

2 Stratigrafie der untersuchten Sedimenten im Süd-Altiplano-Becken

2.1 Allgemeines

Die für die Fragestellung dieser Arbeit wichtige paläozäne bis miozäne Schichtenfolge wird in die in Abb. 2.1 aufgelistete Folge gegliedert. Die Formationsfolge überlagert konkordant den Leithorizont der El Molino-Fm. sowie undifferenzierte paläozoische und kretazische Formationen. Im Hangenden der untersuchten Schichtenfolge sind quartäre Ablagerungen aufgeschlossen. Insgesamt erreicht die untersuchte Schichtenfolge Mächtigkeiten von über 7,5 km im zentralen und 5 km im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens. Siliziklastische Gesteine herrschen vor; ab dem Oligozän gibt es zusätzlich Vulkanite, Ignimbrite, vulkanische Brekzien, Tuffe sowie Epiklastite. Karbonate und Evaporite kommen in den untersuchten Sedimenten nur untergeordnet an wenigen Lokalitäten vor. Die Nomenklatur für die Beschreibung der vulkano-klastischen Ablagerungen der San Vicente- und der Chocaya-Formationen richtet sich nach Fisher & Schmincke (1984) bzw. Reading (2002).

Die Einteilung der Formationen folgt im allgemeinen den von Suárez Sorucco (2000) sowie den von YPFB-Santa Cruz (1992) vorgeschlagenen Formationsnamen. Trotzdem wurde es nötig, einige Formationen neu abzugrenzen und neu zu definieren; dies erfolgte entsprechend den Vorschlägen von Amos (1994). Von einer Aufgliederung der San Vicente-Fm., wie von Martínez et al. (1994), Elger (2003) und anderen Autoren vorgeschlagen, wurde abgerückt, da es sich um lateral verzahnte Faziesvariationen handelt. Zusätzlich wurden Sequenzen im Sinne von Amos (1994), die aufgeschlossen zumeist über einer basalen Diskordanz einsetzen, neu definiert. Diese Sequenzen lassen sich gut mit Sequenzen korrelieren, die anhand seismischer Linien interpretiert wurden (Elger 2003).

Paläozoische Gesteine im Untersuchungsgebiet werden durch ordovizische und silurische Sedimente repräsentiert. Untergeordnet kommen devonische Sedimente im Süd-Altiplano-Becken vor. Paläozoische Gesteine sind am Ostrand, entlang der UKFZ und an einem isolierten Aufschluss bei San Pablo de Lipez/Pululus im Südteil des Süd-Altiplano-Beckens aufgeschlossen (Abb. 2.2). Die ordovizischen Sedimente im Westen der Ostkordillere bestehen aus feinkörnigen dunkelgrauen Sandsteinen und Peliten, die eine Mächtigkeit von bis zu 4400 m erreichen können (Egenhoff 2000; Müller 2000). Im Westen des Süd-Altiplano-Beckens dominieren hingegen Pelite dieses Alters; dort kommen nur an der Basis Konglomerate vor (Egenhoff 2000). Entlang der UKFZ sind an mehreren Lokalitäten paläozoische, gut sortierte, feinkörnige, dunkelbraune bis graue Sandsteine aufgeschlossen (Levenhagen 2001). Überlagert werden diese diskordant von kretazischen und tertiären Sedimenten, wobei rezente Ablagerungen und quartäres Lockersediment oft den Kontakt zu den kretazischen und tertiären Sedimenten überdecken.

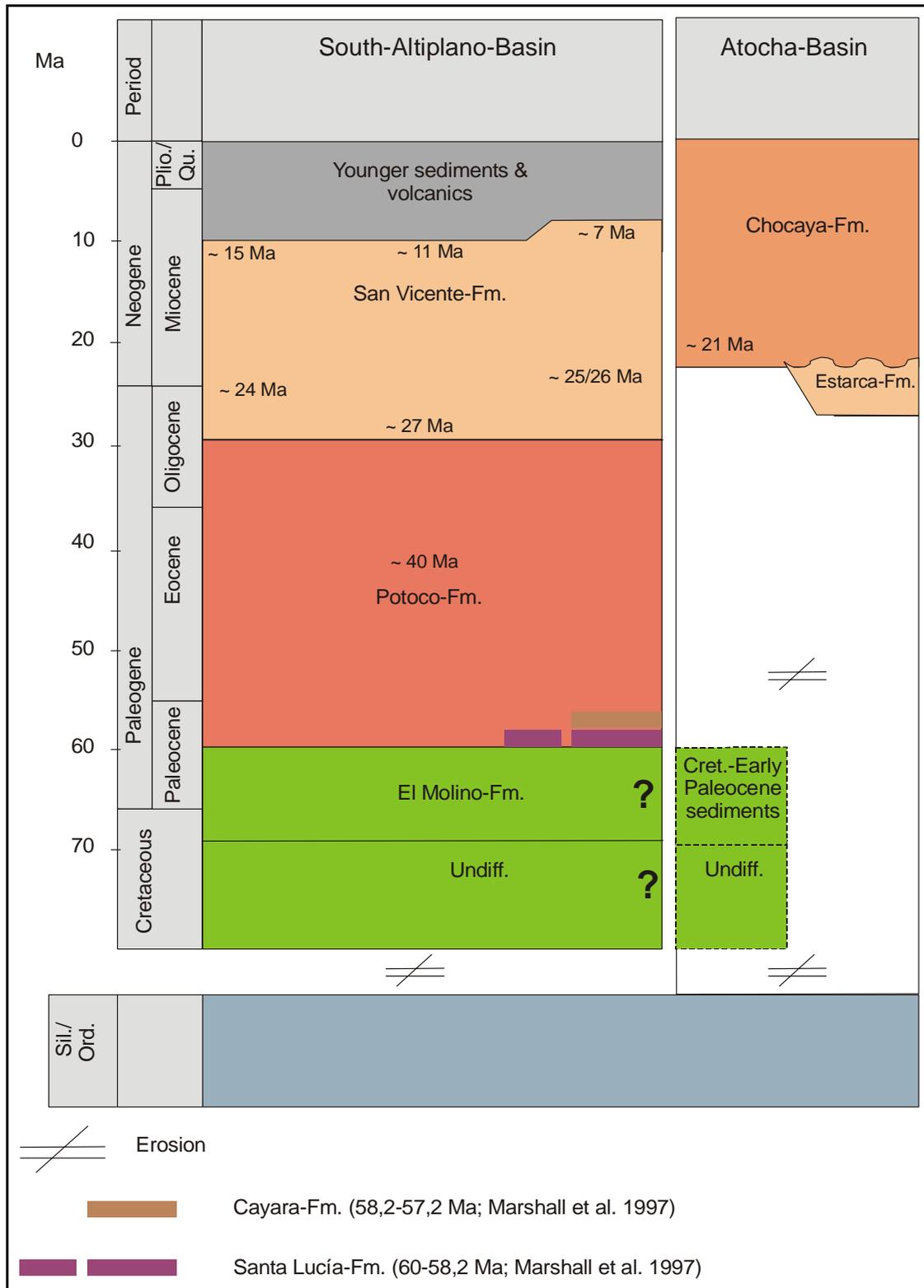


Abb. 2.1 Stratigrafische Tabelle der untersuchten Formationen im Süd-Altiplano-Becken (vergl. Anhang, Datierungstabelle; Sil.: Silurian; Ord.: Ordovician; Plio.: Pliocene; Qu.: Quaternary). Im Süd-Altiplano-Becken sind mögliche Erosionslücken der tertiären und kretazischen Abfolgen nicht dargestellt.

2.2 Kretazische bis paläozäne Sedimente

Kretazische bis altpaläozäne Sedimente sind vorwiegend im Norden bei Chita und nördlich von Atocha, vereinzelt auch entlang der UKFZ, aufgeschlossen (Abb. 2.2).

Die Abfolgen werden der Tarapaya-, der Miraflores-, der Aroifilla-, der Chaunaca-, der Coroma-, und der El Molino-Formation zugeordnet (YFPB 1992; Fiedler 2002). Letztere wird aufgrund ihrer Bedeutung als stratigrafischer Leithorizont gesondert beschrieben.

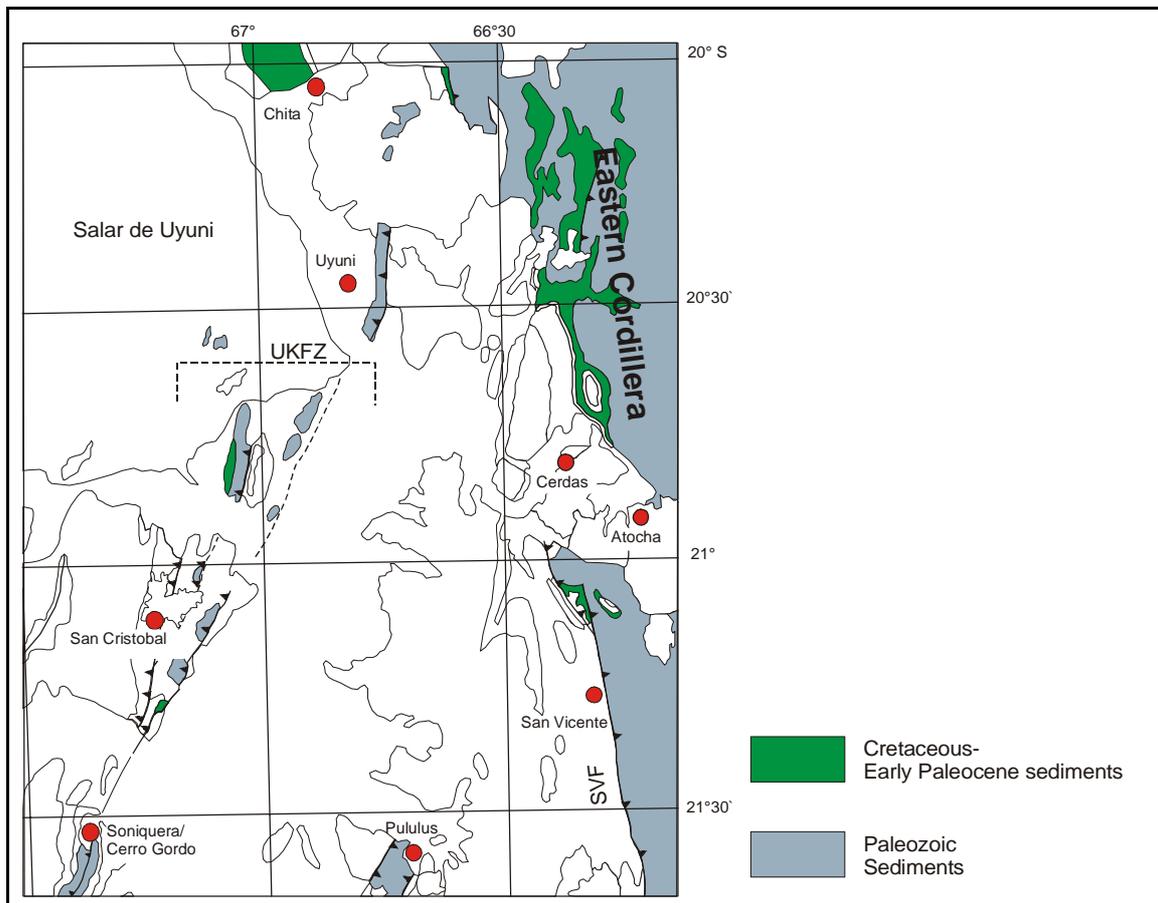


Abb. 2.2 Verbreitung der paläozoischen und kretazischen bis altpaläozänen Sedimente im Süd-Altiplano-Becken (UKFZ: Uyuni-Khenayani-Fault-Zone).

El Molino-Fm.

