

3 Faziesanalyse

Die aufgeschlossenen Sedimente im Süd-Altiplano-Becken zeigen bereits makroskopisch in ihrer Zusammensetzung, ihrer Korngröße und ihren Sedimentationsstrukturen deutliche Unterschiede. Diese Merkmale werden benutzt, um einzelne Lithofaziestypen zu definieren, die im folgenden Kapitel beschrieben und interpretiert werden. Architekturelemente werden, basierend auf den siliziklastischen Lithofaziestypen, definiert, um den Ablagerungsraum mit seinen morphologischen Eigenschaften genauer zu erfassen. Lithofaziestypen (Lft's) werden gemeinsam mit den Architekturelementen zu Lithofaziesvergesellschaftungen zusammengefasst (Vergl. Kap. 3.3). Diese charakterisieren diskrete Ablagerungsumgebungen und bilden somit die Basis für das in dieser Arbeit entwickelte Beckenmodell (Kap. 6).

Die Interpretation der klastischen Lithofaziestypen richtet sich im wesentlichen nach Arbeiten von Miall (1996) und Reading (2002), der vulkanoklastischen nach Fisher & Schmincke (1984) und Reading (2002). Die bearbeiteten Sedimente zeichnen sich durch einen hohen Anteil an vulkanischen Beimengungen aus. Aus diesem Grund wurde entsprechenden Lithofaziestypen der Index (v) angehängt (Tab. 3.1). Dieser Index gibt damit einen Hinweis darauf, dass neben siliziklastischem auch vulkanisches Material in intereruptiven Phasen transportiert und abgelagert wurde. Dies betrifft vor allem die San Vicente- und die Chocaya-Formationen. Rein vulkanische Ablagerungen, wie Tuffe und Ignimbrite, werden als eigenständige Lithofaziestypen behandelt.

3.1 Lithofaziestypen

Lithofaziestyp Ev (Evaporite: Gips, untergeordnet Salze)

Beschreibung: Evaporite, u. a. Gips, bilden vorwiegend schichtparallele Ablagerungen innerhalb der Potoco-Fm.. Der Gips hat eine milchigweiße, oft rötliche Farbe, die aus Verunreinigungen durch tonige Sedimente stammt. Ein Vorkommen ist in der Santa Inés-Antiklinale erschlossen; anderenorts ist der Gips bereits weitgehend weggelöst. Seine Relikte sind in Form von Krusten und Gipskristallen oder als Gipsknollen erhalten geblieben. Häufig treten auch Pseudomorphosen nach Gips auf. In der Bohrung Colchani (Ugarte 1997) wurde an der Basis der Potoco-Fm. massiver Gips erbohrt. Salz ist im Gelände an der Oberfläche nicht aufgeschlossen, bekannt ist es nur aus der Bohrung Vilque (Welsink et al. 1995).

Interpretation: Evaporite entstehen u. a. bei der Austrocknung alkaliner Seen aus konzentrierten Lösungen. Dabei ist Grundwasser besonders wichtig (Reading 2002). Die Ionen können durch Lösung oder Auslaugung bereits vorhandener Evaporite oder durch Lösung aus vulkanischen Gesteinen ins Grundwasser gelangen (Risacher & Fritz 1991; Reading 2002). Für die Lösung aus bereits abgelagerten Evaporiten spricht, dass in den kretazischen Gesteinen 220 m Evaporite (Salz) im Süd-Altiplano-Becken erbohrt wurden (Bohrung Colchani, Ugarte 1997). Eine Herkunft der Ionen aus vulkanischen Gesteinen ist weniger wahrscheinlich, da kretazische Vulkanite weiter entfernt im heutigen Chile zwar vorhanden sind, der Transportweg in das Süd-Altiplano-Becken hinein aber zu weit erscheint.

3 Faziesanalyse

Code	Beschreibung	Interpretation	Vorkommen
Chemische Sedimente			
Ev	Evaporite: Gips, Salz	Evaporation in der Playaebene	Potoco-Fm.
P	Paläoböden, z. T. mit Karbonatkonkretionen	Bodenbildung	Santa Lucía-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Cstr	Stromatolithe, teils mit Schalenresten	Lagunen- und Seenbildung	San Vicente-Fm.
Cfos	Biogenreiches Karbonat mit Fossilien	Lagunen- und Seenbildung	Santa Lucía-Fm. San Vicente-Fm.
Siltsteine			
F	Massive Siltsteine	Ablagerung in Überflutungsebenen, Playa	Santa Lucía-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Fl	Siltsteine in Wechsellagen mit Sandsteinen	Überflutungsebenen neben Flussrinnen	Potoco-Fm.
Sandsteine			
Seod, Seod(v)	Schräggeschichtete Sandsteine	äolische Dünen	San Vicente-Fm.
Sp, Sp(v)	Planar schräggeschichtete Sandsteine	subaquatische 2-D Dünen; Vorkommen auf Überflutungsebenen, an Barren	Santa Lucía-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Sr	Rippelschräggeschichtete Sandsteine	gebildet in flachem, strömendem Wasser	Santa Lucía-Fm. Cayara-Fm. Potoco-Fm.
Sh, Sh(v)	Horizontalgeschichtete Sandsteine		Potoco-Fm.
Sg, Sg(v)	Normal gradierter Sandstein	in alluvialen Fächern abgelagerte Sandsteine	Cayara-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
St, St(v)	Sandsteine mit trogförmiger Schrägschichtung	Migration von 3-D Dünen	Santa Lucía-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Sm, Sm(v)	Massige, unsortierte Sandsteine	Ablagerung distaler „debris flows“ („sheet floods“)	Cayara-Fm. Potoco-Fm. San Vicente-Fm. Chocaya-Fm.
Konglomerate			
Gmg (v)	Matrixgestützte Konglomerate, gradiert	Ablagerung von „debris flows“	Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Gmm (v)	Matrixgestützte Konglomerate, massiv	Ablagerung von „debris flows“	Potoco-Fm. San Vicente-Fm. Chocaya-Fm.
Gt/h (v)	Klastengestützte Konglomerate, horizontalgeschichtet, imbriziert	in der Flussrinne abgelagerte Sandkörper („bars“)	Santa Lucía-Fm. Cayara-Fm. San Vicente-Fm.
Gt (v)	Trogförmig geschichtete Konglomerate	Rinnenfüllungen kiesdominierter Flüsse	Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Vulkanite			
Gvolc	Autoklastit	durch vulkanische Aktivität verursachte „debris flows“	San Vicente-Fm.
Svf	Feinkörnige Tuffe	Ablagerung in Überflutungsebenen; Transport als Suspensionsfracht	Potoco-Fm. San Vicente-Fm.
Svg	Grobkörnige Tuffe, kristallreich	füllt Relief aus, Rinnenfüllungen,	San Vicente-Fm. Chocaya-Fm.

Tab. 3.1 Lithofaziestypen der eozänen bis miozänen Sedimente und Vulkanite im Süd-Altiplano-Becken.

Lithofaziestyp P (Paläoböden, Miall 1996)

Beschreibung: An der Basis der Potoco-Fm. sind in den Siltsteinen weitverbreitet 30 - 40 cm dicke „fleckige“ Bereiche zu beobachten. Sie lassen sich im Streichen über mehrere Meter verfolgen. Mehrere einzelne Horizonte übereinander ergeben Gesamtmächtigkeiten von max. 3 m. Die gelb-grün bis hellbraunen, 2 bis 3 cm großen runden bis ovalen „Flecken“ heben sich von den rot-violetten Siltsteinen deutlich ab. In einigen hellbraunen Horizonten der San Vicente-Fm. sind ovale bis runde Karbonatknollen und auch Karbonathorizonte vorhanden. Die Karbonatknollen sind 2 cm im Durchmesser. Gelegentlich zeichnet sich eine vertikale Anordnung der Knollen ab. Die Karbonathorizonte haben eine Mächtigkeit von 40 bis 60 cm und erstrecken sich mehrere hundert Meter im Streichen. Die Karbonatknollen sind porös, die Karbonathorizonte massig und ohne Internstruktur.

Interpretation: Die „fleckigen“ Siltsteine wie auch die Karbonatknollen und -horizonte sind Paläoböden. Horton & DeCelles (2001) interpretierten erstere als Hinweis auf intensives Ausbleichen unter gut entwässernden Bedingungen und/oder auf ein Fehlen von Karbonaten im Liefergebiet. Karbonatische Paläoböden (*pedogenic calcretes*) oder Caliche sind typisch in ariden bis semiariden Landschaften (Khadkikar et al. 2000). Sie sind charakteristisch für Wüsten bzw. Wüstenränder, wo die Evaporationsrate größer als die Niederschlagsrate ist (Retallack 1994).

Lithofaziestyp Cstr (Stromatolithen)

Beschreibung: Stromatolithen kommen in Wechselfolge mit Seekalken äußerst selten im Süd-Altiplano-Becken vor. Es sind ausschließlich flachwellige Wuchsformen erkennbar. Die Horizonte sind bis zu 40 cm mächtig. Zwischen den Laminae sind Fremdkörper, wie z. B. Schalenreste von Gastropoden, eingelagert. Gelegentlich sind in dünnen Horizonten Intraklasten eingeschaltet. Dieser Lithofaziestyp kommt nur in der San Vicente-Fm. an der Lokalität Khala Huasi, vor.

Interpretation: Stromatolithen entwickeln sich u. a. in flachen, durchlichteten Seen oder an deren Rändern. Hinweise auf die Paläosalinität lassen sich allerdings weder aus ihnen noch aus den vorhandenen Organismenresten ableiten. Ebenso sind keine Hinweise auf ein Trockenfallen des Sees, wie z. B. Trockenrisse aufgeschlossen.

