

**Das Süd-Altiplano-Becken (Bolivien) im Tertiär:  
Sedimentäre Entwicklung und tektonische Implikationen**

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

vorgelegt von  
Patricio Silva González  
Tag der Disputation: 29. April 2004

Erstgutachter: PD. Dr. Dorothee Mertmann

Zweitgutachter: Prof. Dr. Christoph Heubeck

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe.

Berlin, im März 2004

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Rolando Silva F. und Sonia González M., meiner Ehefrau  
Montserrat Antequera C. und meinem Sohn Simón Nicolás Silva Antequera.

# **Das Süd-Altiplano-Becken (Bolivien) im Tertiär: Sedimentäre Entwicklung und tektonische Implikationen**

von

**Patricio Silva González**

## **Zusammenfassung**

Die tertiären Sedimente und ihre Sedimentationsbedingungen des Süd-Altiplano-Beckens wurden analysiert, um mit Hilfe unterschiedlicher Methoden (Stratigrafie, Faziesanalyse, Petrografie, Liefergebietsanalyse, Absenkungs-/Hebungsgeschichte) ein umfassendes Beckenmodell zu erstellen. Die Gesamtmächtigkeiten erreichen im zentralen Teil Mächtigkeiten von bis zu 7500 Metern, am Ostrand von bis zu 4500 Metern.

An der Kreide/Tertiär-Wende wurden die teilweise marinen Ablagerungen der El Molino-Fm. in Südbolivien weitverbreitet abgelagert. Daraufhin wurden im Süd-Altiplano-Becken die tertiären, kontinentalen Ablagerungen akkumuliert. Sie werden in die Santa Lucía-, Cayara-, Potoco-, San Vicente- und Chocaya-Formationen gegliedert.

Die Entwicklung des Süd-Altiplano-Beckens kann also bis in das Paläozän zurück verfolgt werden. Der westliche Beckenrand wurde vom oberkretazisch/alttertiären magmatischen Bogen gebildet. Nach Osten reichte das Becken bis zum Camargo-Becken. Nach Norden ging es in das zentrale und nördliche Altiplano-Becken über, und nach Süden reichte das Becken bis weit nach NW-Argentinien hinein. In diesem paläozänen Becken wurden die Sedimente der El Molino- und Santa Lucía-Formationen bzw. ihre Äquivalente abgelagert.

Am Ende des Paläozäns fand eine erste Beckenumgestaltung statt. Es entstand die Proto-Ostkordillere, die das Süd-Altiplano-Becken von den intramontanen Becken der Ostkordillere abtrennte. Im Zuge der Entstehung der Proto-Ostkordillere wurden die fluviatilen, kompositionell reifen Sedimente der Cayara-Fm. in einem westlich vorgelagerten Vorland-Becken abgelagert.

Das eozäne Süd-Altiplano-Becken ist als ein faziell relativ einheitlicher Ablagerungsraum zu bewerten. Die tektonische Aktivität konzentrierte sich auf die jeweiligen Beckenränder. Im Westen wurde im Zuge der Inkaischen Deformationsphase das „back-arc“-Becken zum kretazisch-eozänen magmatischen Bogen zu einem Vorland-Becken invertiert. Geringfügig wurde im diesem Zeitraum die Potoco-Fm. im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens von Westen beliefert.

Im Ostteil des Süd-Altiplano-Becken wanderte die Deformationsfront der Proto-Ostkordillere nach Westen. Dieses Hochgebiet mit exponierten paläozoischen und kretazischen Gesteinen war das Liefergebiet der östlichen Potoco-Fm. Es entstanden Playa-, fluviatile-, alluviale und wiederum fluviatile Sedimente mit zunehmender Korngröße. Das Liefergebiet der Potoco-Fm. bildete dabei die Proto-Ostkordillere mit paläozoischen und kretazischen Gesteinen.