Die El Molino-Fm. des Maastricht bis Altpaläozän besteht aus einer Wechselfolge von feinkörnigen braunroten Sandsteinen, rotviolettten Siltsteinen, Mergeln, Tonmergeln und hellbraunen Karbonaten. Sie ist im gesamten Süd-Altiplano-Becken abgelagert, bei späteren Ereignissen jedoch teilweise erodiert worden. Einzelne Karbonathorizonte haben eine Mächtigkeit von etwa 30 cm. Die El Molino-Fm. bildet die letzte marine Abfolge im Süd-Altiplano-Becken und in der Ostkordillere (Marshall et al. 1997; Sempere et al. 1997), obwohl Fiedler (2002) nur von einem zeitweilig marinen Ablagerungsraum spricht. Der oberste aufgeschlossene Karbonathorizont der El Molino-Fm. diente als Basis für die stratigrafischen Profile dieser Arbeit. Der Ablagerungsraum der Oolithe, Biolithite (*Pucalithus*) und Bioklastkalke der El Molino-Fm. war zumindest zeitweise marin, wenn auch extremes Flachwasser um Paläo-Normal Null angenommen werden muss. Insofern stellen die Gesteine einen

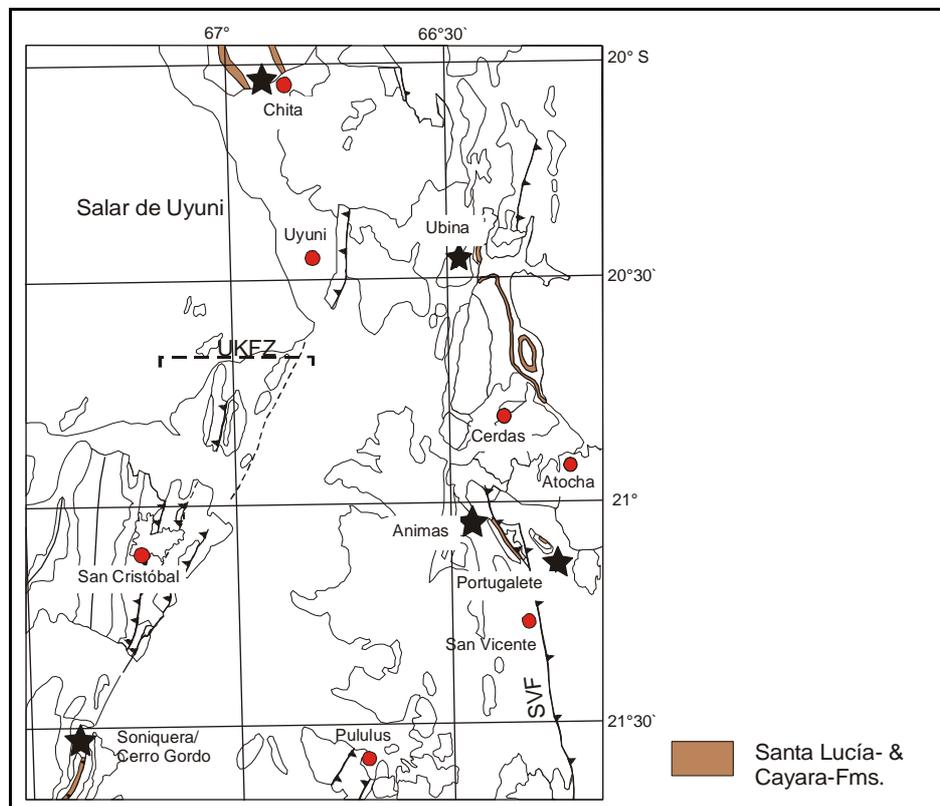
verlässlichen Paläohöhenindikator dar, der zudem zeitlich relativ gut eingegrenzt ist. Sempere et al. (1997) datierten die Basis der El Molino-Fm. mit $71,6 \pm 0,22$ Ma und $72,3 \pm 0,15$ Ma (Tuffe, Ar/Ar); sie gaben das Ende der Ablagerung mit 60,5 Ma an. Die hangenden Karbonate der El Molino-Fm. eigneten sich also als Bezugsniveau der Profilaufnahmen und stellen somit die unmittelbaren Liegendschichten dar (vergl. Abb. Profile).

2.3 Santa Lucía-Fm.

Die Typlokalität der Santa Lucía-Fm. liegt in der Miraflores-Synklinale in der Ostkordillere, etwa 12 km WNW von Potosí entfernt. Die Gesteine der Santa Lucía-Fm. wurden erstmals von Dereims (1906) und Schlaginweit (1943) beschrieben. Ihre stratigrafische Einordnung erfolgte sodann durch Lohmann & Branisa (1962). Sowohl der Basiskontakt mit der El Molino-Fm. wie auch der Kontakt am Top zu jüngeren Sedimenten ist konkordant (Schlaginweit 1943). Der Ablagerungsbeginn der Santa Lucía-Fm. wird von Sempere et al. (1997) mit 60,5 Ma. und das Ablagerungsende mit 58,2 Ma angegeben.

Lithologie (Fotos A1 und A2, Fototafel 1 im Anhang)

Die Santa Lucía-Fm. ist deutlich entlang des gesamten Ostrand des Süd-Altiplano-Beckens zu verfolgen; sie wurde im gesamten Becken sedimentiert, jedoch bei späteren Ereignissen lokal erodiert. Im Süd-Altiplano-Becken finden sich Vorkommen bei Chita und Soniquera (Abb. 2.3). Die Santa Lucía-Fm. ist aufgrund ihrer rotviolettten Farbe und der Vorherrschaft feinkörniger siliziklastischer Sedimente deutlich von älteren Sedimenten unterscheidbar.



vorherige Seite **Abb. 2.3** Verbreitung der Santa Lucía- und Cayara-Formationen im Süd-Altiplano-Becken. Die Sterne in der Karte zeigen die Profillokalitäten an, an denen die Santa Lucía- und Cayara-Formationen aufgenommen wurden (UKFZ: Uyuni-Khenayani-Fault-Zone).

Im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens beginnt die Santa Lucía-Fm. mit roten bis violetten Siltsteinen. Darin sind geringmächtige, gut sortierte, feinkörnige Sandsteine eingelagert. Die Sandsteinhorizonte sind 10 bis 15 cm mächtig. Oft ist eine kleinräumige Schrägschichtung erkennbar. Der Verfestigungsgrad der Sandsteine ist gering.

Die Siltsteine lassen keine interne Schichtung erkennen. In der Regel beträgt die Mächtigkeit der Siltsteine 2 bis 3 m und ist damit größer als die der Sandsteine. Lokal treten in den südlichen Profillokalitäten Animas und Atocha Konglomerathorizonte auf. Diese Konglomerathorizonte haben eine Mächtigkeit von etwa 10 cm und gehen in grobkörnige Sandsteine über. Die Konglomerate sind klastengestützt und haben eine gute Sortierung. Die gut gerundeten Klasten bestehen aus paläozoischen Sedimenten und haben eine Größe von 0,5 bis 1 cm im Durchmesser. Gelegentlich gibt es hellgraue Karbonathorizonte, etwa 5 cm mächtig, die sich aber im Streichen nicht weit verfolgen lassen.

Fossilien sind selten. Gastropoden wurden in Karbonaten der Santa Lucía-Fm. nur bei Chita gefunden. An einigen Stellen sind Grabsuren in den Sandsteinhorizonten zu finden. Die Mächtigkeit der Santa Lucía-Fm. bei Chita beträgt 510 m, bei Ubina und weiter südlich beträgt die Mächtigkeit kaum mehr als 10 m.

2.4 Cayara-Fm.

Die Cayara-Fm. wurde von Lohmann & Branisa (1962) erstmals stratigrafisch eingeordnet. Lohmann & Branisa (1962) nannten die Sedimente, die bereits Schlaginweit (1943) bearbeitet und informell Einheit Nr. 8 genannt hatte, Cayara-Fm..

Die Typlokalität liegt in der Ostkordillere in der Miraflores-Synklinale, etwa 13 km WNW von Potosí entfernt. An dieser Lokalität lagert die Cayara-Fm. konkordant über der Santa Lucía-Fm.; über der Cayara-Fm. folgen diskordant jüngere Sedimente der Potoco-Fm. (Lohmann & Branisa 1962). Bei Miraflores besteht die Cayara-Fm. aus Tonsteinen, feinkörnigen Sandsteinen und Siltsteinen (Lohmann & Branisa 1962). Nach Sempere et al. (1997) lagert an einigen Lokalitäten im SE-Altiplano-Becken und nordwestlich von Potosí die Cayara-Fm. mit einer Winkeldiskordanz über ordovizischen Gesteinen, was aber durch diese Arbeit nicht generell bestätigt werden konnte. Die Mächtigkeit der Cayara-Fm. reicht von einigen Metern bis mehr als 150 m (Sempere et al. 1997). Das Alter der Cayara-Fm. muss als diachron betrachtet werden (Sempere et al. 1997), obwohl Sempere et al. (1997) für den Sedimentationsbeginn ein Alter von 58,2 Ma angaben. Bei Esmoraca lagert die Cayara-Fm. diskordant über der Santa Lucía-Fm. (Fiedler 2002).

Lithologie (Fotos B1 und B2, Fototafel 1 im Anhang)

An der östlichen Grenze des Süd-Altiplano-Beckens ist die Cayara-Fm. zwischen Chita im Norden und Atocha weiter südlich aufgeschlossen (Abb. 2.3). Im Süd-Altiplano-Becken ist der Basiskontakt mit der Santa Lucía-Fm. konkordant, ebenso der Kontakt am Top zu den hangenden Sedimenten der

Potoco-Fm. (Tab. 2.1). Die Cayara-Fm. stellt einen sehr guten Leithorizont dar, durch welchen die feinkörnigen Sand- und Siltsteine der Santa Lucía-Fm. von den feinkörnigen Sedimenten der Potoco-Fm. getrennt werden können. Die Cayara-Fm. bildet im Gelände häufig eine morphologische Schichtrippe.

Bei Chita sind an der Basis matrixgestützte Konglomerate, etwa 30 cm mächtig, in den selten Bruchstücken von Wirbeltierknochen vorkommen, aufgeschlossen. Die Klasten aus paläozoischen Sedimenten sind gut bis sehr gut gerundet.

Lokalität	Mächtigkeit	Basiskontakt	Kontakt am Top
Chita, Ubina, Animas	5 m	Santa Lucía-Fm.	Potoco-Fm.
Cerro Gordo (Soniquera)	7 m	Störungskontakt	Potoco-Fm.

Tab. 2.1 Mächtigkeiten der Cayara-Fm..

Die Matrix selbst besteht aus hellbraunen bis dunkelbraunen Sandsteinen von mittlerer Korngröße. Über dem Basiskonglomerat folgt eine etwa 4,5 m bis 6 m mächtige, hellbraune, sehr harte Sandsteinbank. Der Übergang vom Basiskonglomerat zum Sandstein ist graduell. Letzterer zeigt Schrägschichtung, im höheren Teil Rippeln. Der Sandstein ist gut verfestigt, sehr gut sortiert und mittel- bis grobkörnig.

Weiter im Süden, bei Ubina und bei Animas, ist an der Basis der Cayara-Fm. ebenfalls ein matrixgestütztes Konglomerat aufgeschlossen. Die Klasten dieses Konglomerates haben einen Durchmesser von etwa 1 cm bis 2 cm. Ihre Matrix besteht aus sehr dunklem, fein- bis mittelkörnigem Sandstein.

Bei Cerro Gordo sind 7 m der Cayara-Fm. aufgeschlossen, davon an der Basis 2 m matrixgestützte Konglomerate. Die Klasten bestehen aus gerundeten Milchquarzen, die Matrix aus einem hellbraunen Sandstein. Über dem Basiskonglomerat folgen dickbankige, harte Sandsteine. Zunächst grobkörnig, wird er nach oben feinkörniger. Sedimentstrukturen umfassen trogförmige Schrägschichtung und Rippeln.