Lithofaziestyp F (Siltsteine, Miall 1996)

Beschreibung: Der Lithofaziestyp ist durch massive, bis 50 m mächtige Siltsteinhorizonte charakterisiert. Sie sind stets einheitlich rötlich bis violett. Unterbrochen werden die Siltsteinhorizonte von Wechsellagerungen aus feinkörnigen Sandsteinen und Siltsteinen, die im Lithofaziestyp **FI** beschrieben werden. Weiterhin im Lithofaziestyp **F** eingeschaltet sind 5 cm mächtige Sandsteinhorizonte, die im Lithofaziestyp **Sh** beschrieben werden. Sedimentstrukturen im Lithofaziestyp **F** sind aufgrund eines geringen Verfestigungsgrades und damit sehr schlechten Erhaltungszustandes dieser Sedimente nicht erkennbar. Maximal ist dieser Lithofaziestyp in der Potoco-Fm. bei San Cristóbal etwa 4600 m mächtig, geringmächtigere Einheiten dieses

Lithofaziestyps kommen in der San Vicente-Fm. mit etwa 50 m und Santa Lucía-Fm. mit etwa 15 m vor.

Interpretation: Nach Miall (1996) handelt es sich bei massiven Siltsteinen um Ablagerungen von Überflutungs- oder Playa-Ebenen. Das Material wurde als Suspensionsfracht in distale Beckenteile transportiert und dort, sehr entfernt von fluvialen Rinnen, sedimentiert. Da es sich um relativ homogene Abfolgen handelt, müssen die Ablagerungsbedingungen langfristig (Paläozän bis Oligozän; Kap.: 2 Stratigrafie der Potoco-Fm.) gleich geblieben sein.

Lithofaziestyp FL (Feinsand, Silt, Ton; laminated Sand, Silt and Mud, Miall 1996)

Beschreibung: Charakteristisch für diesen Lithofaziestyp sind bis maximal 10 cm mächtige Wechsellagerungen aus Feinsandstein und Siltstein. Im allgemeinen fehlen schichtinterne Sedimentationsstrukturen; selten und sehr undeutlich sind Rippeln an der Oberfläche der Sandsteine überliefert. Auf einigen Schichtflächen sind Trockenrisse vorhanden. Dieser Lithofaziestyp kommt in den Santa Lucía-, Cayara- und Potoco-Formationen vor.

Interpretation: Nach Miall (1996) kommt eine Wechsellagerung von Feinsand, Silt und Ton oft in Überflutungsebenen direkt neben Rinnen (*overbank areas*) vor und entsteht durch Ablagerung aus Suspensionsströmen bei kurzzeitigen Überflutungen, z. B. bei größeren Niederschlägen. Die Anwesenheit von Feinsand spricht für einen proximaleren Ablagerungsraum als beim Lithofaziestyp F.

Lithofaziestypen S: Sandsteine

Lithofaziestyp Seod (äolische Sandsteine)

Beschreibung: Diese grauen-bis braunen, gut sortierten, mittel- bis grobkörnigen Sandsteine kommen in der basalen San Vicente-Fm. vor. Ihre Mächtigkeit beträgt max. 500 m. Der Basiskontakt ist nicht-erosiv. Die überwiegend trogförmige Schrägschichtung ist sehr gut aufgeschlossen und zeigt einen Winkel zur Schichtung von 10°-15°, vereinzelt kommen auch steilere Winkel (> 30°) vor. Einzelne Schrägschichtungsserien haben eine Mächtigkeit von etwa 5 bis 7 m; es kommen aber durchaus Schrägschichtungsserien von bis zu 10 m Mächtigkeit vor. Intern treten Reaktivierungsflächen auf. Zum Top hin nimmt der vulkanische Eintrag in den Sandsteinen zu, und es treten bereits einzelne Tuffe auf. Diese Sandsteine sind, etwa 30 km voneinander entfernt, weit aushaltend bei San Cristóbal und Santa Inés aufgeschlossen.

Interpretation: Die gute Sortierung der Sandsteine, die Feinlamination, der nicht-erosive Basiskontakt sowie die Schrägschichtungswinkel deuten auf einen äolischen Transport. Die Transportrichtung ist nach Analyse der Messungen von Nord nach Süd. Das Fehlen von Kiesgeröllen zeigt einen Unterschied zu fluviatil interpretierten Lithofaziestypen. Daher wird dieser Faziestyp als Ablagerung migrierender, drei-dimensionaler (3D) äolischer Dünen interpretiert. Das Vorkommen von grobkörnigen äolischen Sandsteinen wird auch aus der kretazischen Botucatu-Fm. beschrieben (Scherer 2000).

Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Sandsteinen ebenso um Dünenfelder, da diese äolischen Sandsteine an zwei Lokalisationen mit ähnlichen stratigrafischen Beziehungen aufgeschlossen sind. Auch

dort ist der Winkel zwischen Schichtung und Schrägschichtung ist mit 10° bis 15° relativ flach, die steileren Winkel geben einen weiteren Hinweis auf einen äolischen Transport. Das Fehlen von Bodenhorizonten innerhalb der Sandsteine belegt trockene Ablagerungsbedingungen (Scherer 2000).

Lithofaziestyp Sp (Planar schräggeschichtete Sandsteine, Miall 1996)

Beschreibung: Die Gesteine dieser Lithofazies bestehen aus feinkörnigen Sandsteinen. Die Sandsteinhorizonte werden an der Basis und am Top von Siltsteinen begrenzt. An ihrer Basis kann ein Aufarbeitungshorizont vorhanden sein. Dieser besteht aus Siltsteinintraklasten mit einem Durchmesser von bis 5 cm. Schrägschichtung ist in den Sandsteinen über dem Aufarbeitungshorizont ausgebildet, selten geht sie in eine Lamination über. Messungen an den Schrägschichtungsserien ergaben Werte von etwa 20°- 30° zur Schicht. Der obere Kontakt der Sandsteine zu Siltsteinen des Lithofaziestyps **FI** ist graduell. Am Top der Sandsteine sind einzelne Karbonatkonkretionen, Kriechspuren von Kleinlebewesen (Krebse) sowie Grabspuren erkennbar. Gelegentlich wurden Trockenrisse beobachtet. Die Sandsteine bilden entweder lateral mehrere hundert Meter aushaltende Horizonte oder Rinnenfüllungen. Die Mächtigkeit einzelner Rinnenfüllungen liegt in der Regel bei 1,5 m Höhe und bei etwa 5 m Breite. Sie haben damit ein Breite zu Höhe-Verhältniss (w/d-ratio) von 3,3. Aufgeschlossen ist dieser Lithofaziestyp in der Santa Lucía-Fm. und Potoco-Fm.. An der Basis der Potoco-Fm. liegt die Mächtigkeit der Sandsteinhorizonte in der Regel zwischen 5 - 10 cm, maximale Mächtigkeiten von 2 m sind selten.

Interpretation: Die Sandsteine dieses Lithofaziestyps entstehen durch die Migration von subaquatisch gebildeten 2-D Dünen in fluviatilen Rinnen (Miall 1996). Die Bildung von 2-D Dünen ist in Überflutungsebenen (Horne et al. 1978) durch laterale Akkretion im fluviatilen System möglich. Die Kornverfeinerungsabfolgen entstehen bei der Abnahme der Fließgeschwindigkeit während der Ablagerung (Martins-Neto1996).

Lithofaziestyp Sr (Rippelschräggeschichtete Sandsteine, Miall 1996)

Beschreibung: Es handelt sich bei diesem Lithofaziestyp um feinkörnige, gelb bis braune, gut sortierte Sandsteine, die als durchgehende Horizonte und als linsenförmige Rinnenfüllungen vorkommen. An der Basis kann ein Aufarbeitungshorizont aus den darunterliegenden Siltsteinen ausgebildet sein. Diese Sandsteine sind in Siltsteine eingebettet. Kennzeichnendes Merkmal dieser Sandsteine sind deutliche Rippel. Die Mächtigkeit der Sandsteine variiert zwischen 1 m bzw. 1,5 m. Ein Übergang zwischen dem Lithofaziestyp **Sp** und **Sr** ist möglich. Dieser Lithofaziestyp ist bei Animas und Atocha aufgeschlossen.

Interpretation: Rippelschräggeschichtete Sandsteine werden von Harms et al. (1975) und Miall (1996) als im flachen Wasser im unteren Strömungsregime gebildete Strömungsrippeln interpretiert. Olsen (1989) deutet diesen Lithofaziestyp als das Ergebnis temporärer, schichtflutartiger Ereignisse in der Playa- oder Überflutungsebene. Die Möglichkeit der Ablagerung als Teil einer „point bar“-Sequenz in einem Mäander-System ist nach Allen (1970) möglich und würde dann den Übergang zum Lithofaziestyp **Sp** andeuten.

Lithofaziestyp Sh (Horizontal geschichteter Sandstein, Miall 1996)

Beschreibung: Bei den Sandsteinen dieses Lithofaziestyps handelt es sich um langaushaltende Sandsteinhorizonte unterschiedlicher Mächtigkeit zwischen einigen cm bis dm; Mächtigkeiten bis zu 1,5 m sind möglich. Es sind ausschließlich feinkörnige, gut sortierte Sandsteine, die zum Top in laminierte Sandsteine übergehen. Übergänge zu den Lithofaziestypen **Sp**, **Sg** und **Sr** sind häufig. Die Sandsteine sind oft in Siltsteinfolgen eingeschaltet. An der Oberseite einiger Sandsteinhorizonte kommen Grabspuren vor. Die Sandsteine dieses Lithofaziestyps kommen ausschließlich in der Potoco-Fm. vor.

Interpretation: Horizontalgeschichtete Sandsteine können in unterschiedlichen Strömungsregimes entstehen (Miall 1996). Dabei ist die Fließgeschwindigkeit eines der entscheidenden Kriterien, neben Korngröße und Transporttiefe. So entstehen horizontal geschichtete Sandsteine im Übergangsbereich vom laminaren zum turbulenten Fließen. Die Fließgeschwindigkeit für mittel- bis grobkörnige Sandsteine in breiten, flachen, sanddominierten Strömen liegt dann bei etwa 1 m/s und die Transporttiefe im Wasser bei etwa 0,25 m bis 0,40 m, diese könnten auch auf feinkörnige Sandsteine bezogen werden.

Nach Miall (1996) können Sandsteineinheiten des Lithofaziestyps **Sh** mehrere Meter Mächtigkeit erreichen und als einzelne Sedimentationsereignisse interpretiert werden, wenn die Fließigenschaften im kritischen (turbulenten) Stadium länger anhalten. Größere Anteile, sogar Gerölle, sind selten, können aber am Boden mitgeschleift werden.

