesteinseinheiten gegliederte paläogeothermische Gradienten verwendet (Tab. 6.1). Aus den symmetrischen Fehlergrenzen der zugrunde gelegten Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeflussdichten (Kap. 6.1) entstehen durch Multiplikation und Division asymmetrische Fehlergrenzen für die Gradienten. Es wurden nicht wieder symmetrische Mittelwerte gebildet sondern die ungleichen Fehler der Gradienten für die folgenden Berechnungen beibehalten, damit nachvollziehbar bleibt, welche Ergebnisse aus den Mittelwerten resultieren. Sofern nicht nach Gesteinseinheiten unterschieden werden kann, z.B. bei der Berechnung von Exhumationsraten, wurde ein Gradient von 25 ± 5 °C/km verwendet, der in etwa alle Mittelwerte umfasst. Der Paläowärmefluss wurde für den betrachteten Zeitraum der Abkühlung (Obereozän-rezent) als konstant angenommen. Diese Annahme wird in Kap. 9.1 diskutiert. Der Paläowärmefluss wurde für den oligo-miozänen magmatischen Bogen (Altiplano bis zentrale Ostkordillere) mit 70 ± 15 mW/m^2 niedriger als der rezente Mittelwert von 100-80 mW/m^2 gewählt, da von einem langsamen Anstieg des Oberflächenwärmeflusses auszugehen ist, wie thermische Modellierungen von Babeyko et al. (2002) zeigten und auch durch die Abschätzung des Paläowärmeflusses für das mittlere Miozän angedeutet ist (Kap. 8.3). Die Oberflächentemperatur ist vom Klima und der Höhe über NN abhängig, deren Änderungen im Tertiär hier nicht sinnvoll berücksichtigt werden können. Daher wurde vereinfachend eine Temperatur von 15°C angenommen, die nach Temperaturmessungen in den zentralen Anden der langfristigen Jahresmitteltemperatur in einer Höhe von 2300 m über NN entspricht (Abb. 6.3).

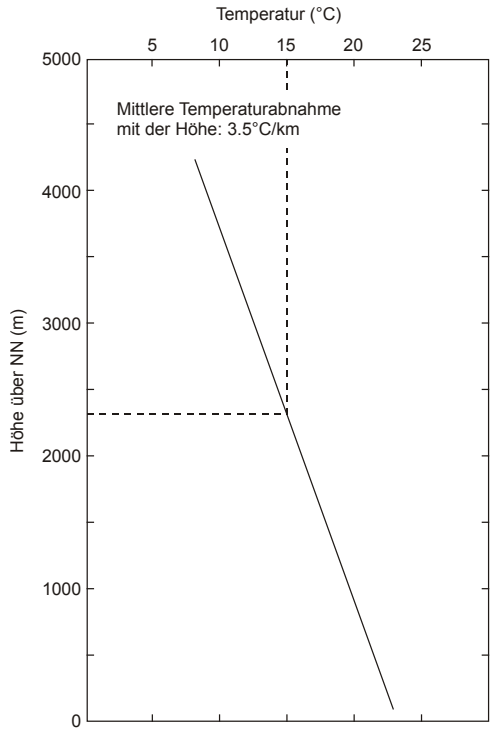

Abb. 6.3: Mittlere Oberflächentemperatur als Funktion der Höhe über NN aus Wetterstationen zwischen 15-30°S und 60-75°W mit Registrierzeiten von 10 bis 40 Jahren (modifiziert nach Springer, 1996). Zur Interpretation des paläogeothermischen Gradienten wurde eine Oberflächentemperatur von 15°C angenommen.

Tab. 6.1: Zusammenfassung der paläogeothermischen Gradienten, die zur Übertragung der Spaltspurdaten in räumliche Daten angenommen werden, und die zugrunde gelegten Wärmeleitfähigkeiten und Oberflächenwärmeflussdichten (Erläuterungen im Text).

Stratigraphische Einheit (*Region*)	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Oberflächen-wärmefluss (mW/m^2)	Geothermischer Gradient (°C/km)	Oberflächen-Temperatur (°C)
Altiplano:				
Silur-Devon	2.70 ± 0.40	70 ± 15	26 +11/-8	15
Tertiär, >4 km	2.54 ± 0.16	70 ± 15	28 +8/-8	15
Tertiär, 4-2 km	2.40 ± 0.20	70 ± 15	29 +10/-8	15
Tertiär, 2-0 km	2.20 ± 0.20	70 ± 15	32 +11/-9	15
Westliche und zentrale Ostkordillere:				
Ordoviz	3.10 ± 0.40	70 ± 15	23 +8/-7	15
Tertiär, >4 km	2.54 ± 0.16	70 ± 15	28 +8/-8	15
Tertiär, 4-2 km	2.40 ± 0.20	70 ± 15	29 +10/-8	15
Tertiär, 2-0 km	2.20 ± 0.20	70 ± 15	32 +11/-9	15
Östliche Ostkordillere (SYA):				
Ordoviz	3.10 ± 0.40	60 ± 10	19 +7/-5	15
Tertiär, >4 km	2.54 ± 0.16	60 ± 10	24 +5/-5	15
Tertiär, 4-2 km	2.40 ± 0.20	60 ± 10	25 +7/-6	15
Tertiär, 2-0 km	2.20 ± 0.20	60 ± 10	27 +8/-6	15
Interandin:				
Silur-Tertiär (Mittelwert)	1.94 ± 0.29	50 ± 10	26 +10/-8	15
Subandin:				
Silur-Tertiär (Mittelwert)	1.94 ± 0.29	40 ± 10	21 +9/-8	15