Harald Ege

Exhumations- und Hebungsgeschichte der zentralen Anden in Südbolivien (21°S) durch Spaltspur-Thermochronologie an Apatit

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
an der
Freien Universität Berlin

Erstgutachter:	PD Dr. Ekkehard Scheuber
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Dr. h.c. Volker Jacobshagen
Tag der Disputation:	27. Januar 2004

Zusammenfassung

Die Entstehung des zentralandinen Altiplano-Puna-Plateaus am aktiven Kontinentalrand Südamerikas war mit der Verdoppelung der Krustenmächtigkeit und dem Anstieg der Erdoberfläche um rund 4000 m seit dem Beginn des Tertiärs verbunden. Der Hebung durch Krustenverdickung wirkt die Erosion entgegen und führt zur Exhumierung und Abkühlung von Gesteinen. Im Rahmen dieser Arbeit wird mittels Spaltspur-Thermochronologie an Apatit die tertiäre Abkühlungs- und Exhumationsgeschichte der zentralen Anden in Südbolivien rekonstruiert. Ziel ist es, durch Datierung und Quantifizierung der Exhumation die verursachenden Hebungsprozesse während der Plateaubildung zu charakterisieren.

Das Untersuchungsgebiet folgt einem Profil bei etwa 21°S in Südbolivien über das Plateau und die östliche Flanke der Anden. Das Plateau als Gebiet mit mittlerer Höhe >3000 m reicht vom rezenten magmatischen Bogen der Westkordillere über den Altiplano bis zum Ostrand der Ostkordillere. Im Osten schließt sich ein Vorland-Überschiebungsgürtel an (Interandin und Subandin). In der Westkordillere sind prätertiäre Gesteine von neogenen Vulkaniten bedeckt. Der Altiplano ist mit bis zu 7 km mächtigen tertiären Sedimenten gefüllt, und nur im stärker deformierten zentralen Teil sind paläozoische Einheiten aufgeschlossen. Die Ostkordillere stellt ein bivergentes Überschiebungssystem in ordovizischen Gesteinen dar.

Apatit-Spaltspurdatierungen wurden an 28 Proben von paläozoisch-/mesozoischen und an 2 Proben von tertiären Sedimentgesteinen durchgeführt. Durch die Charakterisierung des variablen Verheilungsverhaltens detritischer Apatite mittels D_{par}-Bestimmung konnten Apatit-Populationen mit unterschiedlichen Temperaturen der vollständigen Verheilung zwischen 160°C und 110°C differenziert werden und dadurch die Temperaturgeschichte höher aufgelöst werden. Die mittleren Spaltspurlängen liegen überwiegend zwischen 12 µm und 14 µm. Serien von computergestützten Vorwärtsmodellen der thermischen Geschichte (AFTSolve) ergaben, dass der Abkühlungsbeginn teilweise deutlich vor oder nach dem scheinbaren Alter gelegen haben kann. Die zutreffenden Temperaturpfade konnten im geologischen Kontext meist näher eingegrenzt werden. Die scheinbaren Spaltspuralter innerhalb des Plateaus liegen zwischen 36 und 20 Ma mit einem Maximum um 30 Ma im mittleren Oligozän. Deutlich jüngere Abkühlalter kennzeichnen das Vorland-Überschiebungssystem östlich des Plateaus mit 19-9 Ma im Interandin. Proben mit Mischaltern von 29 und 75 Ma im Subandin kühlten nach 8 Ma ab.

Dank umfangreicher geothermischer Daten aus den zentralen Anden Boliviens konnten differenzierte paläogeothermische Gradienten (19-32°C/km) zur Übertragung der thermischen in räumliche Informationen zugrunde gelegt werden. Die für das Tertiär in Betracht kommenden Änderungen des lithosphärischen Temperaturfeldes hatten wahrscheinlich einen gegenüber der Abkühlung durch Exhumation nachrangigen Einfluss auf die beobachteten Abkühlungsraten. Aus der Maximaltemperatur und der Versenkungstiefe einer tertiären Probe im zentralen Altiplano konnte die Paläo-Oberflächenwärmeflussdichte im unteren Miozän auf 70 ± 20 mW/m^2 abgeschätzt werden.