In dieser ruhigen Phase wurde einzig das zentrale Süd-Altiplano-Becken ab dem späten Eozän von extensionaler Tektonik erfasst. Identifiziert wurde diese eozäne extensionale Aktivität aufgrund der großen Mächtigkeitsunterschiede in der Potoco-Fm. und aus der Untersuchung der San Cristóbal-Störung. Diese tektonische Tätigkeit erzeugte aber an der Oberfläche keine großen Reliefunterschiede, so dass weiterhin die feinkörnigen Sedimente der zentralen Potoco-Fm. in Playas abgelagert wurden. Die Sedimentliefergebiete befanden sich nur an den jeweiligen Beckenrändern. Zeitgleich mit der extensionalen Bewegung an der San Cristóbal-Störung im zentralen Süd-Altiplano-Becken bildeten die Beckenränder des Süd-Altiplano-Beckens jeweils ein Vorland-Becken.

An der Wende Unter-/Ober-Oligozän (~ 30 Ma) veränderte sich das tektonische Regime im S-Altiplano-Becken drastisch. Das westliche Hochgebiet ist nicht aufgeschlossen, lässt sich aber aus der Geröllzusammensetzung der San Vicente-Fm. rekonstruieren. Auffallend ist der Gehalt an permischen Gesteinen sowie Kristallin neben kretazisch/alttertiären Komponenten.

Die Deformationsfront der Proto-Ostkordillere wanderte tief in das östliche Vorland (Lipez-Teilbecken) hinein. Im Zuge dieser Progradation entstand das Atocha-Becken als ein „piggy-back“-Becken und wurde seitdem nicht mehr von Tektonik beeinflusst.

Im Ober-Oligozän wurde der vulkanische Bogen aktiv, der sich von der heutigen Westkordillere bis in den Bereich der Ostkordillere ausdehnte. Dabei wurden die grobkörnigen, vulkanoklastischen Sedimente der San Vicente-Fm. geschüttet. Die Liefergebiete dieser Formation liegen als Hochgebiete also sowohl im Westen und im Osten des Beckens, als auch neu hinzukommend im zentralen Teil.

Neben den Liefergebieten im Westen und Osten entstand im zentralen Süd-Altiplano-Becken entlang der Uyuni-Khenayani-Fault-Zone (UKFZ) ein weiteres Hochgebiet entlang der Grabenschultern, in dem paläozoische, mesozoische und alttertiäre Gesteine exponiert waren. Dessen Entwicklung hatte bereits im Eozän begonnen; erst im Oligozän entwickelte es sich zu einem „intra-arc“-Becken und beeinflusste ab diesem Zeitpunkt die Fazies in den umliegenden Akkumulationsgebieten. Bei der Inversion des „intra-arc“-Beckens entwickelte sich im Verlauf des Oligozäns eine zweite Deformationsfront, die ab Miozän nach Osten progradierte. Im Zuge dieser Inversion wurden syntektonische Sequenzen, die jeweils von progressiven Diskordanzen begrenzt werden, innerhalb der San Vicente-Fm. sowohl im Liegenden wie im Hangenden der invertierten Störungen geschüttet. Am östlichen Beckenrand wanderte die Deformationsfront nach Westen in das Vorland hinein. Dabei entstanden auch hier syntektonische Sequenzen innerhalb der San Vicente-Fm.. Während die Hochgebiete tektonisch gehoben wurden, senkte sich die Basis des Süd-Altiplano-Beckens, abgesehen von einigen Ausnahmen, ab. Aufgrund der großen Sedimentanhäufung im Süd-Altiplano-Becken hob sich jedoch gleichzeitig die Oberfläche des Beckens.

Die vulkanische Tätigkeit hielt während der gesamten Ablagerung der San Vicente-Fm. an und charakterisiert damit zusammen mit der tektonischen Aktivität diese Formation als eine syntektonische, vulkanoklastische Ablagerung. Seit dem späten Miozän (7-10 Ma) herrscht tektonische Ruhe im Süd-Altiplano-Becken.