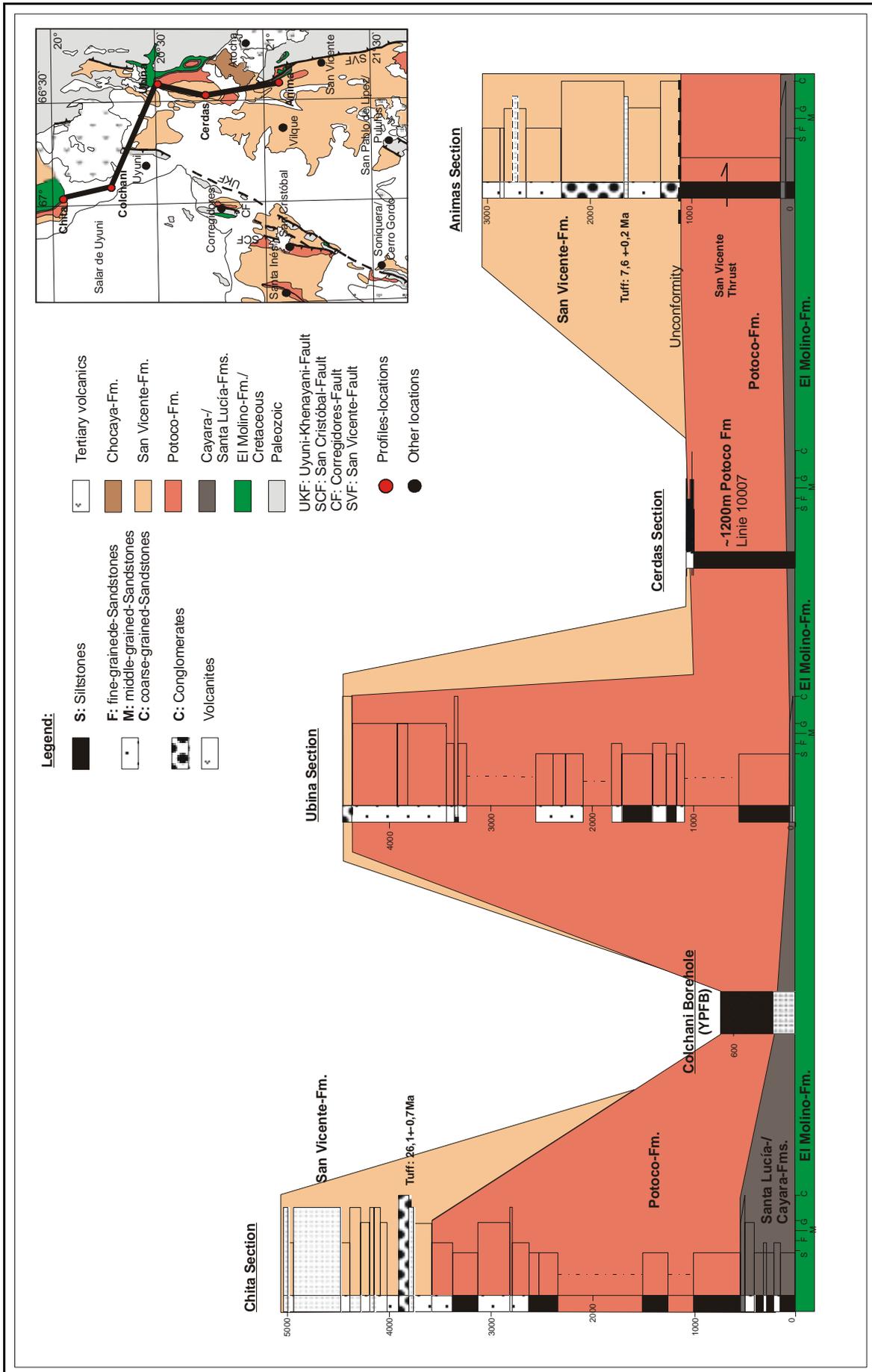
2.5 Potoco-Fm.

Die Potoco-Fm. ist im gesamten Altiplano-Becken Südbolivians abgelagert worden, bei späteren tektonischen Ereignissen wurde sie jedoch teilweise oder sogar vollständig erodiert (diese Arbeit; Jarandilla 1988; Horton et al. 2001). Erstmals erwähnt und beschrieben wurde die Potoco-Fm. von Pérez-Mendiesá (1963). Die Typlokalität liegt bei der Ortschaft Potoco, Provinz Ladislao Cabrera, Oruro. Dort wurde eine Mächtigkeit von 6500 m beschrieben. Der Basiskontakt ist nach Fernández et al. (1972) konkordant zur Cayara-Fm. Zeitlich zugeordnet wurde die Potoco-Fm. dem oberen Paläozän bis Eozän (Fernández et al. 1972).

Jarandilla (1988) gibt bei Chita für die Potoco-Fm. eine Mächtigkeit von 2781 m und bei Corregidores von mehr als 100 m. In der Kartierung von Almendras et al. (1997), im Gebiet San Agustín/Volcán Ollague (westlicher Altiplano) wird ein gradueller lithologischer Übergang der Potoco-Fm. zur San Vicente-Fm. beschrieben. Dort treten etwa 500 m Sandsteine der Potoco-Fm. auf.

An der argentinischen Grenze lagert die Potoco-Fm. winkeldiskordant direkt über ordovizischen Gesteinen (García et al. 1997). Neuere Arbeiten in der Corque-Synklinale (zentrales Altiplano-Becken) geben für die Huayllamarca-Fm., Äquivalent der Potoco-Fm., Mächtigkeiten von ~ 6000 m an (Horton et al. 2001; Hampton 2002). Nach Horton et al. (2001) beginnt die Ablagerung der Potoco-Fm. und ihrer Äquivalente im mittleren- bis späten Paläozän, als Ablagerungsende gibt er frühes Miozän an.

nächste Seite **Abb. 2.4** Korrelation der Profile im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens entlang einer N-S-Traverse. Auffällig ist die Mächtigkeitsabnahme der Santa Lucía-, Cayara- und Potoco-Formationen von Nord nach Süd. Die Basis der Profile bildet die kretazische/paläozäne El Molino-Fm.. An der Bohrung Colchani bildet die Potoco-Fm. das heutige Erosionsniveau, es kann deshalb angenommen werden, dass bei Colchani die Potoco-Fm. mit ähnlicher Mächtigkeit wie bei Chita und Ubina abgelagert wurde und dieser Teil der Potoco-Fm. zusammen mit der folgenden San Vicente-Fm. später erodiert wurden.



Obwohl die Typlokalität der Potoco-Fm. im zentralen Altiplano-Becken liegt, wird von einigen Autoren die Potoco-Fm. auch in den intramontanen Becken der Ostkordillere beschrieben (Sempere et al. 1997; Marshall et al. 1997). In dieser Arbeit wird die Bezeichnung Potoco-Fm. nur für die Sedimente innerhalb des Altiplano-Beckens benutzt. Die Ablagerungen in den intramontanen Becken der Ostkordillere zählen nach Horton (1998 & 1999) nicht zur Potoco-Fm.. Wie weit die Ablagerung der Potoco-Fm. nach Osten in die heutige Ostkordillere reichte, wird im Gelände nicht deutlich, da die Sedimente zum Großteil erodiert wurden. Allerdings existiert ein isolierter Aufschluß der Potoco-Fm., nördlich der Ortschaft San Vicente, etwa 15 km innerhalb der Ostkordillere. Daher kann angenommen werden, dass die Potoco-Fm. mindestens um diesen Betrag weit in der westlichen Ostkordillere abgelagert wurde.

2.5.1 Lithologie (Fotos siehe Fototafeln 1 und 2 im Anhang)

Die Potoco Fm. wurde an mehreren Lokalitäten im Süd-Altiplano-Becken bearbeitet (Abb. 2.4 und 2.5). Sie lagert im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens konkordant über der Cayara-Fm. (Tab. 2.2). Im Zentrum und im Westen des Süd-Altiplano-Beckens ist die Basis der Potoco-Fm. nicht aufgeschlossen. Bei Cerro Gordo wird die Cayara-Fm. konkordant von der Potoco-Fm. überlagert. An zwei Lokalitäten, bei San Cristóbal und Corregidores, sind in der Potoco-Fm. Tuffe eingeschaltet.

Die Potoco-Fm. zeigt bei Ubina und Chita eine charakteristische Abfolge von 5 Einheiten. Diese unterscheiden sich in ihren Sedimenteigenschaften, ihrer Zusammensetzung und ihren Sedimentstrukturen. Insgesamt zeigt die Potoco-Fm. ostwärts eine deutliche „thickening- und coarsening-upward“-Sequenz. Die Basis der Potoco-Fm. beginnt in der ersten Einheit mit Siltsteinen, gefolgt von einer Wechsellagerung von gleichmächtigen Silt- und Sandsteinen der zweiten Einheit. In der dritten Einheit sind isolierte, linsenförmige Sandsteine in Siltsteine eingelagert. In der vierten Einheit folgen bankige, konglomeratführende Sandsteine und in der letzten und fünften Einheit treten in Sandsteine eingebettete Konglomeratlinsen auf. Südlich von Atocha ist heute nur die Basis (Einheit 1) der Potoco-Fm. aufgeschlossen.

Bei San Cristóbal, Santa Inés und Cerro Gordo sind diese 5 Einheiten nicht vorhanden. Es ist nur eine Abfolge aus Siltsteinen mit geringmächtigen Sandsteinhorizonten erschlossen. Es ist wohl eine distale Fazies der Sedimente vom Ostrand des Süd-Altiplano-Beckens. Im Nordosten, bei Chita, sind in der Potoco-Fm. vulkanische Gänge und Sills intrudiert. Diese Intrusionen sind zwischen 0,5 und 5 m mächtig. Die vulkanischen Intrusionen sind andesitisch mit Hornblende- und Plagioklas-Einsprenglingen. Am Rand der Gänge sind Abkühlungserscheinungen zu beobachten; die am Kontakt betroffene Potoco-Fm. ist kontaktmetamorph überprägt. Eine Datierung an den Hornblenden zeigt ein Alter von $25,6 \pm 0,9$ Ma. Die im Aufschluß vertikal einfallenden Gängen streichen mit 10° und deuten damit auf Extension in Ost-West-Richtung.

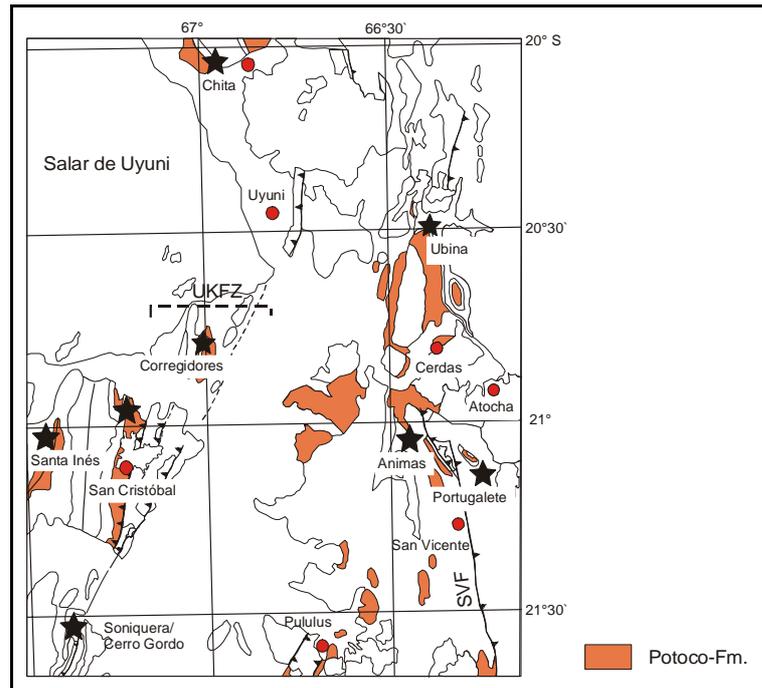


Abb. 2.5 Verbreitung der Potoco-Fm. im Süd-Altiplano-Becken. Die Sterne in der Karte zeigen die Profillokalitäten an, an denen die Potoco-Fm. aufgenommen wurde (UKFZ: Uyuni-Khenayani-Fault-Zone).