Die früheste Exhumation im Untersuchungsgebiet fand ab dem Obereozän (ca. 42 Ma) in der zentralen Ostkordillere statt und korreliert mit miozänen Diskordanzen, der Inversion kretazischer Abschiebungen sowie mit der Provenance eo-/oligozäner Sedimente im Altiplano- und Camargo-Becken. Das mittlere Oligozän (33-27 Ma) ist durch eine regionale Ausweitung der Exhumation auf den Bereich des heutigen Plateaus gekennzeichnet. Spaltspurdaten von Basement-Geröllen aus untermiozänen Sedimenten des Altiplano deuten auf die rasche Exhumation in deren Liefergebieten des westlichen Altiplano oder der angrenzenden Westkordillere ab 32 Ma hin. Im zentralen Altiplano wurden paläozoische Gesteine entlang

der ostvergenten Uyuni-Khenayani-Störungszone (UKFZ) ab 31 ± 2 Ma exhumiert, während unmittelbar westlich der UKFZ die Erwärmung durch sedimentäre Überlagerung bis 18 Ma anhielt. Diese entgegengesetzten Temperaturpfade deuten an, dass die westlichste Störung der UKFZ zunächst als westwärts einfallende Abschiebung aktiv war. In der westlichen Ostkordillere setzte die Exhumation im frontalen und im hinterlandwärtigen Teil des westvergenten Überschiebungssystems etwa gleichzeitig zwischen 32-27 Ma ein. In der östlichen Ostkordillere entsprechen die Spaltspurdaten über das Sama-Yunchará-Antiklinorium im rückgeformten Zustand der Basis einer fossilen partiellen Verheilungszone. Diese wurde wahrscheinlich ab 30 Ma durch Aktivität der ostvergenten Hauptüberschiebung des Interandins (IAT) als Block über der Rampe der IAT gehoben und exhumiert.

Exhumationsraten innerhalb des Plateaus waren im Zeitraum 30-20 Ma überwiegend niedrig (0.1-0.3 mm/a), und blieben bis zum Ende der Exhumation um 10 Ma im Mittel konstant. Dies deutet auf ein Gleichgewicht zwischen Hebung und Erosion hin, und gibt keinen Hinweis auf einen Anstieg der mittleren Höhe relativ zum Meeresspiegel. Die Flächenbilanz zwischen der Krustenverdickung durch tektonische Verkürzung und Sedimentation gegenüber der Krustenausdünnung durch Exhumation ergibt, dass die Ostkordillere gegen Ende der oberkrustalen Deformation vor 10 Ma eine mittlere Höhe von mindestens 2800 m NN erreicht hatte. Nach geologischen Befunden waren die Erosionsraten in der Ostkordillere und im Altiplano seit 15-10 Ma sehr gering. Wahrscheinlich hatte der Ostrand des Plateaus zu dieser Zeit eine ausreichende Oberflächenhöhe erreicht (ca. 2000 m NN), um einen orographischen Regenschatten zu bewirken.

Im Vorland-Überschiebungssystem an der Ostflanke des Plateaus migrierte die Exhumation ab 18 Ma nach Osten. Die Exhumationsfront lag um 18 Ma im zentralen Interandin, erreichte zwischen 11 Ma und 8 Ma das westliche Subandin und wahrscheinlich um 6 Ma das östliche Subandin. Die Exhumation spiegelt hier, im Unterschied zum Plateau, deutlich eine ostwärts wandernde Deformationsfront wider. Ein starker Anstieg der Exhumationsraten von 0.4 mm/a auf über 0.7 mm/a im Verlauf des Obermiozäns war vermutlich die Folge beschleunigter Verkürzung.