Lithofaziestyp Sg (normal gradierte Sandsteine, Mial 1978)

Beschreibung: Die Sandsteine dieses Lithofaziestyps bilden normal gradierte, grob- bis feinkörnige, rotbraune bis graue Sandsteinhorizonte. Einzelne Sandsteinhorizonte lassen sich im Streichen sehr weit verfolgen. Ihre Mächtigkeit variiert zwischen fünf und einigen Dezimetern. Die Unterseite der Sandsteinbänke ist oft wellenförmig und sehr oft sind Kolkmarken aufgeschlossen. Selten ist Schrägschichtung sichtbar. Die beschriebenen Sandsteine kommen am Ostrand des Süd-Altiplano-Beckens in der Potoco-Fm. vor.

Interpretation: Sandsteine dieser Art repräsentieren oft das letzte Stadium in der Entwicklung eines Fan-Deltas (Martins-Neto 1996). Die Wechsellagerung mit Siltsteinen deutet auf eine subaquatische Ablagerung hin, wie auch die Kolkmarken. Jede einzelne Wechsellagerung von Sandstein und Siltstein würde dabei einem „high-density“ Turbidit entsprechen. Für einen solchen Turbidit spricht auch der Übergang zu anderen Lithofaziestypen, wie **Sr** und die umlagernden Siltsteine. Der Ablagerungsraum könnte distal am Abhang eines alluvialen Fächers gelegen haben.

Alternativ besteht nach Martins-Neto (1996) auch die Möglichkeit, dass die isolierten Sandsteinhorizonte innerhalb von Siltsteinen das Produkt eines Sturm-induzierten, „low-density“ Turbidits sind. Dabei würden bei einem Sturm bereits abgelagerte Sandsteine wieder bewegt und resedimentiert werden.

Lithofaziestyp St (Sandsteine mit trogförmiger Schrägschichtung, Miall 1996)

Beschreibung: Die trogförmige Schrägschichtung dieser Sandsteine erreicht Werte von 20° bis 30° zur Schichtung. In der Potoco-Fm. kommt dieser Lithofaziestyp in Form von Sandsteinlinsen vor. Einzelne Linsenkörper weisen eine Kornverfeinerungsabfolge auf. Die Unterseite einzelner Körper ist geradlinig und leicht gewölbt, der Kontakt zu den umliegenden Siltsteinen ist scharf. Die Korngröße der Sandsteine reicht von grob- bis feinkörnig. Einzelne gut gerundete Gerölle des Paläozoikums können locker verteilt vorkommen. An der Unterseite dieser Sandsteine ist oft ein Aufarbeitungshorizont aus Siltsteinklasten vorhanden. Intern sind diese Sandsteine durch eine deutliche „fining-upward“-Sequenz charakterisiert. Die Sandsteine zeigen einen geringen Verfestigungsgrad und damit einen sehr schlechten Erhaltungszustand. Darüber hinaus sind die Sandsteine dieses Lithofaziestyps in der Santa Lucía-Fm. und Cayara-Fm. verbreitet. In diesen Formationen sind die einzelnen Sandsteinkörper allerdings seltener.

Interpretation: Trogförmige Schrägschichtung entsteht durch die Migration von subaquatischen 3-D Dünen im unteren Fließregime in mäßig schnell fließenden, mitteltiefen (1-10 m) Strömen (Miall 1996). Die „fining-upward“-Sequenzen zeigen eine während der Ablagerung abnehmende Fließgeschwindigkeit an (Martins-Neto 1996).

Lithofaziestyp Sm (Massige Sandsteine, Miall 1996)

Beschreibung: Die Sandsteine dieses Lithofaziestyps sind als locker gepackte, geröllführende Sandsteine aufgeschlossen. Sie sind hell- bis dunkelbraun. Die Sandsteine sind sehr schlecht sortiert und überwiegend strukturlos. Ihre Mächtigkeit beträgt 5 bis 7 m. Die Größe der einzelnen Gerölle liegt bei etwa 3 - 4 cm Durchmesser. Einzelne Sandsteinhorizonte lassen sich 20 m bis 25 m im Streichen verfolgen. Die massigen Sandsteine verzahnen sich lateral mit Siltsteinen (FI) und Konglomeraten (Gmm). Die Faziesübergänge sind graduell. Der Lithofaziestyp **Sm** ist in der Potoco-Fm. bei Ubina und Chita ausgebildet. Er kommt auch in der San Vicente- und Chocaya-Formationen vor.

Interpretation: Massige Sandsteine können als Ablagerungen von distalen „debris flows“ interpretiert werden. Nach Martins-Neto (1996) repräsentiert jeder einzelne Horizont ein individuelles Ablagerungsereignis als Ergebnis einer schnellen Ablagerung aus einer hoch-konzentrierten Suspension. Dafür sprechen die fehlende interne Schichtung, die fehlende Gradierung sowie die matrixgestützte Gerölle (Smith 1986). Massige Sandsteine entstehen nach Smith (1986) durch laminares Fließen. Die Sediment-tragende Eigenschaft wird durch die Matrixfestigkeit, den Kornverteilungsdruck und den Auftrieb bestimmt (Smith 1986).

Lithofaziestypen G: Konglomerate

Lithofaziestyp Gmg (matrixgestützte Konglomerate mit Gradierung, Miall 1996)

Beschreibung: Die matrixgestützte Konglomerate machen bis zu 500 m mächtige einheitliche Gesteinspakete aus. Die sehr gut gerundeten Gerölle haben einen maximalen Durchmesser von bis zu 1,5 m, zum Hangenden nimmt der Durchmesser bis etwa 40 cm ab. Die Sortierung ist sehr schlecht. Eine Einregelung der Komponenten ist nicht vorhanden. Vor allem an der Basis ist

vulkanisches Material in der Matrix enthalten, die im allgemeinen aus einem sehr schlecht sortierten Sandstein besteht. Der Basiskontakt ist wellig. Dieser Lithofaziestyp kommt in der Potoco- und der San Vicente-Formation vor.

Interpretation: Miall (1996) interpretierte matrixgestützte Konglomerate mit den oben beschriebenen Eigenschaften als Resultat von „debris flows“. Die Schuttströme können präexistierende Rinnen im Untergrund auffüllen. Der gute Rundungsgrad weist darauf hin, dass die Gerölle, bevor sie durch einen „debris flow“ abgelagert wurden, in einem Fluß transportiert wurden.

Lithofaziestyp Gmm (matrixgestützte Konglomerate, massiv (Miall 1996))

Beschreibung: Dieser Lithofaziestyp ist nicht gradiert und daher klar vom Lithofaziestyp **Gmg** zu unterscheiden. Die Klasten sind in der Regel 3 cm groß. Es kommen aber gelegentlich Komponenten von bis 20 cm Durchmesser vor. Die Komponenten können gut gerundet aber auch kantig, sowohl plattig als auch kugelförmig sein. Eine Imbrikation kann nicht beobachtet werden. Die Matrix besteht aus schlecht sortiertem Sandstein. Dieser Lithofaziestyp kommt in der San Vicente-, Cayara Fm- und in der Potoco-Formation vor.

Interpretation: Die Lithofaziestypen **Gmg** und **Gmm** werden von Miall (1996) zusammen beschrieben und als Ergebnis von „debris flows“ interpretiert. Für eine Ablagerung aus einem „debris flow“ spricht der hohe Matrixanteil dieser Konglomerate.

Lithofaziestyp Gt/h (Klastengestützte Konglomerate, trogförmig, zum Teil horizontalgeschichtet, Miall 1996)

Beschreibung: Die Klasten dieser Konglomerate sind deutlich plattig ausgebildet und haben eine maximale Größe von etwa 7 cm Länge und 3 bis 5 cm Breite. Im Durchschnitt liegt ihre Größe bei 3 cm Länge und 1 bis 2 cm Breite. Gelegentlich sind die Gerölle imbriziert. Die Mächtigkeiten der Konglomeratkörper variieren zwischen 30 cm und 1,5 m bei einer Breite von 10 m. Die matrixgestützten Konglomerate sind mäßig sortiert. Der Basiskontakt ist meist undeutlich. Nach oben hin gehen die Konglomerate graduell in grob- bis mittelkörnige Sandsteine des Lithofaziestyps **St** über. Deutlich sind diese Konglomerate in der Santa Lucía-, Cayara- und der San Vicente-Formationen ausgebildet.

Interpretation: Nach Jones et al. (2001) können klastengestützte Konglomerate als Kiesbänke in Flussrinnen abgelagert werden. Solche Konglomeratkörper können auch seitlich an der Flussrinne oder stromabwärts in der Flussrinne selbst abgelagert werden. Während abnehmender Strömungsgeschwindigkeiten kann später Sand in die Zwickel zwischen den Klasten eingefüllt werden.

Lithofaziestyp Gt (trogförmig geschichtete Konglomerate; Miall 1996)

Beschreibung: Diese dunkelbraunen, schlecht sortierten Konglomerate sind matrixgestützt, die gut gerundeten Klasten haben in der Regel eine Größe von etwa 3 bis 4 cm. Die Matrix besteht aus einem braunen bis dunkelbraunen, schlecht sortierten Sandstein. Eine Gradierung ist selten zu beobachten. Innerhalb der Konglomeratkörper, die als Linsen aufgeschlossen sind, ist eine trogförmige

Schrägschichtung erkennbar. Die Schrägschichtung hat einen Winkel von etwa 30°. Die einzelnen Konglomeratlinsen haben in der Regel eine Größe von 5 m Mächtigkeit und 10 m Länge. Der Kontakt zu den umliegenden Sandsteinen, die dem Lithofaziestyp **Sm** angehören, ist scharf, wobei der seitliche Kontakt weniger deutlich ist. Die Unterseiten der Konglomeratlinsen sind leicht konkav gerundet. Diese trogförmig schräggeschichteten Konglomerate kommen in der Potoco- und in der San Vicente-Formationen vor.

Interpretation: Die Ablagerungen der Lithofazies **Gt** können als proximale Ablagerungen in einem energie- und geröllreichen, verflochtenen Flusssystem interpretiert werden. Miall (1996) beschreibt ähnliche linsenförmige, trogförmig schräggeschichtete Körper von Rinnen kiesdominierter Flusssysteme. Schräggeschichtete Konglomerate können auch als Ablagerungen subaquatischer Kiesdünen und Kiesbänke geschüttet werden (Harms et al. 1982; Collinson & Thompson 1982).