Lokalität	Mächtigkeit	Abfolge/Sedimente
Chita	~3000 m, Top: San Vicente-Fm. Basis: Cayara-Fm.	„coarsening-upward“-Sequenz Siltstein-Konglomerat
Ubina	~4500 m Top: San Vicente-Fm. Basis: Cayara-Fm.	„coarsening-upward“-Sequenz Siltstein-Konglomerat
San Cristóbal	~4600 m Top: San Vicente-Fm. Basis: Störungskontakt	überwiegend Siltsteine, geringmächtige feinkörnige Sandsteineinschaltungen
Cerro Gordo	~900 m Top: San Vicente-Fm. Basis: Cayara-Fm.	Siltsteine, geringmächtige Sandsteinhorizonte
Chiquichambi ¹ (nördl. Altiplano)	~6500 m, Top: heutiges Erosionsniveau Basis: Santa Lucía-Fm. (Cayara-Fm. inclusiv)	„coarsening-upward“-Sequenz Siltstein-Konglomerat
Julchi ¹	~2500 m, Top: Tambillo Fm. (Äquivalent mit der San Vicente-Fm.) Basis: Santa Lucía-Fm. (Cayara-Fm. inclusiv)	Feinkörnige Sedimente, Wechselagerung Siltstein-Sandstein
Maicoma ²	~2370 m, Top: heutiges Erosionsniveau Basis: Santa Lucía-Fm. (Cayara-Fm. inclusiv)	Feinkörnige Sedimente, Wechselagerung Siltstein-Sandstein
Südl. Sevaruyo ²	~5000 m	Siltstein-Sandstein

Tab. 2.2 Profillokalitäten mit ungestörter Potoco-Fm. im Altiplano-Becken (¹ Horton et al. 2001; ² Jarandilla 1988).

2.5.2 Abfolge der Potoco-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens

Erste Einheit (Foto C1, Fototafel 1 im Anhang)

In dieser ersten Einheit treten besonders rote bis violette Siltsteine, in die geringmächtige, rote bis violette Sandsteinhorizonte eingeschaltet sind, auf. Diese Einheit ist bei Chita 2000 m mächtig. Die Siltsteine sind kaum verfestigt, strukturlos und massig. An der Basis sind die Sandsteinhorizonte in der Regel 5 bis 20 cm mächtig. Einzelne Sandsteinhorizonte erreichen selten Mächtigkeiten von bis zu 1,5 m. Die Sandsteine sind laminiert, schräggeschichtet oder zeigen Rippeln. Einzelne massige Sandsteinhorizonte sind vorhanden. Die meisten Sandsteinhorizonte lassen sich sehr weit im Streichen verfolgen. Es sind aber auch gelegentlich linsenförmige Sandsteinkörper vorhanden. In den Sandsteinen zeigen sich Grabspuren von Kleinlebewesen, Spuren von Krebsen und Trockenrisse. Karbonatkonkretionen, in Horizonten angeordnet, wurden als fossile Bodenhorizonte interpretiert, ebenso wie grüne bis blaue Pelit-„Flecken“. An der Unterseite einiger Sandsteinhorizonte sind Kolkmarken und aufgearbeitete Gerölle von Siltsteinen aufgeschlossen.

Evaporite sind im Osten erbohrt worden (Welsink et al. 1995). Bei Vilque lagern Evaporite, etwa 600 m mächtig, zwischen der Potoco-Fm. und der San Vicente-Fm. (Welsink et al. 1995). Sie bilden einen Diapir. Erschlossen sind Evaporite im östlichen Süd-Altiplano-Becken nicht.

Zweite Einheit (Foto C2, Fototafel 1 im Anhang)

Die zweite Einheit der Potoco-Fm. wird bei Ubina 1000 m bei Chita 700 m mächtig. Diese besteht aus einer Wechsellagerung von Siltsteinen und Sandsteinen. Die Siltsteine sind kaum verfestigt. Ihre Eigenschaften ändern sich im Vergleich zur ersten Einheit nicht. Die Sandsteine sind gut verfestigt und rot-violett. Die Silt- und Sandsteinhorizonte sind jeweils etwa 5 bis 7 m mächtig. Seltener kommen Mächtigkeiten in den Siltsteinlagen von bis zu 50 m vor. An der Basis haben die Sandsteine oft einen Aufarbeitungshorizont aus Siltsteinklasten mit einem Durchmesser von etwa 5 cm. Als Sohlmarken sind Schleifspuren aufgeschlossen. Über diesen Aufarbeitungshorizonten folgen mittel- bis feinkörnige Sandsteine. Stellenweise ist eine Gradierung vorhanden, ebenso Schrägschichtung, seltener Rippeln. Die Schrägschichtung kann in eine Lamination übergehen. Die einzelnen Sandsteinhorizonte lassen sich sehr weit im Streichen verfolgen. An ihrer Oberseite finden sich Trockenrisse und Spuren von Krebsen. Die Anwesenheit von Karbonatknollen im oberen Bereich der Sandsteine gibt Hinweise auf fossile Böden. Sehr selten kommen Sandsteinlinsen in dieser Einheit vor. Sie haben eine Mächtigkeit von 2 bis 2,5 m und eine Länge von max. 5 m.

Dritte Einheit (Foto C5, Fototafel 2 im Anhang)

Die dritte Einheit ist bei Ubina etwa 1200 m und bei Chita etwa 600 m mächtig. Rote bis violette Sandsteinlinsen sind isoliert in Siltsteinen eingebettet. Die räumliche Ausdehnung dieser Sandsteinlinsen beträgt etwa 3 m Höhe und bis 15 m Länge. Die Sandsteinlinsen zeichnen sich durch eine Kornverfeinerungsabfolge aus. An der Basis befindet sich ein Aufarbeitungshorizont mit Siltsteinklasten. Die einzelnen Klasten haben einen Durchmesser von etwa 5 cm. Darüber folgt ein grobkörniger Sandstein, der graduell in einen mittel- bis feinkörnigen Sandstein übergeht. Die Sandsteinlinsen zeigen eine trogförmige Schrägschichtung. Die Siltsteine sind rot bis violett.

Vierte Einheit (Fotos C6 und C7, Fototafel 2 im Anhang)

Zu dieser Einheit gehören massige, hellbraune, schlecht sortierte konglomeratische Sandsteine. Die einzelnen Klasten bestehen aus paläozoischen Sedimenten. Siltsteine sind nur ein untergeordneter Bestandteil dieser Einheit. Sie keilen auf kurzer Distanz aus. Die gutgebankten Sandsteinhorizonte sind sehr weit zu verfolgen. Die Unterseite der Sandsteinhorizonte ist wellig. Schleifspuren sind vorhanden. Zwischen den konglomeratischen Sandsteinhorizonten sind selten Konglomeratbänke eingeschaltet. Diese Konglomeratbänke sind matrixgestützt und die einzelnen Klasten bestehen aus paläozoischen Gesteinen. Die gut gerundeten und sortierten Gerölle haben einen Durchmesser von etwa 5 cm. Die Mächtigkeit dieser Konglomerathorizonte liegt bei 0,5 m. Eine Kornverfeinerungsabfolge ist erkennbar. Die Konglomeratbänke gehen graduell in die konglomeratischen Sandsteine über. Die konglomeratischen Sandsteine und die Konglomerathorizonte sind deutlich besser verfestigt als die beschriebenen Sedimente in den unteren Einheiten. Die Mächtigkeit dieser Abfolge liegt bei etwa 1200 m, aufgeschlossen ist diese Einheit bei Chita und Ubina.

Fünfte Einheit (Fotos C8 und C7, Fototafel 2 im Anhang)

Diese fünfte Einheit besteht aus Konglomeratlinsen, die in konglomeratische Sandsteine eingebettet sind. Die konglomeratischen Sandsteine unterscheiden sich nicht von den oben beschriebenen Sedimenten der vierten Einheit. Die Konglomeratlinsen sind etwa 3 m mächtig und etwa 10 m breit. Intern zeigen diese Konglomerate eine trogförmige Schrägschichtung. Die Klasten bestehen aus paläozoischen Sedimenten, sie sind gut gerundet und gut sortiert. Die Unterseite der Linsen ist geradlinig konkav. Die Linsen sind symmetrisch und der obere Kontakt zu den konglomeratischen Sandsteinen ist weniger deutlich. Die Farbe der Konglomeratlinsen ist hellbraun bis beige.

Vereinzelt treten Siltsteinlinsen auf. Diese Linsen keilen nach kurzer Distanz aus. Die gesamte Einheit hat eine Mächtigkeit von etwa 400 m. Der Übergang zur folgenden San Vicente-Fm. ist graduell und konkordant.

2.5.3 Abfolge der Potoco-Fm. im zentralen und SW-Teil des Süd-Altiplano-Beckens (Fotos C3 und C4, Fototafel 1 im Anhang)

Die Potoco-Fm. wurde im gesamten zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens sedimentiert, bei späteren tektonischen Ereignissen jedoch lokal teilweise oder sogar vollständig erodiert. Sie ist im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens, bei San Cristóbal, 4500 m mächtig (Abb. 2.6 und 2.7). Die Basis ist nicht aufgeschlossen, da ein Störungskontakt vorliegt. An der Basis ist ein feinkörniger, nicht datierbarer Tuff eingeschaltet. Der basale Teil der Potoco-Fm. besteht aus Siltsteinen und untergeordnet auftretenden Feinsandsteinen. Die Sandsteine zeigen Rippelschichtung und Trockenrisse. Karbonatkonkretionen und grüne- bis blaue Siltsteine in der basalen Potoco-Fm. geben Hinweise auf Paläoböden. Selten sind kubische Salzpseudomorphosen erkennbar. Aufgrund ihrer Charakteristiken wird dieser basale Teil zum Paläozän gerechnet.