## **Abstract**

The Tertiary sediments of the Southern Altiplano Basin, Bolivia, and the depositional setting were analysed. This study was made based on stratigraphy, facies, petrography, provenance and subsidence analysis, and a basin model was developed. The basin witnessed variation in sediment accumulation, with the central part containing 7500 m and the eastern part up to 4500 m thick cenozoic sediments.

These sediments are classified in the El Molino, Santa Lucía, Cayara, Potoco, San Vicente and Chocaya formations. The El Molino Formation was deposited in a wide area during the Cretaceous-Tertiary boundary. Above the El Molino Formation Tertiary continental sediments were accumulated in the Southern Altiplano Basin.

The development of the Southern Altiplano Basin began in the Paleocene. The western margin was formed by the Cretaceous-Tertiary magmatic arc. To the east, the basin extent into the Camargo basin while to the north, the Southern Altiplano Basin was part of the Central and Northern Altiplano basin. To the south, the basin was part of a common depositional area with NW-Argentina. In this basin the sediments of the El Molino and Santa Lucía formations were deposited. At the end of the Paleocene, a new basin configuration commenced with the development of the Proto-Eastern Cordillera and separation of the Southern Altiplano Basin from the intramontane basins in the Proto-Eastern Cordillera. The compositionally mature and fluvial Cayara Formation was deposited in a foreland basin located in the west of the initially formed Proto-Eastern Cordillera.

During the Eocene the Southern Altiplano Basin was a distal depositional area. The tectonic activity was concentrated in the basin margins. During the Incaic phase the back arc basin in the west was inverted and a foreland basin developed. In the central part of the Southern Altiplano Basin part of the Potoco Formation was sourced from the west.

The deformation front of the Proto-Eastern Cordillera in the east propagated to the west, forming a foreland basin and the Atocha piggy-back basin. The uplifted area consisting of Paleozoic and Cretaceous rocks was the source rocks of the Potoco Formation. In the eastern part of the basin, the Potoco Formation consists of playa-, fluvial- and alluvial deposits.

In this relative tectonically quiescent phase, only the central part of the Southern Altiplano Basin was from the Upper Eocene influenced by an extensional tectonic activity. This extensional activity which did not create major faults at the surface, led to the deposition of the fine-grained playa Potoco Formation.

These sediments were sourced from the Southern Altiplano Basin margins. During this time, both the eastern and western parts of the Southern Altiplano Basin margins formed a foreland basin, while a graben structure in the central part was limited by the San Cristobal fault.

The transition from Lower to Upper Oligocene witnessed a drastic tectonic change. Permian, crystalline and Tertiary rocks are the source rocks of the Oligocene-Miocene sediments in the western part of the Southern Altiplano Basin. The western source rocks of the Oligocene-Miocene San Vicente Formation recent does not outcrop on the surface, but can be supported based on the petrography of the San Vicente Formation.

In the Upper Oligocene a new volcanic arc began and reached the western margin of the Proto-Eastern Cordillera. Simultaneously coarse-grained and volcanoclastics sediments were deposited in the San Vicente Formation. The sediments were sourced from the west, central and east of the Southern Altiplano Basin.

Also during the transition from Lower to Upper Oligocene a north to south oriented intra-arc basin developed as a subordinate structure in the central part of the Southern Altiplano Basin.

During the Miocene inversion of the intra-arc basin, a new deformation front developed propagating to the east. Syntectonic sequences were deposited in the San Vicente Formation during this inversional activity, being delimited at the base and top by progressive discordances. These sequences were deposited in the hanging- and footwall of the inverted faults. In the eastern margin of the Southern Altiplano Basin, the deformation front continued to prograde to the west, depositing syntectonical sequences in the San Vicente Formation.

The margins of the Southern Altiplano Basin were uplifted by tectonic activity, at the same time the basin witnessed high subsidence.

The Southern Altiplano Basin is between 7 to 10 Ma tectonically inactive.