Lithofaziestypen V: vulkanische Ablagerungen

Lithofaziestyp Gvolc (autoclastic breccia, Fisher & Schmincke 1984)

Beschreibung: Autoklastische Brekzien sind klastengestützt und schlecht sortiert. Die einzelnen Klasten, etwa 30 - 50 cm groß, bestehen aus kantigem vulkanischem und klastischem Material. Das vulkanische Material ist dunkelbraun bis dunkelrot und besteht aus aufgearbeiteten Lavabruchstücken und Pyroklastika. In den Zwischenräumen der Klasten ist hellbrauner, tuffitischer Sandstein vorhanden. Die Mächtigkeit dieser autoklastischen Brekzie beträgt 50 m. Sie ist im Streichen sehr weit zu verfolgen, da sie im Gelände eine etwa 20 m hohe Kante aufbaut.

Charakteristisch für die Lithofazies **Gvolc** ist ein erosiver Kontakt zum Liegenden. Assoziiert ist diese Lithofazies mit vulkanischen Sandsteinen der Lithofazies **Seod(v)**. Der Lithofaziestyp **Gvolc** kommt ausschließlich in der basalen San Vicente-Fm. bei San Cristóbal vor.

Interpretation: Nach der Definition von Fischer & Schmincke (1984) ist diese Ablagerung ein Autoklastit. Vulkanoklastische Ablagerungen können während syneruptiver und intereruptiver Zeitintervalle abgelagert werden (Fisher & Schmincke 1984; Lirer et al. 2001; Reading 2002). Die syneruptiven Ablagerungen treten lateral weit verbreitet auf (Smith 1991). Die Lithofazies **Gvolc** ist ein durch vulkanische „Aktivität“ induzierter „debris flows“. Dabei kann klastisches Material erodiert und mittransportiert werden.

Nach Wright & Bowes (1963) ist die beschriebene vulkanische Ablagerung ein Alloplastit, d. h. eine Ablagerung, die bei der Fragmentation von prä-existierenden Gesteinen während einer vulkanischen Aktivität gebildet wird. Für diese Interpretation spricht die Zusammensetzung aus siliziklastischem und vulkanischem Material, die kantigen Klasten und die schlechte Sortierung.

Lithofaziestyp Sv (feinkörniger Tuff, Fisher & Schmincke 1984)

Beschreibung: Feinkörnige Tuffe heben sich im Gelände aufgrund ihrer hellen, weißen Farbe sehr gut von den dunkleren, braunen oder rot-violetten siliziklastischen Sedimente ab. In den laminierten, feinkörnigen Tuffen ist oft vulkanisches Glas zu finden. In der hellen, fast weißen Matrix sind deutlich dunkle, manchmal goldgelbe Biotitkristalle vorhanden. Die Matrix besteht aus vulkanischem Glas. Die

Mächtigkeit dieser feinkörnigen Tuffe beträgt in der Regel einige Zentimeter; sie lassen sich sehr weit im Streichen verfolgen. Feinkörnige Tuffe zeigen einen geringen Verfestigungsgrad. Der Kontakt zu darunterliegenden Siltsteinen oder Sandsteinen ist scharf und konkordant. An der Oberseite der Tuffe kann manchmal ein dunkler Vermischungshorizont mit den darüberliegenden Silt- bzw Sandsteinen beobachtet werden. Feinkörnige Tuffe kommen selten in der Potoco-Fm., vor allem aber in der San Vicente-Fm. vor.

Interpretation: Feinkörnige Tuffe können nach Buesch (1991) als Niederschlag- (Fallout-) Tuffe in einem subaerischen wie auch subaquatischen Milieu abgelagert werden. Feinkörnige Tuffe können ähnlich wie feinkörnige klastische Sedimente als Suspensionsfracht transportiert und danach in einer Überschwemmungsebene abgelagert werden. Der dunkle Aufarbeitungshorizont kann nach Buesch (1991) und Smith (1991) als post-eruptiver Bodenhorizont interpretiert werden.

Lithofaziestyp Svg (grobkörniger Tuff; Fisher & Schmincke 1984)

Beschreibung: Grobkörnige Tuffe sind ähnlich wie die feinkörnigen Tuffe aufgrund ihrer weißen Farbe sehr gut im Gelände zu erkennen. Es handelt sich um kristallreiche Tuffe mit idiomorphen Quarz- und Biotitkristallen. Es können sowohl Tuffe mit frischen, d. h. schwarzen Biotitkristallen wie auch solche mit alterierten, goldgelben Biotitkristallen beobachtet werden. Die Matrix besteht aus Glasbruchstücken. Die Tuffe sind kaum verfestigt. Dieser Lithofaziestyp kann nicht sehr weit im Streichen verfolgt werden. Oft füllen diese vulkanischen Ablagerungen ein Relief, z. B. Rinnen, aus. Der Basiskontakt mit klastischen Sedimenten ist oft unregelmäßig, der Kontakt am Top ist konkordant. Dieser Lithofaziestyp tritt in der San Vicente-Fm. und in der Chocaya-Fm. auf.

Interpretation: Grobkörnige, kristallreiche Tuffe können durch einen explosiven vulkanischen Ausbruch gebildet werden (Reading 2002). Dabei können die Produkte in der Atmosphäre wie im Wasser transportiert werden. Wie die Rinnenfüllungen zeigen, können diese Förderprodukte ein älteres bestehendes Relief ausfüllen (Smith 1991).

3.2 Architekturelemente

Fluviatile Faziesmodelle (u. a. Walker & Cant 1984) beruhen auf einfachen Vertikalprofilen. Miall (1996) betonte, dass bei dieser Methode wichtige Informationen, wie die Flußrinnenmorphologie, Transportprozesse oder die Rinnenverlagerungsvorgänge nur sehr begrenzt abgeleitet werden können. Ein neuerer Ansatz liegt in der Analyse von Architekturelementen (*architectural elements*; Miall 1985), die auf den zuvor definierten und interpretierten Lithofaziestypen basieren. Nach Miall (1996) repräsentieren die Architekturelemente die grundlegenden Sedimentationskörper fluviatiler Ablagerungen und entsprechen den morphologischen Großformen einer Flussebene (*macroforms*, Jackson 1975), wie Flussrinnen, Sandbänken, Gleithängen und Überflutungsebenen. Sie ergeben sich durch eine typische äußere Form und eine ebenso typische Lithofaziesvergesellschaftung.

Einzelne Architekturelemente werden durch Grenzflächen (*bounding surfaces*) voneinander getrennt, die vorwiegend erosiver Natur sind (Miall 1996). Eine Voraussetzung, um diese Grenzflächen im Gelände zu identifizieren, sind zwei-, besser dreidimensional aufgeschlossene Profile. Solche

Aufschlussverhältnisse sind im Süd-Altiplano-Becken nur im Osten bei Chita und Ubina zu finden und sind auf die Potoco-Fm. begrenzt. So können die bei der Analyse der Architekturelemente gewonnenen Informationen mit einiger Vorsicht auch auf andere Profilaufschlüsse übertragen werden.

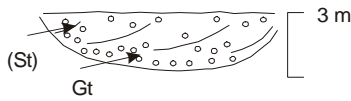
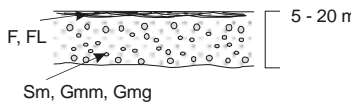

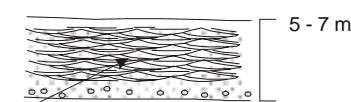
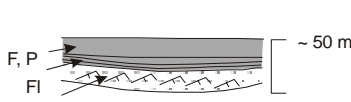
Sketch	Symbol	Typical geometry	Foto Nr.	Lithofacies assemblage	Interpretation
	CH(gr)	Lenses H: 3 m W: 10 m	C8; C9	Gt, Sm	gravelly channel fill
	SS(p)	Sheets H: 5 - 20 m W: 20- X00 m	C6; C7	Sm, (Gmm, Gmg, F, FL)	<i>distal</i> alluvial fan deposits
	CH(s)	Lenses H: 3 m W: 15 m	C5	Gt, Sp, St, (Sr), F	sandy channel fills
	SS(d)	Sheets H: 5 - 7 m W: X00 m	C2	F, Sp, Sr, Sh, Sg, st	<i>distal</i> sheet floods
	FF	Sheets H: 50 m W: X00 m	C1	Fl, (P, Sp, Sr, Sh, Sg) F	floodplains

Abb. 3.1 Übersicht über die Merkmale und die Interpretation der wichtigsten Architekturelemente der Potoco-Fm. im Süd-Altiplano-Becken. Erklärungen der Lithofaziestypen siehe Tab. Nr. 3.1. (Fototafel mit Foto und Beschreibung siehe Anhang)

Kiesdominierte Rinnenfüllungen: CH(gr); (channel, gravel-dominated)

Beschreibung: Das **Architekturelement Ch(gr)** wird von den konglomeratdefinierten Lithofazien **Gt** und **Sm** aufgebaut (Abb. 3.1). Dieses Architekturelement bildet linsenförmige Sedimentkörper, die im Gelände sehr gut zu erkennen sind. Die Unterseiten dieser Sedimentkörper sind deutlich konvex und erosiv ausgebildet. Einzelne Körper sind bis 3 m hoch und etwa 10 m weit lateral zu verfolgen. Dieses Architekturelement ist in der Potoco-Fm. nur im liefergebietsnahen, östlichen Teil des Süd-Altiplano-Beckens in der fünften Einheit ausgebildet.

Interpretation: Das deutliche erosive Einschneiden und die linsenförmige Ausbildung, sowie die trogförmige Schrägschichtung legen die Interpretation dieser Architekturelemente als kiesdominierte Rinnenfüllungen nahe. Die Konglomerate sprechen für eine Ablagerung bei Hochflutabflüssen, die typisch in Flusssystemen in der Nähe von Hochgebieten sind (Jones et al. 2001). Nach den

Flutereignissen werden die Rinnen von umlagernden Sedimenten verfüllt. Die relativ kleinräumigen Elemente sprechen für kurzlebige und ortsstabile Abflussrinnen.