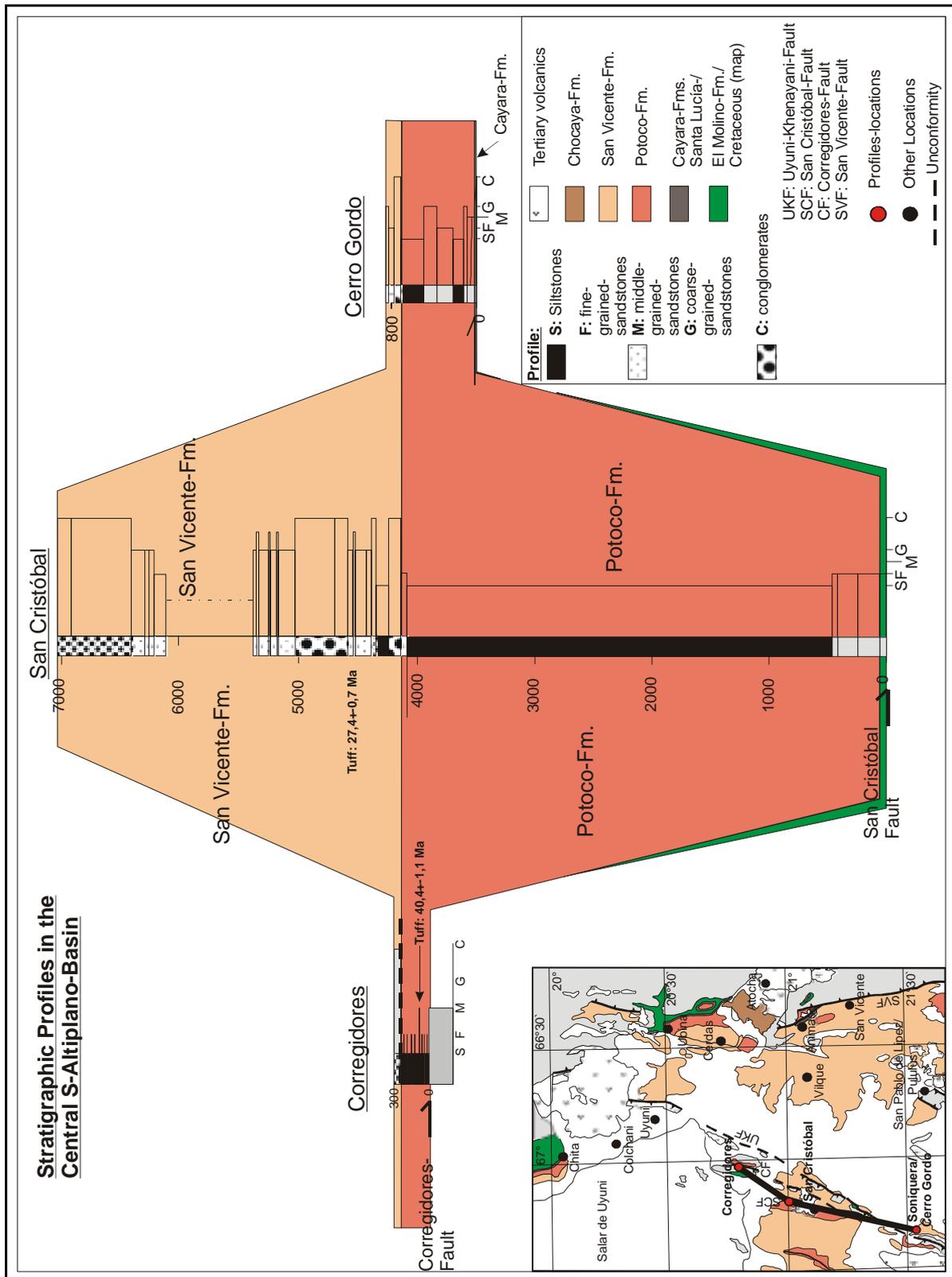


Abb. 2.6 Korrelation der Potoco-Fm. entlang einer N-S-Traverse im zentralen Süd-Altiplano-Becken. Als Referenzniveau wurde die Grenze zwischen der Potoco- und San Vicente-Formationen gewählt. Der Mächtigkeitsunterschied zwischen Corregidores und San Cristóbal beruht auf einem Störungskontakt der paläozoischen Sedimente über der Potoco-Fm. bei Corregidores. Dagegen liegt die Ursache des Mächtigkeitsunterschiedes der Potoco-Fm. zwischen San Cristóbal und Cerro Gordo auf unterschiedlichen Beckentiefen.

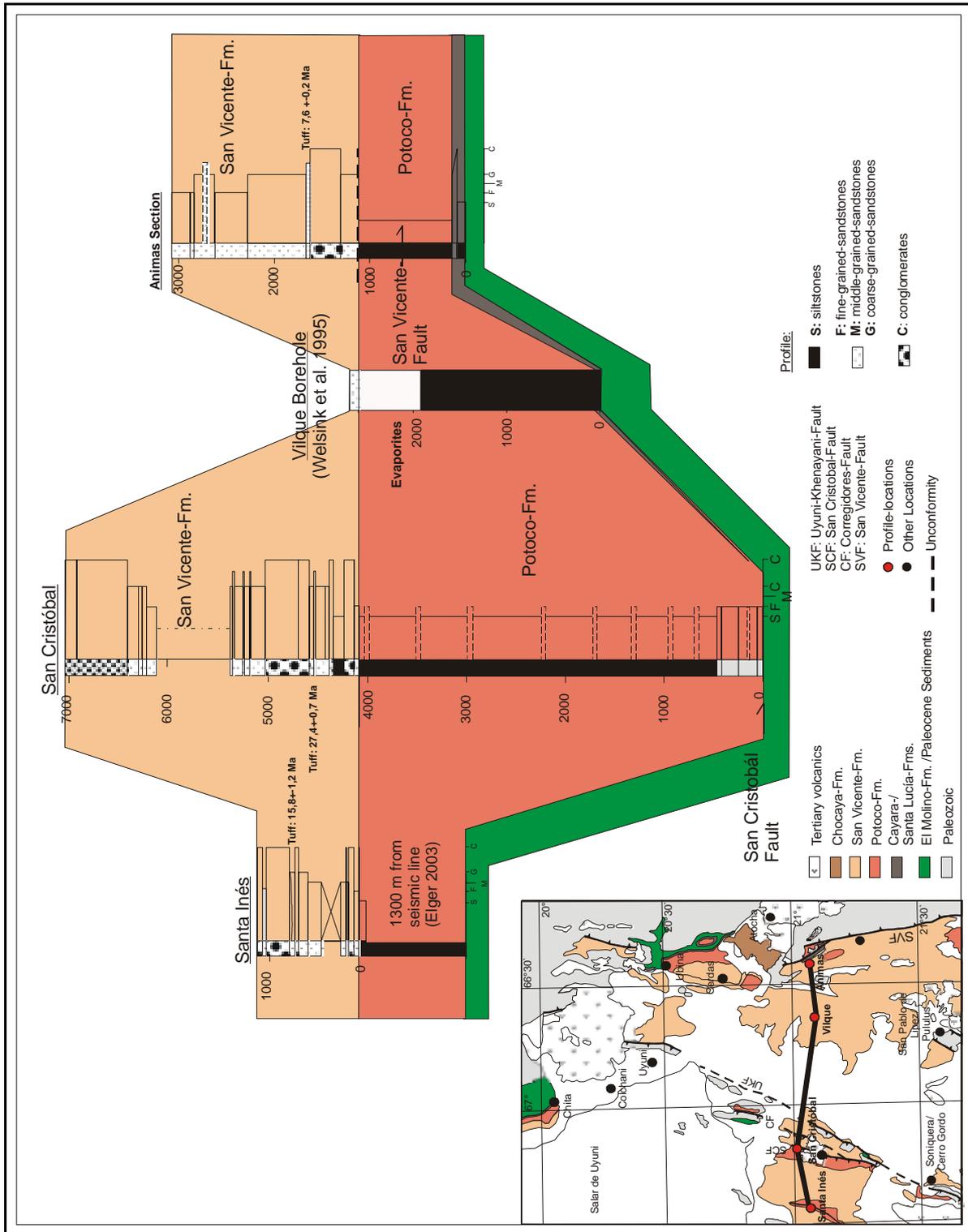


Abb. 2.7 Korrelation der Profile entlang 21° S in einer EW-Traverse. Deutlich tritt die Mächtigkeitsvariation der Potoco-Fm. hervor. Als Basis für die Profile diente die El Molino-Fm. Bei Animas und Vilque ist die El Molino-Fm. aufgeschlossen bzw. erbohrt. Bei San Cristóbal sind an der Basis der Potoco-Fm. paläozäne Sedimente aufgeschlossen. Bei Santa Inés wurde die El Molino-Fm. und damit die Mächtigkeit der Potoco-Fm. aus der Interpretation seismischer Linien korreliert (Elger 2003).

Über diesen feinkörnigen Sedimenten folgen mittel- bis grobkörnige Sandsteine mit einer Bankdicke von etwa 2 bis 2,5 m. In der Regel sind diese Sandsteine strukturlos, untergeordnet ist jedoch eine trogförmige Schrägschichtung erkennbar, die in Rippelschichtung übergeht. Über den Sandsteinen folgen etwa 4000 m rot-violette Siltsteine, die gelegentlich von geringmächtigen, laminierten Wechsellagerungen aus Silt- und Feinsandstein unterbrochen werden. Selten ist in den Sandsteinen Schrägschichtung oder Rippelschichtung entwickelt. Die gesamte Abfolge ist gering verfestigt. Am Top der Potoco-Fm. sind etwa 10 m gröbere Sedimente aufgeschlossen. Gerölle aus dem Paläozoikum sind in einer Sandsteinmatrix aufgearbeitet. Diese weisen auf eine Aufarbeitungszone hin. Die Potoco-Fm. geht konkordant in die San Vicente-Fm. über.

Bei Corregidores (Abb. 2.6), im zentralen Süd-Altiplano-Becken, sind etwa 200 m Siltsteine der Potoco-Fm. aufgeschlossen. Diese Abfolge wird an der Basis durch die Corregidores-Störung unterbrochen. Am Top dieser Abfolge lagern diskordant jüngere Sedimente über der Potoco-Fm.. In die Siltsteine sind einige geringmächtige Tuffbänder eingeschaltet. Das Alter eines feinkörnigen Tuffes beträgt $40,4 \pm 1,1$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar).

Bei Santa Inés sind etwa 200 m der Potoco-Fm. aufgeschlossen. Der Kontakt am Top ist konkordant. Die Potoco-Fm. besteht auch hier größtenteils aus Siltstein, der lokal schlecht erhaltene Pflanzenreste enthält. Nach oben nimmt der Anteil an Sandsteinen zu. Da auch Evaporite vorhanden sind, kommt es zu Diapirismus.

Ähnlich wie bei Chita sind bei Santa Inés in der Potoco-Fm. andesitische Intrusionen vorhanden, die sowohl schichtparallel wie auch quer zur Schichtung eingeschaltet sind. Eine Datierung ergab ein Alter von $24,7 \pm 0,6$ Ma (Gesamtgesteinsalter), damit ähnlich wie die Intrusionen bei Chita. Am Kontakt zu den Intrusionen sind die Sedimente der Potoco-Fm. kontaktmetamorph überprägt.

2.5.4 Alter der Potoco-Fm.

Eine zeitliche Einordnung ist mit nur einer Datierung innerhalb der Potoco-Fm. ($40,4 \pm 1,1$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar)) nur begrenzt möglich. Die Potoco-Fm. wurde ab $\sim 57,8$ Ma abgelagert (Top der Cayara-Fm., Marshall et al. 1997). Allerdings ist zu beachten, dass die Datierung der Cayara-Fm. in der Ostkordillere gemacht wurde und dass die Autoren dieser Datierung selbst eine diachrone Ablagerung der Cayara-Fm. annehmen (Sempere et al. 1997; Marshall et al. 1997). Trotzdem wird dieses Alter, als einzige bisher existierende Datierung, als Richtwert für die Basis der Potoco-Fm. genutzt. Das Ende der Potoco-Fm.-Sedimentation ergibt sich dort, wo die Gesamtmächtigkeit und ein kondordanter Kontakt mit überlagernden Sedimente erhalten ist (bei San Cristóbal und Chita), aus der datierten basalen San Vicente-Fm. ($27,4 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar) bzw. $26,1 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar)).

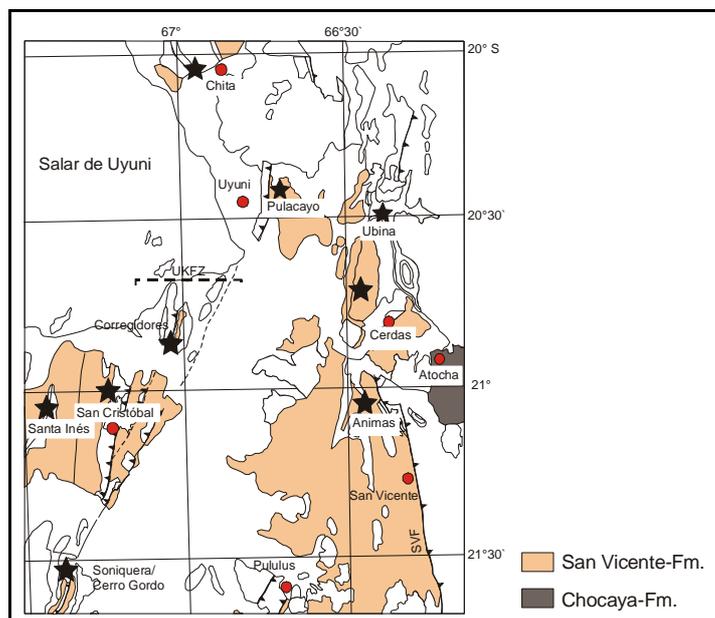
2.6 San Vicente-Fm.