Die obereozäne Exhumation und Deformation einer schmalen sog. Proto-Ostkordillere ist auch in Nordbolivien belegt und erfolgte zeitgleich mit den Einengungen der incaischen Phase in der Präkordillere ca. 450 km weiter westlich. Die während des mittleren Oligozäns plateauweit etwa gleichzeitig einsetzende, überwiegend initiale Exhumation deutet auf regional wirksame Hebungsprozesse in der frühen Phase der Plateaubildung hin. Die Bildung orogener Plateaus ist an eine rheologisch schwache Zone in der Kruste gebunden. Infolge der Ausbildung eines konvektiven Asthenosphärenkeiles entstand wahrscheinlich bereits im Oberoligozän die thermische Schwächung der Lithosphäre über die Breite des zukünftigen Plateaus. Die damit verbundene thermale Hebung, und in der Folge zunehmend die verteilte tektonische Verkürzung der entfestigten Kruste bewirkten vermutlich den regionalen Exhumationsbeginn im mittleren Oligozän.

Abstract

The Tertiary formation of the Altiplano-Puna plateau at the active continental margin of South America resulted in the doubling of the crust and surface uplift by about 4000 m. Uplift leads to erosion, exhumation and cooling of rocks. The aim of this study is to reconstruct the Tertiary cooling and exhumation history by apatite fission track thermochronology (AFT) and hence to characterise the processes which produced plateau uplift.

The study area follows a transect at 21°S in Southern Bolivia across the plateau and the eastern flank of the Andes. The plateau with mean elevations >3000 m extends from the recent volcanic arc of the Western Cordillera, across the Altiplano to the eastern margin of the Eastern Cordillera. The plateau is bordered to the east by a foreland fold-thrust belt (Interandean and Subandean). In the Western Cordillera, pre-Tertiary rocks are covered beneath Neogene volcanics. The Altiplano represents an intramontane basin with up to 7 km thick Cenozoic continental sediment fill. Paleozoic units are exposed along a major fault zone in the central part. The Eastern Cordillera forms a bivergent thrust system in Ordovician sedimentary rocks.

Apatite fission track results are obtained from 28 samples of Paleozoic-Mesozoic and from 2 samples of Tertiary sedimentary rocks. The variable annealing behaviour of detrital apatites is adressed by measuring the kinetic parameter D_{par}. The total annealing temperatures of the dated apatites range from 110 °C to 160 °C. Separation of apatite-populations with different annealing kinetics provides a higher resolution of the temperature history. The majority of samples have mean track lengths between 12 µm and 14 µm. Forward modelling of the thermal history (AFTSolve) shows that the onset of cooling can be considerably older as well as younger than the apparent fission track age. The consideration of the geological context constrains plausible time-temperature paths. Apparent ages in the plateau range from 36 Ma to 20 Ma, with a maximum around 30 Ma in the middle Oligocene. Significantly younger cooling ages with 19-9 Ma are obtained in the foreland thrust belt. Samples with mixed ages of 29 Ma and 75 Ma in the Subandean cooled after 8 Ma.

Based on published geothermal data from the Bolivian Andes, paleo-geothermal gradients from 19 °C/km to 32 °C/km are assumed for the interpretation of the AFT-data in the spatial frame of reference. Changes of the lithospheric thermal conditions during the Tertiary probably had a subordinate influence on the observed cooling rates compared to the exhumational cooling. The maximum temperature and burial depth of a sample in the central Altiplano are used to estimate a paleo-surface heat flow density of 70 ± 20 mW/m^2 for the early Miocene.