Sandige Ablagerungselemente: SS(p) und SS(d); (sand sheets, proximal und distal)

Dieses Architekturelement kommt in zwei Ausprägungen im Arbeitsgebiet vor: Einmal das proximal interpretierte Architekturelement **SS(p)** und das als distal interpretierte Architekturelement **SS(d)** (Abb. 3.1).

Beschreibung: Das **Architekturelement SS(p)** wird vorwiegend von der grobsandigen Lithofazies **Sm** gebildet. Untergeordnet kommen die konglomeratischen Lithofazien **Gmm, Gmg** und die feinkörnigen Lithofazien **F** und **FL** vor. Die Unterseite dieses Architekturelementes ist erosiver Natur.

Das Architekturelement **SS(p)** weist eine deutliche schicht- oder deckenförmige Geometrie auf. Selten geht die grobsandige Lithofazies **Sm** innerhalb des Architekturelementes **SS(p)** in feinkörnige Sedimente der Lithofazies **F** und **FI** über.

Die Mächtigkeit einzelner Elemente beträgt zwischen 5 bis 20 m und ist lateral bis zu mehrere 100 m weit zu verfolgen. Aufgeschlossen ist dieses Architekturelement im Liefergebietsnahen östlichen Teil des Süd-Altiplano-Beckens, am deutlichsten in den Profillokaltäten Chita und Ubina in der vierten Einheit.

Interpretation: Die schicht- bis deckenförmige Geometrie dieses Architekturelementes weist darauf hin, dass es sich hierbei um Ablagerungen weiträumiger und sich seitlich weit erstreckender Sedimentkörper handelt. Die grobkörnigen Ablagerungen können als proximale Ablagerungen interpretiert werden. Die am Top liegenden feinkörnigen Ablagerungen lassen den Schluß auf in Ruhephasen abgelagerte Sedimente zu. Ähnliche Ablagerungen beschreiben Martins-Neto (1996) und Neef et al. (1996) als Ablagerungen von „debris flows“.

Beschreibung: Das **Architekturelement SS(d)** wird überwiegend von den sanddominierten Lithofaziestypen **Sp, Sr, Sh, Sg, St** und **F**, untergeordnet **Sm**, aufgebaut (Abb. 3.1). Dieses Element bildet deckenförmige Sedimentkörper, die sich über mehrere Meter lateral erstrecken können. Die Mächtigkeit einzelner Deckenkörper variiert zwischen 5 bis 7 m, die laterale Erstreckung reicht mehrere 100 Meter. Erosiv überlagert dieses Element das Architekturelement **FF**. An der Basis sind Ablagerungsstrukturen und Gerölle aus darunter liegendem feinkörnigen Material vorhanden. Am Top wurden an wenigen Lokalitäten Kriechspuren beobachtet. Aufgeschlossen ist dieses Element im östlichen Teil des Arbeitsgebietes, in der zweiten Einheit der Potoco-Fm..

Interpretation: Das Architekturelement **SS(d)** repräsentiert größere, distale alluviale Ablagerungsereignisse. Die sich über mehrere 100 m lateral erstreckenden Sedimentkörper, sowie die an der Basis aufgeschlossenen Gerölle und Strukturen geben wichtige Hinweise auf einen energiereichen Materialtransport. Es ist wahrscheinlich, dass es sich hierbei um die Ablagerung distaler Fächer handelt, die vereinzelt über die Playa-Ebene transgredierte, was durch den erosiven Kontakt zwischen den Architekturelement **SS(d)** und **FF** belegt wird.

Sanddominierte Rinnenfüllungen: CH(s) (channels, sand dominated)

Beschreibung: Das sanddominierte **Architekturelement Ch(s)** wird von den Lithofazien **St**, **Sr** und **Sg** gebildet; untergeordnet kommen die Lithofazien **Gt** und **F** vor (Abb. 3.1). Die Lithofazies **St** stellt den Hauptanteil dar. Die basalen und lateralen Kontakte sind konkav und erosiv. Die Basis wird häufig durch die Lithofazies **Gt** gebildet, am Top kommt die Lithofazies **F** vor. Das Architekturelement **CH(s)** mit Kornverfeinerungsabfolge hat eine linsenförmige Ausbildung mit ca. 3 m Höhe und ~ 10 m Breite. Damit zeigt es ein Breiten/Tiefen-Verhältnis (W/D-ratio) von $\geq 3,3$. Die Sedimentkörper liegen isoliert von feinkörnigen Sedimenten umgeben. Dieses Architekturelement kommt in der dritten Einheit der Potoco-Fm. vor.

Interpretation: Das Architekturelement **CH(s)** wird als sanddominierte Rinnenfüllung interpretiert. Der deutlich erosiv ausgebildete Basiskontakt sowie die oft auftretenden Basisgerölle belegen ein erosives Einschneiden in die umlagernden, feinkörnigen Sedimente. Die einzelnen Rinnen wurden von subaquatischen 3-Dünen verfüllt. Die isolierten Körper deuten auf kurzfristig aktive Flussrinnen. Ihre gute Erhaltung spricht für eine rasche vertikale Verfüllung. Jordan (1995) interpretierte solche Sedimentkörper als proximale Ablagerungen in der Nähe eines Falten- und Überschiebungsgürtels.

Rinnenferne Hochflutabsätze: FF

Beschreibung: Das Architekturelement **FF** wird durch Lithofaziestyp **F** dominiert, untergeordnet kommen die Lithofaziestypen **FL** und **Sr** vor (Abb. 3.1). Die Sedimentkörper dieses Architekturelements sind mehrere 100 m bis Kilometer lateral verfolgbar. Ihre Mächtigkeiten erreichen Werte von 50 m bis maximal 150 m. Dieses Architekturelement bildet deckenförmige, feinkörnige Sedimentkörper, in die vereinzelt geringmächtige sanddominierte, ebenfalls deckenförmige Sedimentkörper mit einer Mächtigkeit von einigen cm und einer lateralen Erstreckung von mehreren hundert Metern eingeschaltet sind. Dieses Architekturelement bildet die erste Einheit der Potoco-Fm. im Osten und die gesamte Potoco-Fm. im zentralen Süd-Altiplano-Becken.

Interpretation: Die deckenförmige Ausbildung dieses Architekturelementes und die hohen Mächtigkeiten lassen den Schluss zu, dass diese Sedimente in einem weiträumigen und über längere Zeiträume niedrigerenergetischen Sedimentationsraum abgelagert wurden. Ebenso lassen die feinkörnigen Sedimente die Interpretation als distale Ablagerung zu.

Dieses Architekturelement repräsentiert rinnenferne Überflutungsbereiche. Die Sedimentfracht wurde entweder bei Hochfluten der aktiven Flussrinnen durch Überspülen der nahen Uferbereiche oder als Schichtflut-Sediment (*sheet flood-sediments*) als Suspensionsfracht in den Ablagerungsraum eingebracht.

3.3 Ablagerungsmodelle und Faziesvergesellschaftung

Die hier vorgestellten Faziesvergesellschaftungen repräsentieren vorwiegend kontinentale Ablagerungsräume eines im wesentlichen ariden Klimas. Die vorgestellten Lithofaziestypen werden zu Faziesvergesellschaftungen gruppiert und dienen gemeinsam mit den Architekturelementen (vergl. Kap. 3.2) zur Charakterisierung der Ablagerungsräume. In den bearbeiteten paläozänen bis miozänen

Sedimenten werden insgesamt sieben übergeordnete Ablagerungsräume differenziert und getrennt beschrieben. Einzelne Faziesvergesellschaftungen kommen in mehreren Formationen vor. Im folgenden werden die in Frage kommenden Ablagerungsmodelle anhand von Literaturangaben kurz vorgestellt, um später speziell auf die Ablagerungsmodelle der untersuchten Sedimentgesteine einzugehen.

Vorstellung der Ablagerungsmodelle

3.3.1 Alluvialer Ablagerungsraum

Alluviale Fächer sind i. allg. halbkegelförmige, terrestrische Sedimentkörper (Abb. 3.2). Sie werden aus einem zentralen Zufluss bzw. Abflusssystem gespeist. In der Regel dehnen sich alluviale Fächer radial vom Durchtrittspunkt des Zuflusses durch die Gebirgsfront aus (Blair & McPherson 1994). Alluviale Fächer bestehen meist aus grobkörnigem, schlecht sortiertem und schlecht gerundetem Material, obwohl auch alluviale Fächer in der Literatur beschrieben werden, die aus feinkörnigem Material bestehen (Blair & McPherson 1994). Dies ist abhängig von den Materialeigenschaften des Gebirges. Man unterscheidet beim Transportmechanismus fluidisierte Gravitationsströme, z. B. „sheet floods“ und „incised-channel floods“, sowie korngestützte Gravitationsströme, z. B. „rockfalls“, „rock slides“, „rock avalanches“ und „debris flows“. Der alluviale Fächer kann in einen proximalen, einen mittleren und einen distalen Bereich gegliedert werden.

Der alluviale Ablagerungsraum kommt in der Potoco-, in der San Vicente- und in der Chocaya-Formation vor.

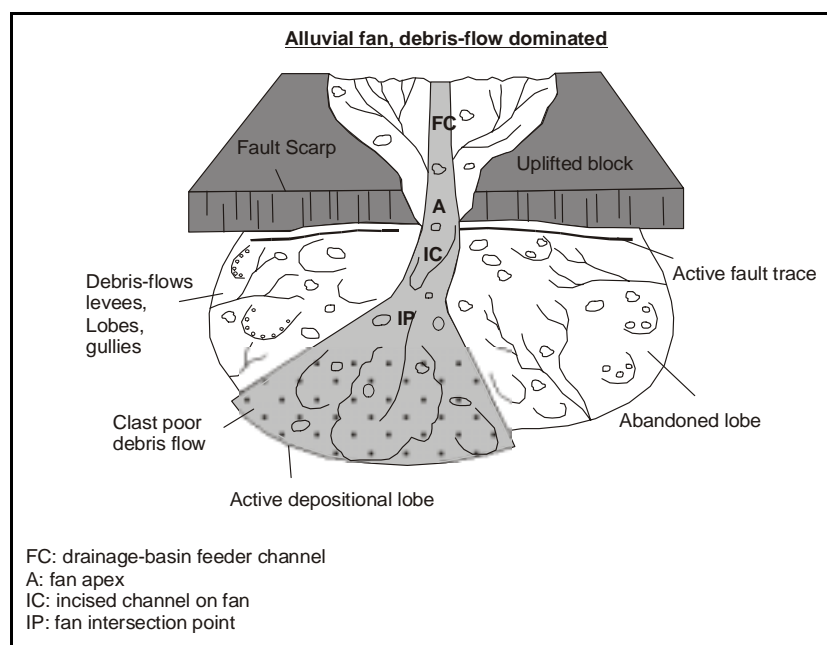


Abb. 3.2 Alluvialer Ablagerungsraum. Die Skizze zeigt einen bevorzugt grobkörnigen, „debris-flow“-dominierten Fächer (umgezeichnet nach Blair & McPherson 1994).