Die San Vicente-Fm. wurde als Formation erstmals von Ahlfeld & Schneider-Scherbina (1964) beschrieben. Die Typlokalität liegt am Cerro San Vicente, etwa 100 km SSE von Uyuni, an der Eisenbahnlinie Uyuni-Villazón, Provinz Sud Chichas, Potosí. Bei der Ortschaft San Vicente waren

bereits zuvor die San Vicente-Konglomerate beschrieben worden (Ahlfeld 1952). Diese San Vicente-Konglomerate lagern diskordant über paläozoische Gesteine und sind zwischen 100 und 200 m mächtig (Ahlfeld 1952). Fernández et al. (1972) beschrieben in den Konglomeraten der San Vicente-Fm. gerundete Karbonatklasten aus *Pucalithus*. Die San Vicente-Fm. wurde von einigen Autoren (Fernández et al. 1972) dreigeteilt, in proximale Konglomerate, in Übergangssedimente aus Sandsteinen und in die feinkörnige Quehua-Fm. (inf.). Martínez et al. (1994) gliederten die San Vicente-Fm. in eine klastische (SV1) und eine vulkanische (SV2) Einheit. Diese Drei- bzw. Zweiteilung der San Vicente-Fm. konnte im Gelände nicht nachvollzogen werden. Ein vulkanischer Eintrag ist in der gesamten San Vicente-Fm. zu beobachten (Kap. 4.2.2.4). Die Quehua-Fm. (inf.) wird nach Gelände- und Laboruntersuchungen in dieser Arbeit der San Vicente-Fm. zugeordnet. Bei Chita ist die San Vicente-Fm. ca. 1600 m mächtig (Jarandilla 1988). Hier besteht sie aus gelb-roten Konglomeraten, die in feinkörnige, graue bis gelbe Sandsteine übergehen (Jarandilla 1988). Bei Alota/Canapa sind etwa 1500 m Konglomerate der San Vicente-Fm. aufgeschlossen (Pacheco et al. 1997). Im Gebiet von San Pablo de Lipez sind etwa 250 m Konglomerate aufgeschlossen, die zur San Vicente-Fm. gehören (Choque & Mamani 1997).

2.6.1 Lithologie (Fotos D1 bis D15, Fototafeln 2, 3 und 4)

Die San Vicente-Fm. ist im gesamten Süd-Altiplano-Becken sedimentiert, jedoch bei späteren tektonischen Ereignissen lokal teilweise oder vollständig erodiert worden (Abb. 2.8). Sie besteht im wesentlichen aus klastischem Material und vulkanischen Produkten, die sowohl syneruptiv als auch intereruptiv abgelagert wurden. Der vulkanische Eintrag ist für die gesamte San Vicente-Fm. in Südbolivien charakteristisch. Das verbreitet vorhandene vulkanische Material erlaubt in der San Vicente-Fm. zahlreiche Datierungen (Tabelle Anhang). Zusätzlich wurden aus der Literatur stammende Daten in diese Arbeit integriert. Nach eigenen Datierungen wurde die San Vicente-Fm. ab dem Ober-Oligozän ($27,4 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar)) bis in das Miozän ($7,6 \pm 0,2$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar)) abgelagert (Abb. 2.9).



vorherige Seite **Abb. 2.8** Verbreitung der San Vicente- und Chocaya-Formationen im Süd-Altiplano-Becken. Die Sterne zeigen die Lokalitäten an, an denen diese Formationen bearbeitet wurde (UKFZ: Uyuni-Khenayani-Fault-Zone).

Bei Chita und Ubina geht die grobkörnige Potoco-Fm. graduell in die Konglomerate der San Vicente-Fm. über. Wo die San Vicente-Fm. konkordant über der Potoco-Fm. lagert, wurde die Formationsgrenze mit dem ersten durchgehenden Konglomerathorizont gezogen (Abb 2.10). In anderen Teilen des Süd-Altiplano-Beckens lagert die San Vicente-Fm. diskordant über paläozoischen Gesteinen, wie bei Vila Vila (Lokalität siehe Karte Anhang). Eine winkeldiskordante Lagerung über paläozoischen Gesteine und eine konkordante Lagerung über der Potoco-Fm. kann bei Cerro Gordo im SW des Süd-Altiplano-Beckens auf kurzer Entfernung beobachtet werden.

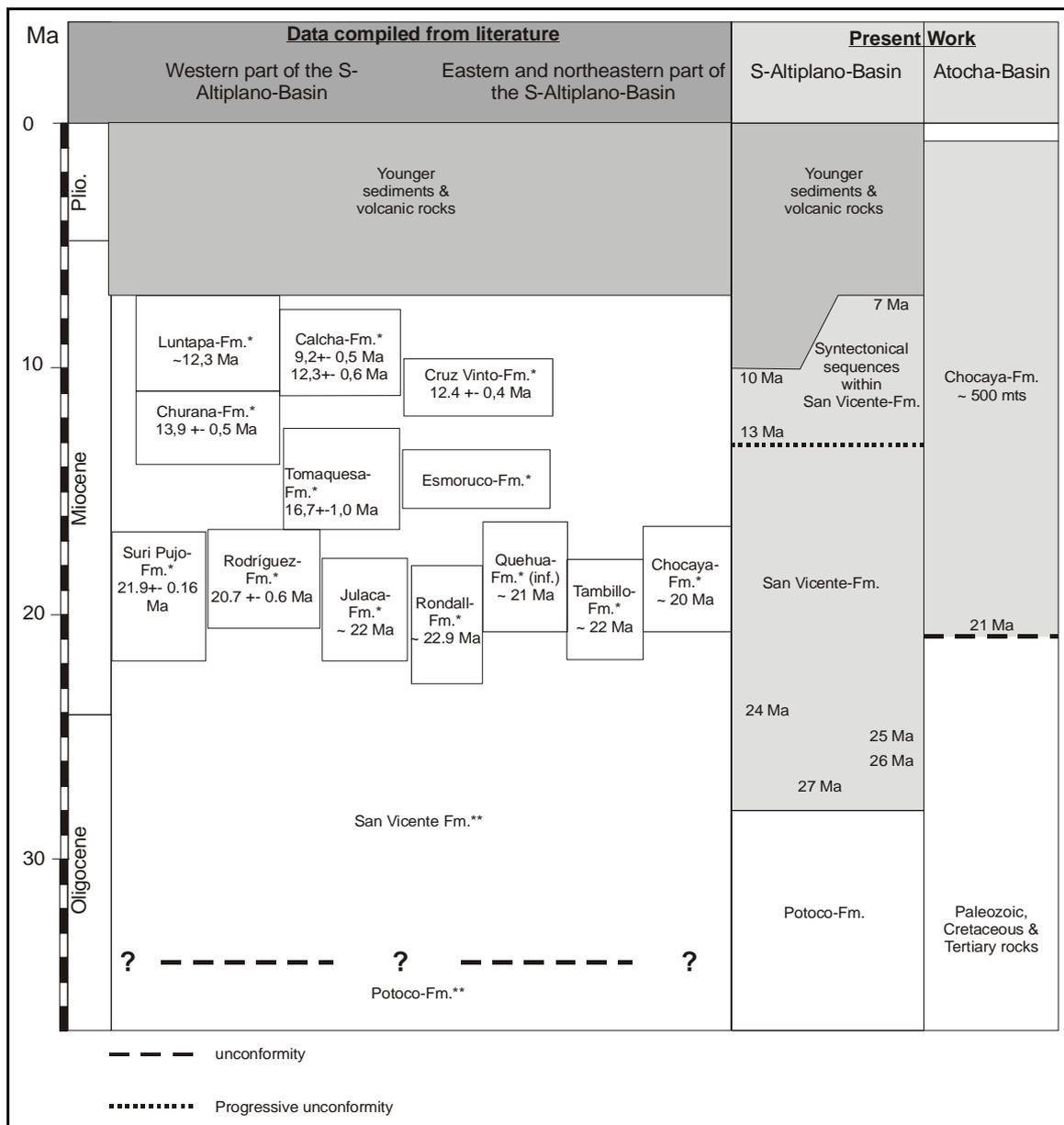


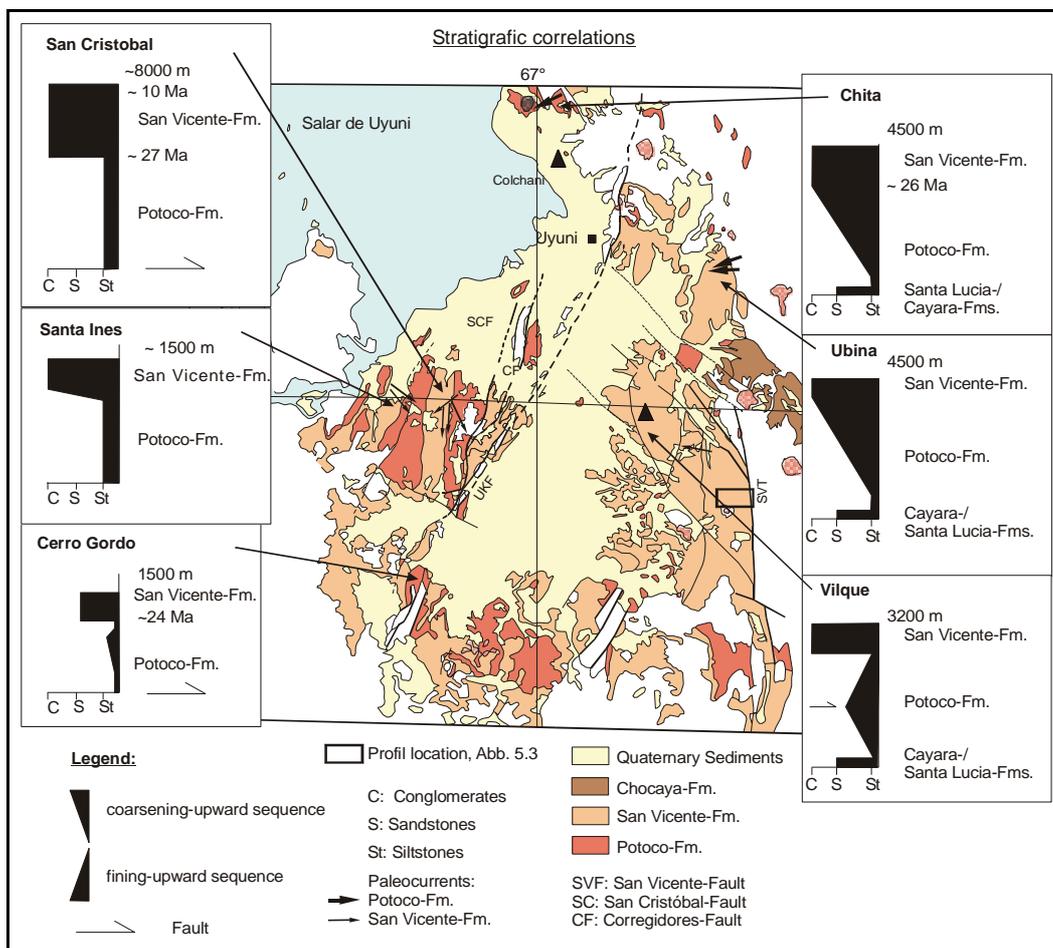
Abb. 2.9 In der Literatur beschriebene oligozäne bis miozänen Formationen und die in dieser Arbeit vorgestellte Definition der San Vicente-Fm. (* Suárez Soruco 2000; ** der basale Kontakt der San Vicente-Fm. war im Süd-Altiplano-Becken vor dieser Arbeit nicht datiert worden). Nach neueren

2 Stratigrafie

Untersuchungen wurden die in der Literatur beschriebenen Formationen in der San Vicente-Fm. zusammengefasst.