## Resumen

Los sedimentos terciarios de la Cuenca del Altiplano Boliviano Sur y las condiciones de depósitos han sido analizados y con ayuda de diferentes métodos y análisis (de estratigrafía, de facies, de petrografía, de procedencia, de subsidencia/elevación) así poder desarrollar un amplio modelo de cuenca. Los sedimentos alcanzan espesores hasta los 7500 mts en la parte central y hasta los 4500 mts en la parte oriental.

Los sedimentos de la formación El Molino fueron depositados en un área amplia en un período de transición del cretácico al terciario. Encima de estos fueron acumulados en la cuenca del Altiplano sur sedimentos terciarios y continentales. Estos depósitos se clasificaron en las formaciones Santa Lucía, Cayara, Potoco, San Vicente y Chocaya.

El desarrollo de la Cuenca del Altiplano Sur Boliviano comenzó en el Paleoceno. El margen oriental de la cuenca lo formó el arco magmático de edad cretácico superior hasta terciario. Hacia el este la cuenca alcanzó hasta la cuenca de Camargo. Hacia el norte formó parte de la cuenca del Altiplano Norte y Centro, y hacia el sur la cuenca del Altiplano Sur alcanzó hasta el NO Argentino. En esta cuenca de edad paleocena fueron depositados los sedimentos de la formación El Molino y Santa Lucía y sus equivalentes.

Al final del Paleoceno se efectuó en esta región una nueva configuración de cuencas. La Proto-Cordillera Oriental comenzó su desarrollo y separó a la Cuenca del Altiplano Sur de las cuencas intramontañas de la Cordillera Oriental. En el proceso inicial de formación de la Proto-Cordillera Oriental fueron depositados los sedimentos fluviales y maduros de la formación Cayara en una cuenca de antepaís situada al Oeste de la Proto-Cordillera Oriental.

La Cuenca del Altiplano Sur fue durante el Eoceno un espacio de depósito relativamente tranquilo. La actividad tectónica se concentraba en los lugares que lindaban la Cuenca. En el Oeste fue invertida durante la Fase Incaica la cuenca de trasarco correspondiente al arco magmático Cretácico/Eoceno convirtiéndose así en una cuenca de antepaís. Algunos depósitos de la formación Potoco en la parte central de la Cuenca del Altiplano Sur provienen del Oeste.

En el Este el frente de deformación de la Proto-Cordillera Oriental se trasladaba hacia el Oeste. Esta área elevada compuesta por rocas del paleozoico y cretácicas fue el área de procedencia de la formación Potoco en el Este de la Cuenca Altiplanica. Durante este período fueron depositados de la base al top sedimentos de playa-, fluviales-, aluviales y de nuevo fluviales correspondientes a la Formación Potoco.

En esta fase tectónicamente tranquila únicamente el centro de la Cuenca del Altiplano Sur fue influida desde el Eoceno superior por una actividad tectónica de carácter extensiva. Esta actividad extensional no produjo mayores estructuras en la superficie, de esa forma siguieron siendo depositados los sedimentos de playa de la Formación Potoco.

Los lugares altos como productores de material se encontraban al borde de la Cuenca Sur del Altiplano. Es este periodo ambos sectores marginales de la Cuenca Sur del Altiplano formaban una cuenca de antepais, la parte central un graben que lo limitaba la falla San Cristobal.

En la fase de transición Oligoceno Inferior al Superior hubo en la Cuenca del Altiplano Sur un cambio drástico en el régimen tectónico. El área de procedencia de los sedimentos en el oeste no aflora, pero se puede reconstruir según la composición de la formación San Vicente. Se debe recalcar la presencia de rocas permicas y cristalinas como también rocas cretácicas y terciarias.

El frente de deformación de la Proto-Cordillera Oriental se trasladó en dirección Oeste a la cuenca de antepais (Cuenca de los Lipez). Durante la progradación del frente de deformación hacia el Oeste la cuenca de Atocha se formó como una cuenca piggy-back separada de la Cuenca del Altiplano Boliviano Sur.