3.3.2 Fluvialer Ablagerungsraum

Der fluviale Ablagerungsraum lässt sich i. allg. in vier grundlegende Flusssysteme einteilen (Abb. 3.3; Miall 1977). Diese vier Grundtypen sind das **mäandrierende** (*meandering*), das **verflochtene** (*braided*), das **gerade** (*straight*) und das **anastomisierende** (*anastomosing*) Flusssystem. Miall (1996) definierte 16 bzw. 20 fluviale Faziesmodelle, die auf Vertikalprofilen basieren. Allerdings betonte Miall (1996), dass zwischen den einzelnen Faziesmodellen Übergänge möglich sind. Da viele Ablagerungsmodelle ähnlich sind, ist eine 2- bzw. 3-dimensionale Architekturelementanalyse notwendig (Kap. 3.2).

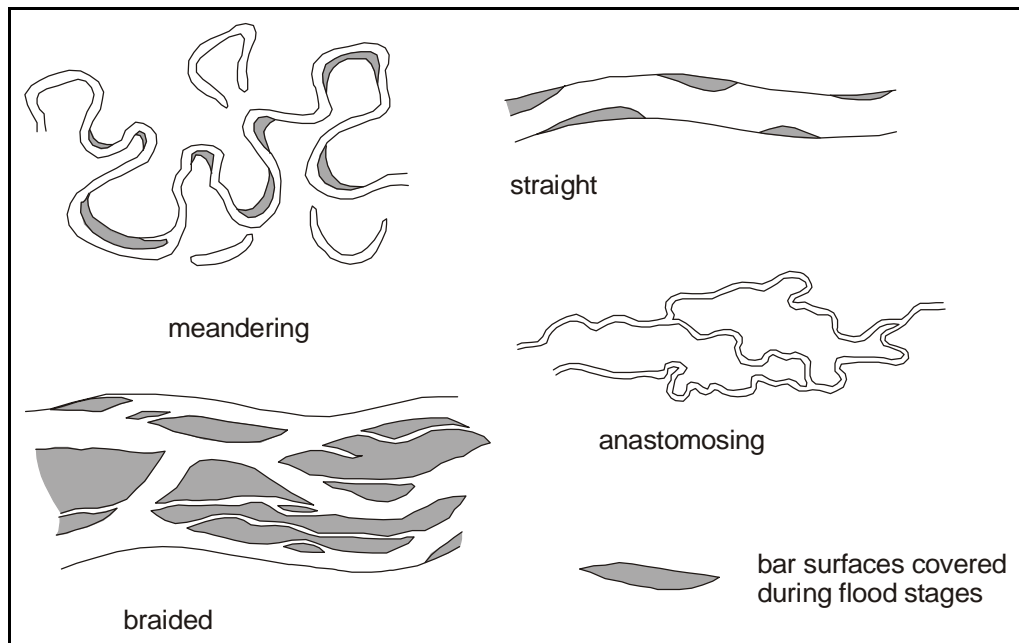


Abb. 3.3 Die vier wichtigsten Flusssystemtypen (Miall 1985).

3.3.2.1 Mäandrierende Flusssysteme

Zu diesem System gehören nach Allen (1964) und Miall (1985) eine Vielzahl definierter Ablagerungsbereiche, so:

- a) Rinnen (*channels*)
- b) Uferwälle (*natural levees*), Uferwalldurchbruchsfächer (*crevasse splays*)
- c) Überflutungsebenen (*flood plains*)
- d) Gleithänge (*point bars*)
- e) Hochwasserbänke (*chute bars*), Hochwasserrinnen (*chute channels*)

Rinnen (*channels*)

Die Rinnen mäandrierender Flüsse besitzen an der Basis grobkörnige Gerölle (*lag deposits*), die undeutlich geschichtet, selten schräggeschichtet sind. Oft ist eine dachziegelartige Lagerung vorhanden. Die Gerölle können sich auch in Kolklöchern (*scours*) sammeln. Über die Gerölle und/oder über die Rinnenbasis können 3-D Dünen wandern. Die Ablagerungen aus solchen 3-D Dünen zeigen eine trogförmige Schrägschichtung.

Die Ablagerungen der Überschwemmungsebenen, die in der Nähe oder auch etwas weiter entfernt von der aktiven Rinne liegen, können in rinnennahe und in rinnenferne Ablagerungsbereiche unterteilt werden. Beide Ablagerungsbereiche werden als „**overbank deposits**“ bezeichnet.

Rinnennahe Ablagerungsbereiche werden in die natürlichen **Uferwälle** (*natural levees*) und die **Uferdammdurchbruchsfächer** (*crevasse splays*) unterteilt. Zu den rinnenfernen Ablagerungsbereichen zählen die weiträumigen **Überflutungsebenen** (*flood plains*). Da Uferwälle und Uferdammdurchbruchsfächer in der Nähe der aktiven Rinne liegen, sind diese meist durch grobkörnige Sedimente charakterisiert. Rinnenferne Ablagerungsbereiche zeichnen sich durch feinkörnigere Sedimente aus.

Bei grösseren Überflutungsereignissen reichen die Schüttungsfächer weit in die Überflutungsebenen hinein. Interne Strukturen, wie Rippel- und Horizontallamination geben in den abgelagerten Sedimentkörpern Hinweise auf abnehmende Strömungsenergien (Allen 1965; Rust & Kostner 1984). Ein Großteil der Ablagerung in **Überflutungsebenen** (*floodplains*) geschieht während Überflutungsereignissen. Die Sedimente werden in Suspension transportiert. Ein nicht geringer Anteil wird auch als **Staub** (*windblown dust*) in diesen Ablagerungsbereich hineinverfrachtet. Allerdings werden viele Überflutungsebenen von **Seen** (*floodplain lakes*) bedeckt. Diese Wässer stammen aus starken Regenfällen oder von ausufernden Flüssen.

Gleithänge (*point bars*)

Gleithänge entstehen an den Innenseiten der Flussbiegungen. Wichtige Merkmale sind nach oben abnehmende Korngrößen (*fining-upward-sequence*) und eine abnehmende Grösse der Sedimentstrukturen (Allen 1970 & 1982). Am Top können sich Bodenhorizonte bilden. Diese Ablagerungen können sich lateral mehrere hundert Meter ausbreiten.

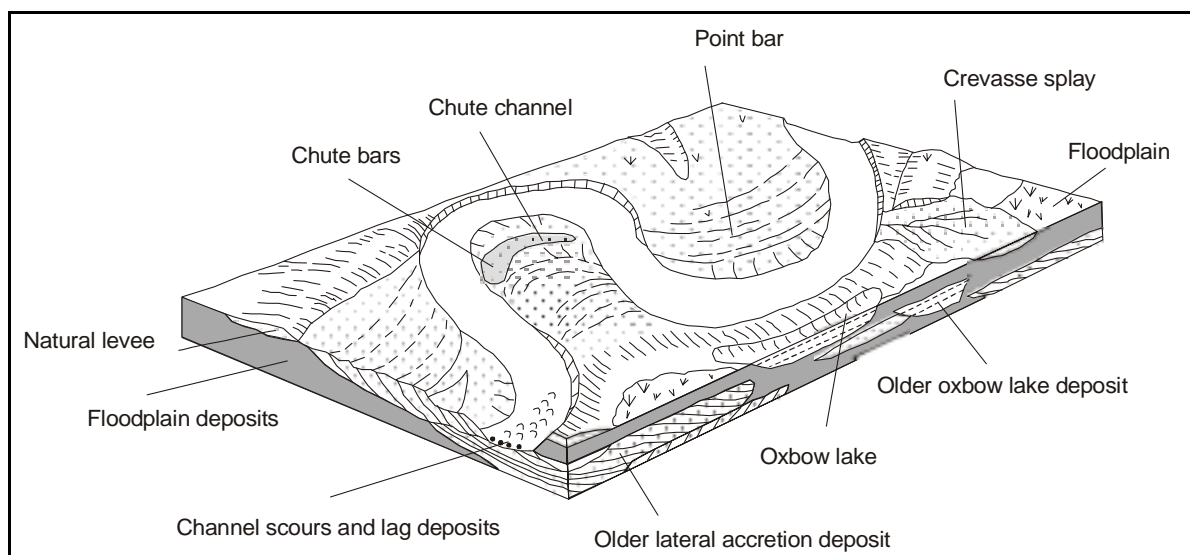


Abb. 3.4 Modell eines mäandrierenden Flusses und die dazu gehörenden Ablagerungsbereiche (verändert nach Allen 1964; Miall 1985).

Hochwasserbänke (*chute bars*)

Bei Hochwasser können die Gleithänge der Flüsse von **Hochwasserrinnen** (*chute channels*) durchbrochen werden. Dabei entstehen **Hochwasserbänke** (*chute bars*). Die Hochwasserbänke zeichnen sich meistens durch grobkörnigere Sedimente aus, die auf eine höhere Transportenergie schließen lassen.

3.3.2.2 Verflochtene Flusssysteme (braided rivers)

Nach Miall (1977 & 1985) bestehen verflochtene Flusssysteme aus einer Anzahl einzelner Flussrinnen. Diese Flussrinnen werden von **Flussbänken** (*bars*) und Inseln voneinander getrennt. Diese Sedimentkörper bestehen oft aus Kies und Sand. Feinkörnige Sedimente können auf Sandbänken und zwischen den aktiven Flussrinnen abgelagert werden. Sie bestehen aus tonig-siltigem Material.