Oft wurden aufgrund der Unterscheidung zwischen rein klastischen und vulkanischen Sedimenten neue Bezeichnungen für die oberoligozänen bis miozänen Sedimenten im Süd-Altiplano-Becken eingeführt (Martínez 1994; Suárez Soruco 2000; Elger 2002). Während der Geländearbeit wurden die in der Literatur genannten Typlokalitäten dieser Sedimente neuerlich untersucht. Es stellte sich dabei heraus, dass es sich nur um lokale Fazies der San Vicente-Fm. bzw. um Sequenzen handelt (Abb. 2.9).

Die Neuaufnahme des Süd-Altiplano-Beckens durch YPFB-Santa Cruz (unveröffentlichte Kartierung, 1992) führte dazu, dass eine Vielzahl von Formationen ausgegliedert wurden, die hinsichtlich des Anteils an vulkanischem Material unterschieden wurden, dies in Abhängigkeit von der Nähe bzw. Ferne von einem eruptiven Zentrum (Tab. 2.3; Abb. 2.9). Trotz einiger Datierungen war die Stratigrafie des Süd-Altiplano-Beckens somit unübersichtlich und willkürlich. Nach genaueren Untersuchungen der Sedimente und der tektonischen Vorgänge im Süd-Altiplano-Becken wurden diese vulkano-klastischen Sedimente in der San Vicente-Fm. zusammengefasst. Die Grenze zur älteren Potoco-Fm. wurde mit dem ersten durchgehenden Konglomerathorizont gezogen (Abb. 2.10). Diese Neugliederung erlaubt erstmals eine Korrelation der tertiären Sedimente innerhalb des Süd-Altiplano-Beckens sowie mit Sedimenten im gesamten Altiplano-Becken Boliviens.



vorherige Seite **Abb. 2.10** Kornvergrößerungsabfolge der Potoco-Fm. im Unterschied zur folgenden, grobkörnigen San Vicente-Fm. (schematisch; Legende und Farbgebung der Karte siehe Karte im Anhang).

2.6.2 San Vicente-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens

Im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens (Abb. 2.10 und Profile Anhang) besteht die San Vicente-Fm. aus einer Wechselfolge von Konglomeraten, Sandsteinen, feinkörnigen Tuffen und vulkanischen Sandsteinen. Siltsteine kommen nur untergeordnet vor. Die Konglomeratklasten setzen sich aus Milchquarzen, Vulkaniten, paläozoischen Gesteinen und aufgearbeiteten Karbonatgeröllen aus der El Molino-Fm. zusammen. Die Konglomerate der San Vicente-Fm. sind in der Regel matrixgestützt und sehr schlecht sortiert. Die Klastengröße variiert zwischen etwa 2 und 3 cm im Durchmesser. Vereinzelt sind die Konglomerate imbriziert. Die Matrix der Konglomerate besteht aus sehr schlecht sortierten Sandsteinen, meist vulkanischen Sandsteinen. Über dem Basiskonglomerat folgt eine Wechselfolge mit häufig auskeilenden, hell- bis dunkelbraunen, sehr schlecht sortierten Sandstein- und Konglomerathorizonten. Oft können diese Sandsteine als konglomeratische Sandsteine eingestuft werden. Es treten sowohl Sandsteinlinsen als auch durchgehende Sandsteinhorizonte auf. In den konglomeratischen Sandsteinen liegen die eingestreuten Klasten in einer Entfernung von etwa 10 bis 15 cm. Die Klasten setzen sich meist aus paläozoischem Gesteinsmaterial und Karbonatgeröllen zusammen. Es sind zahlreiche feinkörnige Tuffbänke mit max. 50 cm Mächtigkeit aufgeschlossen, wobei die Mächtigkeit oft bei etwa 10 cm liegt. In diesen feinkörnigen Tuffen sind deutlich Biotite wie auch Quarzkristalle zu finden. Westlich von Animas sowie südlich von Atocha treten in der jungen San Vicente-Fm. hellbraune tuffitische und konglomeratisch-vulkanische Sandsteine auf. Vereinzelt sind feinkörnige Tuffgerölle mit einem Durchmesser von etwa 2 bis 3 cm eingestreut.

Frühere Formationen	Alter/Einstufung	Basiskontakt laut Literatur (+)	Geändert in
Suri Pujó-Fm.	Basis: 21,9 ± 0,16 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Rodríguez-Fm.	Basis: 20,7 ± 0,6 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Rondall-Fm.	Basis: 22,9 ± 0,9 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Quehua-Fm. (Inf)	Basis: ~ 21 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
bisherige Chocaya-Fm. im Altiplano-Becken	Basis: ~ 20 Ma		San Vicente-Fm.
Tomaquesa-Fm.	Basis: 16,7 ± 1,0 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Esmoruco-Fm.	?	konkordant*	San Vicente-Fm.
Churaña-Fm.	13,9 ± 0,5 Ma	Diskordant über Paläozoikum	San Vicente-Fm.
Cruz Vinto-Fm.	12,4 ± 0,4 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Luntapa-Fm.	Basis: 12,3 ± 0,6 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Calcha-Fm.	Basis: 11,7 ± 0,6 Ma bzw. 9,2 ± 0,5 Ma	konkordant*	San Vicente-Fm.
Tambillo-Fm.	Basis: ~22 Ma;	konkordant*	San Vicente-Fm.
Julaca-Fm.	Basis: ~ 22 Ma	Winkeldiskordant über Potoco Fm.	San Vicente-Fm.

Tab. 2.3 Die während dieser Arbeit zu der San Vicente-Fm. umgeänderte Formationen. (*konkordanter Basiskontakt mit der San Vicente-Fm.; + Suárez Soruco 2000).

Der Anteil an vulkanischem Material in der San Vicente-Fm. nimmt zum Hangenden zu. Die Ursache ist nicht unbedingt eine Zunahme der vulkanischen Tätigkeit selbst, sondern die Aufarbeitung älteren vulkanischen Materials.

Bei Chita im Nordosten sind zusätzlich zu den bereits aufgearbeiteten Vulkaniten schichtparallel andesitische, Hornblende-reiche Intrusionen mit einem Alter von $25,6 \pm 0,9$ Ma (K/Ar, Hbl, diese Arbeit) in der San Vicente-Fm. aufgeschlossen.

Im Osten des Süd-Altiplano-Beckens kommen untergeordnet auch Siltsteine in der San Vicente-Fm. vor. Diese Siltstein-Abschnitte erreichen westlich von Animas eine Mächtigkeit von max. 50 m. An anderen Lokalitäten im Osten keilen die Siltsteine auf kurze Entfernung aus oder gehen lateral in Sandsteine über. An einzelnen Lokalitäten, wie bei Pulacayo, sind in der oberen San Vicente-Fm. noch etwa 1,5 m mächtige poröse dunkelbraune Calichehorizonte mit welliger Unterseite aufgeschlossen. Sie gehen graduell in Sandsteine über.

2.6.3 San Vicente-Fm. im zentralen und westlichen Teil des Süd-Altiplano-Beckens

Im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens (Abb. 2.8 und 2.10) geht die San Vicente-Fm. konkordant aus der Potoco-Fm. hervor. Bei San Cristóbal erreicht die San Vicente-Fm. eine maximale Mächtigkeit von 3000 m. Die basalen Konglomerate der San Vicente-Fm. sind matrixgestützt. Einzelne Klasten haben einen Durchmesser von etwa 2 cm bis 3 cm. Die Klasten bestehen aus paläozoischem Sediment, Milchquarzen und Vulkaniten, vereinzelt treten aufgearbeitete karbonatische Klasten aus der El Molino-Fm. auf. Die Konglomerate gehen nach oben in eine Wechsellagerung aus Konglomeraten und Sandsteinen über. Die dunkelbraunen Sandsteine sind sehr schlecht sortiert. Einzelne trogförmige Schrägschichtungsserien sind aufgeschlossen. Sandsteine sind auch zwischen Siltsteine zwischengelagert. Es sind dann sowohl durchgehende Sandsteinbänke wie auch Sandsteinlinsen ausgebildet. Über dieser Einheit der San Vicente-Fm. folgen äolische Sandsteine. Die Korngröße der äolischen Sandsteine reicht von mittel- bis grobkörnig. Hauptsächlich bestehen die Sandsteine aus Quarz. Zum Top dieser äolischen Sandsteine nimmt der vulkanische Anteil darin immer mehr zu. Sie gehen schließlich ganz in Tuffe über. Diese Tuffe bestehen aus Biotitkristallen, idiomorphen Quarzkristallen und anderem vulkanischen Material. Die gesamte äolische Einheit hat eine Mächtigkeit von 500 m. Über den äolischen Sandsteinen ist eine vulkanische Brekzie aufgeschlossen. Deren eckige Komponenten haben einen Durchmesser von etwa 20 cm. Die Brekzie besteht aus vulkanischem und aus sedimentärem Material; ihre Mächtigkeit beträgt etwa 50 m.

Darüber folgt ein etwa 500 m mächtiger, schlecht sortierter Konglomerathorizont. Einzelne Klasten haben einen Durchmesser von 1,5 m. Sie bestehen vorwiegend aus paläozoischem Gestein, seltener kommen noch Vulkanite vor. Die Klasten sind sehr gut gerundet. Die Matrix besteht aus einem sehr schlecht sortierten tuffitischen Sandstein.

Darüber liegt eine mehrere-Meter mächtige Wechselfolge aus Sandstein, Konglomerat, geringmächtigem Siltstein, feinkörnigem Tuff sowie konglomeratisch-vulkanischem und tuffitischem Sandstein. Die Mächtigkeit einzelner feinkörniger Tuffbänke liegt zwischen 10 cm und 50 cm. Die konglomeratisch-vulkanischen und tuffitischen Sandsteine sind schräggeschichtet. Oft keilen diese

vulkanischen und tuffitischen Sandsteine in kurzer Entfernung aus, oder sie gehen in Konglomerate über.

Insgesamt ist die San Vicente-Fm., mit Ausnahme der basalen, nur gering verfestigt. Nur einzelne Konglomerathorizonte der basalen San Vicente-Fm. bilden gut sichtbare Schichtrippen. Die Farben der San Vicente-Fm. variieren zwischen rot, hell- bis dunkelbraun bis beige. Es kommen auch grüne Farbtöne vor. Bei Khala Huasi in zentralen Süd-Altiplano-Becken, sind in der jungen San Vicente-Fm. Stromatolithhorizonte eingeschaltet. Diese Stromatolithen alternieren mit Brekzien, teilweise wurden die Stromatolithen in den Brekzien aufgearbeitet (Abb. 3.9; Kap. 3.4.4; Faziesanalyse). Die Mächtigkeit dieser Wechsellagerung beträgt 15 m.

Eine ähnliche Abfolge wie bei San Cristóbal ist im Westteil des Süd-Altiplano-Beckens bei Santa Inés aufgeschlossen, was für ähnliche Ablagerungsbedingungen spricht. Einzig die Mächtigkeit einzelner Einheiten und Horizonte sowie die Zusammensetzung der Sedimente ist im Unterschied zu San Cristóbal unterschiedlich. Bei Santa Inés besteht die Geröllfraktion der Konglomerate aus Granitoiden sowie permischen Vulkaniten, häufig kommen Karbonatklasten der El Molino-Fm. hinzu. Wie bei San Cristóbal folgen über den basalen Konglomeraten äolische Sandsteine, über diesen wiederum vulkanische Ablagerungen. Darüber eine Wechselfolge aus Konglomeraten, Sandsteinen und vulkanischen Gesteinen. Über einer progressiven Diskordanz sind in die Konglomerate zusätzlich tertiäre Vulkanite eingeschaltet.