Al mismo tiempo en el Oligoceno Superior comenzó la actividad volcánica del nuevo arco volcánico que alcanzó hasta la cordillera oriental. Simultáneamente fueron depositados los sedimentos de tamaño grueso y volcanoclasticos de la Formación San Vicente. Las rocas de procedencia de esta Formación están situadas en el Este, en la parte Central y en el Oeste.

Durante la transición del Oligoceno Inferior al Superior se formó como una estructura secundaria en el centro de la Cuenca del Altiplano Sur una cuenca de Intraarco orientada de Norte a Sur. El inicio de esta cuenca había comenzado ya durante el eoceno como un graben, recién en el Oligoceno se desarrolló hacia una cuenca de Intraarco, influenciando así la facies en las áreas de depósitos cercanos.

Durante la inversión de las estructuras limitrofes de la cuenca de Intraarco se desarrolló un nuevo frente de deformación, que desde el mioceno se trasladó hacia el Este. Durante esta inversión fueron depositadas secuencias sintectónicas, que están limitadas por discordancias progresivas, dentro de la formación San Vicente. Estas secuencias fueron depositadas en la parte superior como también inferior de las fallas invertidas. En el lado marginal Oriental de la Cuenca Sur del Altiplano el frente de deformación propagó hacia el Oeste y también aquí fueron depositadas secuencias sintectónicas dentro de la formación San Vicente.

Los lugares marginales altos a la Cuenca Sur del Altiplano fueron elevados tectónicamente mientras que al mismo tiempo la base de la Cuenca estaba siendo sumergida, con algunas excepciones locales. Por causa del gran espesor de los sedimentos dentro de la Cuenca del Altiplano Sur la superficie de esta fue elevada.

El volcanismo estuvo activo durante todo el tiempo en que fue depositada la formación San Vicente, caracterizándola así junto a la actividad tectónica como una formación sintectónica y volcanoclastica. Desde cerca los 7 a 10 Ma la Cuenca del Altiplano Sur está tectónicamente tranquila.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel und Methodik der Arbeit	1
1.2	Geografischer und geologischer Überblick	2
1.3	Geologische Entwicklung Südbolivians	5
1.4	Geophysikalische Daten aus dem Altiplano bei 21° S	9
<b>2</b>	<b>Stratigrafie der untersuchten Sedimente im Süd-Altiplano-Becken</b>	<b>11</b>
2.1	Allgemeines	11
2.2	Kretazische bis paläozäne Sedimente	13
2.3	Santa Lucía-Fm.	14
2.4	Cayara-Fm.	15
2.5	Potoco-Fm.	16
2.5.1	Lithologie	19
2.5.2	Abfolge der Potoco-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens	21
2.5.3	Abfolge der Potoco-Fm. im zentralen und SW-Teil des Süd-Altiplano-Beckens	22
2.5.4	Alter der Potoco-Fm.	25
2.6	San Vicente-Fm.	25
2.6.1	Lithologie	26
2.6.2	San Vicente-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens	29
2.6.3	San Vicente-Fm. im zentralen und westlichen Teil des Süd-Altiplano-Beckens	30
2.6.4	Zeitliche Einordnung der San Vicente-Fm.	32
2.7	Chocaya-Fm.	32
2.8	Zusammenfassung zur Stratigrafie	33
<b>3</b>	<b>Faziesanalyse</b>	<b>35</b>
3.1	Lithofaziestypen	35
3.2	Architekturelemente	44
3.3	Ablagerungsmodelle und Faziesvergesellschaftung	47
3.3.1	Alluvialer Ablagerungsraum	48
3.3.2	Fluviatiler Ablagerungsraum	49
3.3.2.1	Mäandrierende Flussysteme	49
3.3.2.2	Verflochtene Flussysteme	51
3.3.3	Äolischer Ablagerungsraum	52
3.3.4	Lakustriner Ablagerungsraum	53
3.4	Ablagerungsmodelle der untersuchten Formationen	54
3.4.1	Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsräume der Santa Lucía-Fm.	54
3.4.2	Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsräume der Cayara-Fm.	54