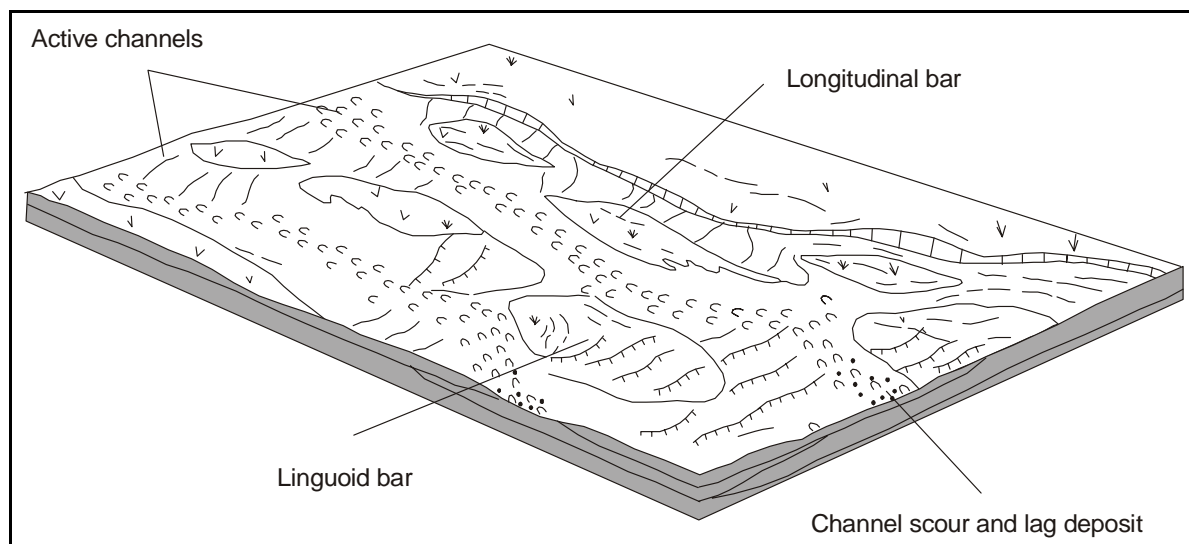


Abb. 3.5 Verflochtene Flusssystem (verändert nach Miall 1977).

Wie bei den mäandrierenden Flusssystemen können auch in verflochtenen Flusssystemen an der Basis der Rinnen Gerölle mitgeführt und abgelagert werden. Diese werden als „lag deposits“ bezeichnet. In den tieferen Bereichen der Flussrinne können 3-D-Dünen als Sedimentkörper langgestreckte Bänke, die parallel zur Strömungsrichtung liegen, bilden. Sie werden als **longitudinale Flussbänke** (*longitudinal bars*) bezeichnet. Sie sind vor allem in proximalen Bereichen kiesdominierter verflochtener Flüsse zu finden (Rust & Koster 1984; Collinson 1986). Oft haben diese longitudinalen Flussbänke in der Aufsicht eine Rautenform. Als interne Sedimentstrukturen kommen trogförmige- und parallelförmige Schrägschichtung vor.

Transversale Flussbänke (*transverse bars*) liegen in der Flussrinne etwa senkrecht zur Fließrichtung (Collinson 1986). Eng mit den transversalen Flussbänken verwandt und von diesen kaum zu unterscheiden sind **linguoidale Flussbänke** (*linguoid bars*). Diese sind etwas schräg zur Fließrichtung angeordnet. Beide sind meist planar-tafelförmig schrägschichtet, im oberen Bereich

zeigen sie Rippelschichtung (Miall 1977; Cant & Walker 1978). Diese besitzen geschwungene Kämme und trogförmig schräggeschichtete Sedimentstrukturen.

An den Rinnenseiten abgelagerte Sandbänke werden als „**side bars**“ oder „**alternate bars**“ bezeichnet (Harms & Fahnenstock 1965). Diese Sandbänke werden durch ähnliche Prozesse gebildet wie die Gleithangablagerungen (*point bars*) bei mäandrierenden Flusssystemen. Diese Sandbänke sind sehr häufig in sanddominierten, verflochtenen Flusssystemen.

Verflochtene Flusssysteme (*braided river*) werden durch kurzzeitige, aber starke Abflussschwankungen begünstigt (Walker & Cant 1984; Miall 1992). Typisch sind verflochtene Flüsse in semiariden, ariden und nivalen Klimazonen (Füchtbauer 1988; Miall 1992). Anders als bei mäandrierenden Flüssen fördert eine stärkere Geländeneigung die Bildung verflochtener Flüsse (Walker & Cant 1984). Nach Miall (1992) begünstigen eine hohe Sedimentmobilität und Sedimentverfügbarkeit sie ebenfalls.

3.3.3 Äolischer Ablagerungsraum

Die Unterscheidung fossiler äolischer von aquatischen Sandsteinen ist relativ schwierig und sollte nach Mader (1983 & 1985) und Selley (1985) auch auf negativen, also auf aquatischen Transport ausschliessenden Kriterien basieren.

Äolische Sedimente können in mehreren Bereichen abgelagert werden. Diese sind: Dünen, Zwischendünenbereichen und Sanddecken (Ahlbrandt & Fryberger 1982). Dünen können in mehrere Typen unterteilt werden, so in Einzeldünen (*simple dunes*), aus mehreren gleichartigen Dünen bestehen (*compound dunes*) und aus mehreren Dünentypen aufgebaut sein (*complex dunes*) (McKee 1979). Zwischen einzelnen Dünen können trockene, nasse und evaporitische Ablagerungen vorkommen (Ahlbrandt & Fryberger 1981 & 1982). Merkmale, die Hinweise auf eine äolische Entstehung liefern, sind Sedimentstrukturen, der Profilaufbau und die Faziesbeziehungen sowie die Textur bzw. die Mineralogie der Sedimente.

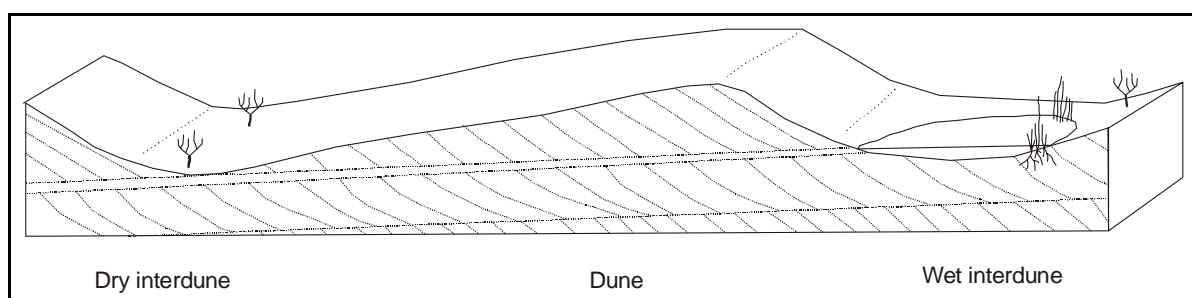


Abb. 3.6 Äolischer Sedimentationsbereich (verändert nach Ahlbrandt & Fryberger 1982).

Nach Kocurek (1991) wird den Sedimentstrukturen der höchste Aussagewert zugesprochen. Typisch für äolische Ablagerungen sind Laminationen, die durch das Abregnen von Körnern am Leehang (*grainfall*) oder durch Windrippeldrift entstehen (Kocurek 1991). Schrägschichtungslaminae, die nach oben konvex ausgebildet sind, sind nach Collinson & Thompson (1982) in vielen äolischen Dünentypen aufgeschlossen. Steile Schrägschichtungswinkel von 30° bis 35° werden aus rezenten

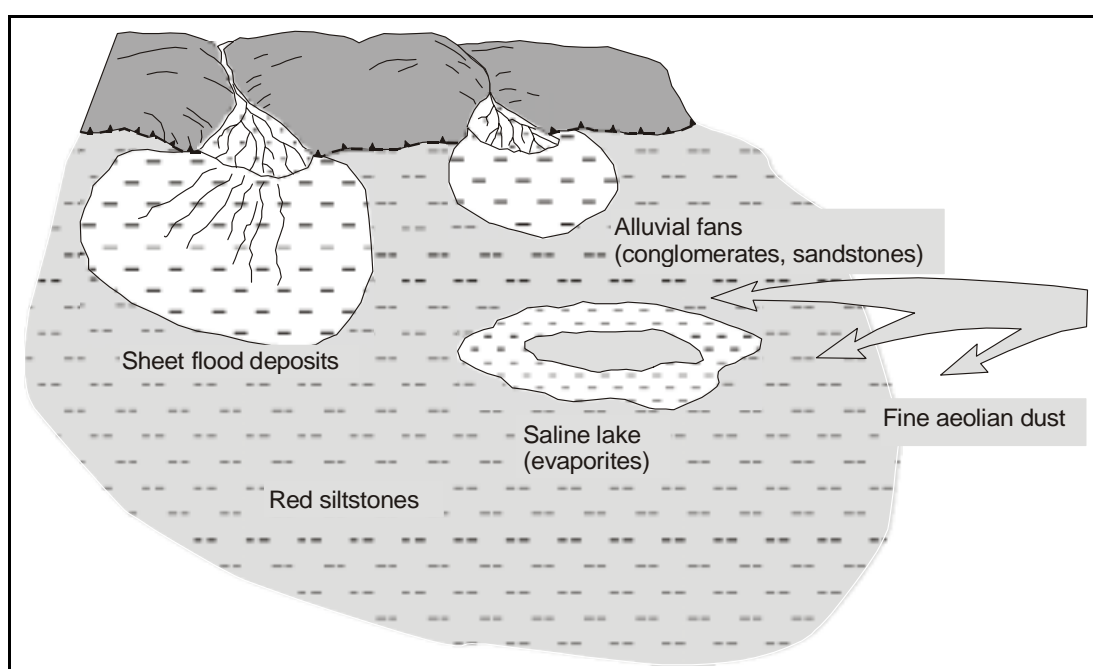
und fossilen Dünensedimenten beschrieben (McKee 1966). Oft bilden äolische Ablagerungen schräggeschichtete, aufeinandergestapelte Sandsteinkörper, die durch wiederholte Reaktivierungsflächen intern gegliedert sind (Brookfield 1977). Sie sind horizontal ausgebildet, können aber auch flach in Windrichtung einfallen (Brookfield 1977).