Late Eocene (ca. 42 Ma) exhumational cooling in the central part of the Eastern Cordillera correlates with Miocene unconformities, the inversion of Cretaceous rift structures and the provenance of Eocene-Oligocene sediments in the Altiplano and Camargo basins. The middle Oligocene (33-27 Ma) was characterised by a broad onset of exhumation, distributed across the future plateau region. AFT-data of basement pebbles from early Miocene sediments in the Altiplano suggest rapid exhumation in the source areas of the western Altiplano or Western Cordillera. In the central Altiplano, Paleozoic rocks were exhumed along the east-vergent Uyuni-Khenayani fault zone (UKFZ), starting from 31 ± 2 Ma. In the adjacent depocenter west of this fault zone, however, heating by sedimentary burial continued until 18 Ma. These opposite temperature paths indicate that the western thrust of the UKFZ was initially active as a normal fault. In the western part of the Eastern Cordillera, exhumation initiated in the frontal as well as the inner

parts of the west-vergent thrust system between 32 Ma and 27 Ma. In the east-vergent part of the Eastern Cordillera, the AFT-data across the Sama-Yunchará anticlinal structure (SYA) presumably correspond to the base of a fossil partial annealing zone in the restored situation of the SYA. By incipient movement of the Interandean Thrust (IAT) around 30 Ma, this partial annealing zone was uplifted and exhumed as a block above the ramp of the IAT.

Exhumation rates within the plateau were predominantly low with 0.1-0.3 mm/a during the time span 30-20 Ma and, on average, remained constant until the end of exhumation around 10 Ma. This indicates an equilibrium between rock uplift and erosion and provides no evidence for a change in surface uplift rate. A rough cross-sectional mass balance between crustal thickening by tectonic shortening and sedimentation and crustal thinning by exhumation suggests that the Eastern Cordillera had reached a mean elevation of at least 2800 m at the end of upper crustal deformation by 10 Ma. There is geological record of very low erosion rates in the Eastern Cordillera since 15-10 Ma. This probably reflects an orographic rain shadow due to the elevated eastern plateau margin.

In the foreland thrust belt at the eastern flank of the plateau, exhumation migrated eastward since about 18 Ma. The exhumation front had reached the central Interandean by 18 Ma, the western Subandean between 11 Ma and 8 Ma and the eastern Subandean probably after 6 Ma. In contrast to the plateau, the exhumation pattern in the foreland thrust system clearly reflects the eastward propagation of deformation. A strong increase of exhumation rates from 0.4 mm/a to >0.7 mm/a during the late Miocene corresponds with an acceleration of shortening rates.

The late Eocene exhumation and deformation of a narrow Proto-Eastern Cordillera, which is also documented in northern Bolivia, correlates with the shortening of the Incaic phase in the Precordillera, 450 km farther to the west. Plateau-wide and mostly initial exhumation in the middle Oligocene requires regional uplift during the early stage of plateau evolution. A pre-requisite for the formation of orogenic plateaus is a rheologically weak zone in the crust. The emplacement of a convective asthenospheric wedge in Oligocene times thermally weakened the lithosphere across the width of the future plateau. Consequent thermal uplift and distributed tectonic shortening of the weakened crust could have effected the regional onset of exhumation.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Das Altiplano-Puna-Plateau 1
1.2 Modelle der Plateaubildung 4
1.3 Bisherige thermochronologische Untersuchungen 5
1.4 Ziel der Arbeit 7
1.5 Exhumation und Hebung 8

2 Gliederung der Anden bei 21°S 10

3 Stratigraphische Entwicklung 12
3.1 Basement der Westkordillere 12
3.2 Paläozoikum 12
3.3 Kreide 15
3.4 Oberkreide – Oberpaläozän 15
3.5 Oberpaläozän – Oberoligozän 16
3.5.1 Altiplano 16
3.5.2 Zentrale Ostkordillere 17
3.5.3 Östliche Ostkordillere (Camargo-Becken) 17
3.6 Oberoligozän – Miozän 18
3.6.1 Altiplano 18
3.6.2 Ostkordillere 19
3.6.3 Interandin und Subandin 20

4 Tektonische Entwicklung 22
4.1 Paläozoikum 22
4.2 Mesozoisch-känozoische Entwicklung 24
4.2.1 Paläozän 24
4.2.2 Eozän – Oligozän (ca. 55-30 Ma) 25
4.2.3 Oligozän – Untermiozän (ca. 30-17 Ma) 25
4.2.4 Mittel- bis Obermiozän (ca. 17-10 Ma) 26
4.2.5 Obermiozän – rezent (< 10 Ma) 27