3.4.3 Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsräume der Potoco-Fm.	55
3.4.4 Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsräume der San Vicente-Fm.	60
3.4.5 Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsräume der Chocaya-Fm.	63
<b>4 Sedimentpetrografie</b>	<b>65</b>
4.1 Sandsteinpetrografie	65
4.1.2 Beschreibung einzelner Komponenten	66
4.2. Reifegrad und die Klassifikation der Sandsteine	70
4.2.1 Reifegrad	70
4.2.2 Sandsteinklassifikation	71
4.2.2.1 Sandsteine und Grauwacken der Santa Lucía-Fm.	71
4.2.2.2 Sandsteine der Cayara-Fm.	72
4.2.2.3 Sandsteine und Grauwacken der Potoco-Fm.	73
4.2.2.4 Sandsteine und Grauwacken der San Vicente-Fm.	76
4.2.2.5 Sandsteine der Chocaya-Fm.	78
4.3 Konglomerate der San Vicente-Fm.	78
4.3.1 Zusammensetzung der Konglomerate	78
4.3.2 Konglomerate im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens	78
4.3.3 Konglomerate aus dem zentralen und Südteil des Süd-Altiplano-Beckens	79
4.3.4 Konglomerate aus dem Westteil des Süd-Altiplano-Beckens	80
<b>5 Liefergebietsanalyse</b>	<b>81</b>
5.1 Einführung und Methodik	81
5.2 Liefergebiete der spätpaläozänen bis miozänen Sedimente des Süd-Altiplano-Beckens	84
5.3 Beschreibung der untersuchten Sandsteine	86
5.4 Konglomerate	86
5.5 Gesteinsfragmente in den untersuchten Sandsteinen	86
5.6 Interpretation der Liefergebietsanalyse nach Dickinson & Suczek (1979)	87
5.6.1 Santa Lucía- und Cayara-Formationen	87
5.6.2 Potoco-Fm.	87
5.6.3 San Vicente-Fm.	89
5.7 Herkunft der tertiären Sedimente im Süd-Altiplano-Becken	91
5.8 Petrofazien der Potoco- und San Vicente-Formationen	93
5.9 Zusammenfassung zur Liefergebietsanalyse	97
<b>6 Absenkungs- und Deformationsgeschichte; Beckenmodell</b>	<b>99</b>
6.1 Deformationsgeschichte	99
6.2 Absenkungsgeschichte	106
6.2.1 Absenkungs- bzw. Hebungsgeschichte der untersuchten Sedimente	109

6.2.2 Vergleich einzelner untersuchter Lokalitäten	111
6.3 Beckenmodell	113
6.4 Diskussion seismischer Linien im Süd-Altiplano-Becken	121
<b>7 Umliegende tertiäre Becken</b>	<b>125</b>
<b>8 Ergebnisse dieser Arbeit und Diskussion</b>	<b>133</b>
8.1 Fazies, Alterstellung, Liefergebiete und Ablagerungsbedingungen	133
8.2 Diskussion	138
8.2.1 Zeitlicher Ablauf der Deformation	138
8.2.2 Subsidenzmechanismen	139
8.2.3 Beckentyp	141
8.2.4 Zentraler Graben und das daraus folgende „intra-arc“-Becken vs. Süd-Altiplano-Vorland-Becken	142
8.2.5 Das Süd-Altiplano-Becken als Teil des Altiplano-Puna-Plateaus	143
8.3 Ausblick	143
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>Anhang</b>	
A Fototafeln und Beschreibung	
B Profile und Lokalitäten	
C Petrografie	
D Liefergebietsanalyse	
E Absenkungsgeschichte	
F Datierungen	
G Geochemische Analyse	
1 Karte	