Bei Animas, bei San Cristóbal und Santa Inés sind jeweils progressive Diskordanzen in der oberen San Vicente-Fm. aufgeschlossen (Tab. 2.6). Die Sedimente über der Diskordanz setzen sich aus Konglomeraten, tertiären klastischen und vulkanischen Sandsteinen zusammen. Die Zusammensetzung der Konglomerate ist wie an der Basis der San Vicente-Fm., zusätzlich kommen tertiäre Sedimentklasten vor. Diese syntektonischen Sedimente zeigen unterschiedliche Alter, so bei Animas $7,6 \pm 0,2$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar), bei San Cristóbal $\sim 11 \pm 0,3$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar) und bei Santa Inés $15,8 \pm 1,2$ Ma (Tuff, Ar/Ar).

Diese Sequenzen geben einen Hinweis auf die tektonische Aktivität während der Ablagerung der San Vicente-Fm. Die Sequenzen sind oft durch Diskordanzen innerhalb der San Vicente-Fm. begrenzt. Diese Diskordanzen wurden als progressive Diskordanzen im Gelände erkannt. Sie gehen deutlich mit zunehmender Entfernung zur Störung in eine konkordante Lagerung über. Über diesen progressiven Diskordanzen ist ein kumulativer Keil aufgeschlossen (Tab. 2.5). Während der Genese dieser syntektonischen Sequenzen wurde vulkanisches Material eingeschaltet, so dass Datierungen direkt an den Diskordanzen möglich sind. Die Sedimente dieser Sequenzen sind nicht beckenweit kartierbar, sie wurden zum Teil in der „Vorland- und Hinterland“-Synklinale während der jeweiligen Störungsaktivität sedimentiert. Gelände- und Laboruntersuchungen weisen darauf hin, dass die ältere San Vicente- und Potoco-Formationen erodiert, transportiert und in nächster Nähe zum oft lokalen Hochgebiet wieder abgelagert wurden. Dieser Mechanismus wird als kannibalistisches System bezeichnet.

Profil/Lokalität	Mächtigkeit	Basiskontakt	Hinweise auf syntektonische Ablagerung	
			Kumulativer Keil/progressive Diskordanz	andere Hinweise/Zusammensetzung
Chita	> 1500 m	konkordant Potoco-Fm.	—	—
Pulacayo		nicht aufgeschlossen	—	ja
Ubina	> 100 m	konkordant Potoco-Fm.	—	—
Animas	~ 2500 m	kumulativer Keil direkt über Potoco-Fm. + Störung	ja	—
Cerdas	150 m	konkordant Potoco-Fm.	—	—
De La Punta	100 m	nicht aufgeschlossen	—	ja
San Cristóbal	3500 m	konkordant Potoco-Fm. + Störung	ja	—
Santa Inés	> 1000 m	konkordant Potoco-Fm.	ja	ja (Seismik)
Cerro Gordo	> 1000 m	konkordant Potoco-Fm.	—	—

Tab. 2.5 Mächtigkeiten der San Vicente-Fm.. Diese Tabelle listet auch die Lokalitäten auf, wo interne Diskordanzen auf eine syntektonische Ablagerung der San Vicente-Fm. deuten, sowie diejenigen Lokalitäten, die andere Hinweise auf eine syntektonische Ablagerung zeigen.

2.6.4 Zeitliche Einordnung der San Vicente-Fm.

Die Ablagerung der San Vicente-Fm. begann im Süd-Altiplano-Becken in einem relativ engen Zeitraum zwischen $24,3 \pm 1,2$ (Tuff, Biotit, K/Ar) und $27,4 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar) (Tab. 2.6; weitere Datierungen siehe Anhang). Beendet wurde die Ablagerung der San Vicente-Fm. im Spät-Miozän (10-7 Ma), wie undeformierte Sedimente zeigen.

Lokalität	Datierung an der Basis (Tuff, K/Ar)
Chita (NE-Teil des S-Altiplano-Beckens)	$26,1 \pm 0,7$ Ma
Animas (Osteil des S-Altiplano-Beckens)	$25,3 \pm 1$ Ma
San Cristóbal (zentr. Teil des S-Altiplano-Beckens)	$27,4 \pm 0,7$ Ma
Cerro Gordo (Südteil des S-Altiplano-Beckens)	$24,3 \pm 1,2$ Ma
Zentrales Altiplano-Becken (Corque-Synklinale)	25 Ma (Top Potoco-Fm.)

Tab. 2.6 Die Datierungen an der Basis der San Vicente-Fm. Die Datierung vom zentralen Altiplano-Becken stammt aus Horton et al. (1999).

2.7 Chocaya-Fm.

Die Chocaya-Fm. wurde erstmals von Ahlfeld (1946) erwähnt. Dieser beschrieb die sedimentären und vulkanischen Ablagerungen des Chocaya-Massivs bei Atocha. Dort überlagert die ca. 400 bis 500 m mächtige Abfolge diskordant gefaltetes Ordovizium. Die Chocaya-Fm. besteht aus gelben Sandsteinen und Silt- und Tonsteinen. Eingeschaltet sind Gipse und einige Tuffhorizonte (Ahlfeld 1946).

Das Alter der Chocaya-Fm. wurde bisher mit Oligozän und/oder Miozän angegeben (Hérail et al. 1996). YPFB-Santa Cruz (1992) erweiterte die Definition der Chocaya-Fm. dahingehend, dass alle horizontal lagernden Gesteine im Süd-Altiplano-Becken ihr zugeordnet wurden. Neue Untersuchungen von Martínez et al. (1994) und eigene Untersuchungen revidieren diese Ansicht. Daher wird die Bezeichnung Chocaya-Fm. im Sinne von Ahlfeld (1946) in der hier vorliegenden Arbeit nur für Sedimente im Atocha-Becken geführt. Aus einem basalen Tuffhorizont existiert eine Altersbestimmung von $20,3 \pm 0,5$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar).

Die Chocaya-Fm. wird von einigen Autoren (Horton et al. 1999) auch als Quehua-Fm.(sup.) bezeichnet. Ursprünglich wurde mit der Quehua-Fm. (sup.) eine Abfolge aus vorwiegend rosafarbenen Tuffiten beschrieben (Fernández 1972). Einzelne Bänke sind 30 - 40 cm mächtig. Vereinzelt sind Tuffe, rote Siltsteine und Konglomerate eingeschaltet (Fernández 1972), wobei die Lagerung dieser Formation horizontal ist. Die Typlokalität der Quehua-Fm. (sup.) liegt in der Nähe des Bahnhofs Quehua an der Eisenbahnlinie Rio Mulatos-Uyuni, an der Strecke Antofagasta (Chile)-Uyuni (Bolivien), (DNG 1963). Damit bezieht sich die ursprüngliche Beschreibung der Quehua-Fm. (sup.) auf horizontal lagernde Sedimente im Altiplano-Becken selbst und nicht auf Sedimente im Atocha-Becken.

Lithologie

Die Chocaya-Fm. lagert im Atocha-Becken fast horizontal (max. $\sim 10^\circ$ E) über älteren Sedimenten, an einigen Lokalitäten winkeldiskordant über ordovizischen, an anderen Lokalitäten winkeldiskordant über kretazischen Sedimenten. Nach Müller (2000) lagert im Osten des Atocha-Beckens die Chocaya-Fm. diskordant über der Estarca-Fm., einem Äquivalent der San Vicente-Fm. (Abb. 2.8; Abb. 2.1) .

Die Chocaya-Fm. besteht aus schlecht sortierten, beigen bis hellbraunen, konglomeratführenden, tuffitischen Sandsteinen, die syneruptiv abgelagert wurden. Grobkörnige Tuffe sind zwischengelagert. Die tuffitischen Sandsteine der Chocaya-Fm. sind bankig. Ihr Verfestigungsgrad ist gering. Die Klasten bestehen aus paläozoischen Sedimenten, vulkanischem Material, oft aufgearbeiteten grobkörnigen Tuffen sowie kretazischen und altertiären Sedimenten. Die einzelnen Klasten sind eckig bis kantengerundet. Die Größe einzelner Klasten liegt in der Regel bei 5 cm; es werden maximale Durchmesser von etwa 10 bis 15 cm erreicht.

Die Mächtigkeit einzelner grobkörniger Tufflagen in der Chocaya-Fm. beträgt etwa 50 cm. In die grobkörnigen Tuffe sind millimetergroße Quarzkristalle eingestreut. Nach der Nomenklatur von Fisher & Schmincke (1984) sind sie Produkte eines Lahares. Die Ablagerungen der Chocaya-Fm. stammen wahrscheinlich aus den in der Nähe liegenden Vulkanen Chorolque, Tatasi und Chocaya.

Die Ablagerung der Chocaya Fm. begann bei $20,3 \pm 0,5$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar). Spätestens ab diesem Zeitpunkt wurden die Sedimente im Atocha-Becken nicht mehr von Tektonik erfasst, während im Süd-Altiplano-Becken die tektonische Aktivität bis etwa 10 Ma andauerte. Die Chocaya-Fm. kann daher nicht mit horizontallagernden Sedimenten des Süd-Altiplano-Beckens korreliert werden. Die Chocaya-Fm. verzahnt sich nach Westen mit den Sedimenten der San Vicente-Fm. bzw. jüngeren Ablagerungen.

2.8 Zusammenfassung zur Stratigrafie

Die untersuchten Formationen Santa Lucía, Cayara, Potoco und San Vicente wurden im Süd-Altiplano-Becken konkordant übereinander abgelagert. Die paläozäne Santa Lucía-Fm. lagert im Süd-Altiplano-Becken konkordant über älteren Sedimenten der El Molino-Fm. Die paläozäne Cayara-Fm. wurde nur im Osten und Südwesten des Süd-Altiplano-Beckens abgelagert. Die Santa Lucía-, Cayara- und Potoco-Formationen sind durch klastischen Eintrag charakterisiert, selten kommen Evaporite, Karbonate und Vulkanite vor. Einzig im zentralen Süd-Altiplano-Becken kommen

2 Stratigrafie

in der Potoco-Fm. an zwei Lokalitäten vulkanische Gesteine vor. Im Osten zeigt die eozäne/unter-oligozäne Potoco-Fm. eine Kornvergrößerungsabfolge, im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens besteht sie nur aus feinkörnigen Sedimenten. Diese Potoco-Fm. wurde im gesamten Süd-Altiplano-Becken mit Mächtigkeiten von bis zu 4500 m abgelagert.

Die ober-oligozäne/miozäne San Vicente-Fm. unterscheidet sich von den übrigen Formationen durch ihre grobkörnige, vulkano-sedimentäre Zusammensetzung. Die Ablagerung begann zwischen $24,3 \pm 1,2$ Ma und $27,4 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar). Ablagerungen, die in der Nähe von progressiven Diskordanzen liegen, sind als syntektonische Sequenzen innerhalb der San Vicente-Fm. interpretiert worden. Damit kann die San Vicente-Fm. als eine syntektonische, vulkano-klastische Ablagerung im Süd-Altiplano-Becken interpretiert werden.

Die Chocaya-Fm. wurde ab $20,3 \pm 0,5$ (Tuff, Biotit, K/Ar) Ma im Atocha-Becken, einem vom Süd-Altiplano-Becken abgetrennten Becken, sedimentiert. Charakterisiert durch ihre grobkörnige, polymikte Zusammensetzung, verzahnt sich die Chocaya-Fm. nach Westen mit der San Vicente-Fm. des Süd-Altiplano-Beckens.

Auf der Basis dieser stratigrafischen Untersuchungen und Literaturangaben gelingt erstmals eine stratigrafische Korrelation der tertiären Sedimente im gesamten Altiplano-Becken Boliviens.