5 Methodik 29
5.1 Datierung 29
5.2 Spaltspurlängen 30
5.3 Partielle Verheilungszone 32
5.4 Verheilungsmodelle 33
5.5 Kinetische Variabilität von Apatiten 33
5.6 Modellierung von Apatit-Spaltspurdaten 34
5.7 Präparation 37
5.8 Analyse 37

6 Geothermischer Gradient im Tertiär 40
6.1 Daten zur rezenten Wärmeflussdichte 40
6.2 Interpretation des paläogeothermischen Gradienten 42

7 Ergebnisse der Spaltspurdatierungen 44
7.1 Allgemeine Ergebnisse 44
7.2 Gesamtprofil 51
7.3 Altiplano 53
7.3.1 Spaltspurdaten 53
7.3.2 Interpretation 60
7.3.3 Tertiäre Versenkung des Paläozoikums in der Uyuni-Khenayani-Störungszone 61
7.3.4 Exhumationsraten 62
7.3.5 Tektonische Entwicklung der Uyuni-Khenayani-Störungzone 63
7.3.6 Diskussion 66
7.4 Westliche Ostkordillere 69
7.4.1 Spaltspurdaten 70
7.4.2 Paläotiefenlage und Abkühlungsbeginn 72
7.4.3 Exhumationsraten 74
7.4.4 Interpretation der Altersunterschiede 75
7.4.5 Diskussion 77
7.5 Zentrale Ostkordillere 79
7.5.1 Spaltspurdaten 79
7.5.2 Interpretation 84
7.6 Östliche Ostkordillere (Sama-Yunchará-Antiklinorium) 86
7.6.1 Überblick 86
7.6.2 Spaltspurdaten 88
7.6.3 Konzept der fossilen partiellen Verheilungszone 93
7.6.4 Abkühlungsbeginn 96
7.6.5 Exhumationsrate 96
7.6.6 Tertiär-Bedeckung des Sama-Yunchará-Antiklinoriums 98
7.6.7 Tektonisches Modell 98
7.7 Falten- und Überschiebungsgürtel im östlichen Vorland 102
7.7.1 Spaltspurdaten 103
7.7.2 Paläotiefenlage der Proben 109
7.7.3 Exhumationsraten 111
7.7.4 Tektonische Entwicklung 111
7.7.5 Entwicklung der Vorlandsedimente 113

8 Wärmeflussdichte im unteren Miozän (Altiplano) 114
8.1 Temperaturgradient 114
8.2 Wärmeleitfähigkeit 115
8.3 Wärmeflussdichte 118
8.4 Temperaturfeld durch Beckenmodellierung 118
8.5 Einfluss von Sedimentation auf die Wärmeflussdichte 119
8.6 Diskussion 121

9 Diskussion der Exhumations- und Hebungsgeschichte 122
9.1 Entwicklung des lithosphärischen Temperaturfeldes im Tertiär 122
9.1.1 Kretazisches Rifting 122
9.1.2 Magmatischer Bogen ab dem Oberoligozän 124

9.2 Zusammenfassung der Exhumationsgeschichte 125
9.3 Korrelation zwischen Exhumation und Deformation 126
9.3.1 Paläozän-Eozän 126
9.3.2 Oligozän-Pliozän 128
9.3.3 Modelle der tektonischen Entwicklung 130
9.3.4 Verkürzungsraten 131
9.4 Exhumationsraten 133
9.5 Entwicklung der Paläohöhe 135
9.6 Spaltspurdaten in der nordbolivianischen Ostkordillere 138
9.6.1 Kontraste in der Exhumationsentwicklung beiderseits der Orokline 139
9.7 Erosions- und Sedimentationsbilanz im Tertiär 141
9.8 Zu den Modellen der Plateaubildung 143

10 Schlussfolgerungen 147

11 Ausblick 149

Literaturverzeichnis 150

Anhang 162

Danksagung 173