Äolische Sande sind gut sortiert. Die Korngröße reicht in der Regel von fein- bis mittelkörnig, es werden aber auch grobkörnige äolische Sande beschrieben (Scherer 2000). Die Körner sind gut gerundet und haben oft eine matte Oberfläche (Cailleux 1942; McKee 1979). Erschwerend ist die Identifizierung äolischer Ablagerungen, wenn eine Sedimentherkunft aus aufgearbeiteten, benachbarten Sedimentationsbereichen (z.B. fluviatiler Sedimente) oder aus vulkanischen Eruptionszentren stattfindet. Dann können höhere Gehalte an Glimmern, bzw. Feldspäten in den äolischen Sedimenten enthalten sein, die die Kriterien zur Sortierung, Größe usw. nicht erfüllen.

3.3.4 Lakustriner Ablagerungsraum

Eine Vielzahl von siliziklastischen Sedimenten, die in Seen sedimentiert werden, werden von Flüssen in Form von Suspension oder als Bodenfracht dorthin verfrachtet. Der äolische und/oder vulkanische Einfluss ist ebenfalls von Bedeutung. In direkter Abhängigkeit vom Klima bestimmen Natur und Größe des umliegenden Entwässerungssystems die Größe des Sees, die Menge des Sedimenteintrags, Saisonabhängigkeit der Ablagerung und Anteil chemischer/biologischer Sedimente.

Weiträumige **Playas** oder **inland sabkhas** (*sand- oder mudflats*) sind charakteristisch in der Umgebung von Salzseen. Die Ebenen sind meistens trocken; von Wasser bedeckt sind diese nur während **Überflutungsperioden** (*floods*). Ein großer Teil des Sedimenteintrags ist fluviatilen Ursprungs, der von „sheet floods“ eingebracht wird. Smoot & Castens-Seidell (1994) berichteten allerdings, dass ein ebenfalls großer Sedimenteintrag als **äolisch transportierter Staub** (*windblown dust*) eingetragen wird.



vorherige Seite Abb. 3.7 Playa-Sedimentationsbereich (verändert nach Talbot et al. 1994). Dieser Sedimentationsbereich wird vom fluviatilen, vom äolischen und vom alluvialen Sedimentationsbereich beeinflusst. Dargestellt ist eine Playa- mit dem äolischen und alluvialen-Sedimentationsbereich.

3.4 Ablagerungsmodelle der untersuchten Formationen

3.4.1 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Santa Lucía-Fm. (Abb. 3.7)

Bei Ubina ist ein fluviatiler Ablagerungsraum, genauer eine Überflutungsebene, (Lft's St, Sr, Fl und P) überliefert. Die Anwesenheit von Paläoböden, Lithofaziestyp P, wird häufig mit Mäander-Systemen und Überflutungsebenen interpretiert. Bei Chita lassen die dort vorkommenden Lithofaziestypen (Lft's Gt/h, Sp, F) auf eine Nähe zur Rinne schließen. Horton & DeCelles (2001) interpretieren in der Ostkordillere Boliviens ähnliche Abfolgen als „overbank“-Ablagerungen. Über dem fluviatilen Ablagerungsraum kommt bei Chita noch ein lakustriner Ablagerungsraum, (Lft's Cfos, untergeordnet St und Sr) vor. Die Vergesellschaftung mit Sandsteinen der Lithofaziestypen St und Sr spricht für ein enges Zusammenspiel zwischen fluviatilen und lakustrinen Ablagerungsbedingungen.

Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum	Profile
Sandsteine, Sandsteine wechsellagernd mit Siltsteinen, Siltsteine	(Gt/h), Sp, F, Fl,	Fluviatil, „overbank area“	Chita
Karbonate mit Fossilien	(St, Sr,) Cfos	Lakustrin	Chita
Sandsteine, wechsellagernd mit Siltsteinen, Paläoböden	St, Sr, Fl, P	Fluviatil, „overbank area“	Ubina
Konglomerate, Sandsteine, Siltsteine	Gt/h, St, Sr, Fl	Fluviatil-Mäander	Animas/Atocha

Tab. 3.1 Die Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Santa Lucía-Fm..

3.4.2 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Cayara-Fm. (Abb. 3.8)

Die Faziesvergesellschaftung der Cayara-Fm. besteht bei Chita aus einem Basiskonglomerat, (Lft Gt/h), das zum Top fließend in trogförmig schräggeschichtete Sandsteine (Lft St) und gerippte Sandsteine (Lft Sr) übergeht. Untergeordnet kommen planar-schräggeschichtete Sandsteine (Lft Sp) vor. Bei Ubina und Lokalitäten weiter südlich, wie Animas und Atocha, sind klastengestützte Konglomerate (Lft Gt) aufgeschlossen, die in trogförmig schräggeschichtete Sandsteinen (Lft St) und in planar-schräggeschichtete Sandsteinen (Lft Sp), übergehen. Diese Abfolge wird als Faziesvergesellschaftung eines Mäanders interpretiert, da sie mit aus der Literatur beschriebenen (Allen 1970) große Ähnlichkeiten aufweist. „Point-bar“-Sequenzen, die durch laterale Migration der Flussrinne entstehen, zeichnen sich noch durch eine „fining-upward“-Sequenz, Mächtigkeit und Faziesfolge aus und sind besonders gut mit der in Chita erschlossenen Abfolge zu vergleichen. Die Konglomerate passen sich als Basiskonglomerat zwanglos in diese Interpretation ein.

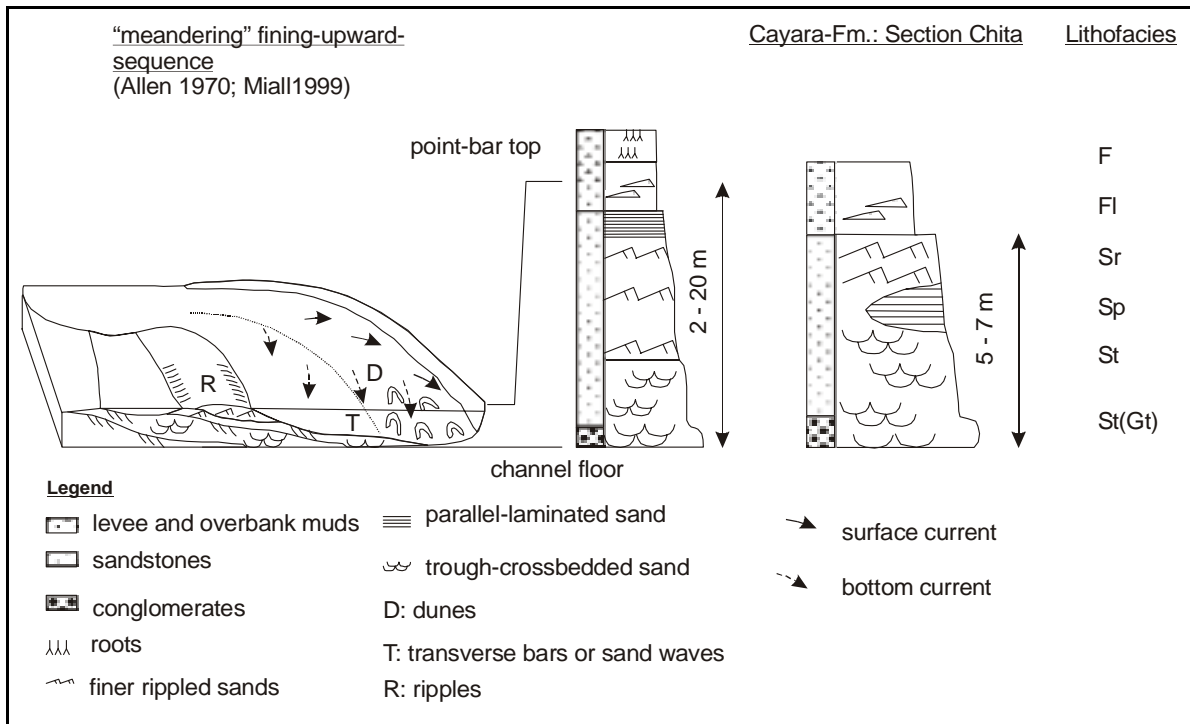


Abb. 3.8 Typische vertikale „fining-upward“-Sequenz eines Mäanders (Allen 1970; Miall 1999). Ähnliche Abfolgen finden sich in der Cayara- und Santa Lucía-Formationen (Erklärung der Lithofaziestypen siehe Tab. 3.1)

Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum	Profil
Konglomerate, Sandsteine	St (Gt/h), Sr, Sp, (FI, F)	Akkretion von „point bar“-Sequenzen, Mäander	Chita
Konglomerate Sandsteine	Gt, St, Sp	Mäander	Animas, Atocha

Tab. 3.2 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Cayara-Fm..

3.4.3 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Potoco-Fm.

Im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens wird die Potoco-Fm. in 5 Einheiten unterteilt (Kap.: 2.3.3). Jede dieser Einheiten weist individuelle Eigenschaften hinsichtlich der Sedimente, der Lithofaziestypen, der Faziesvergesellschaftungen und zuletzt der Architekturelemente auf. Im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens sind diese Einheiten nicht zu unterscheiden. Hier kommt nur ein Architekturelement vor. Im Westteil des Süd-Altiplano-Beckens ist die Abfolge verglichen mit der Ostsequenz vermutlich nicht komplett, die Potoco-Fm. ist nicht vollständig aufgeschlossen. Im Süden zeigt die Potoco-Fm. eine ähnliche Faziesvergesellschaftung wie im Ostteil. Es ist wahrscheinlich, dass dort die Potoco-Fm. in einem ähnlichen Ablagerungsraum sedimentiert wurde.

Die Potoco-Fm. im Ostteil

Basis: Erste Einheit: distaler Playa-Ablagerungsbereich (Abb. 3.9)

Diese Basiseinheit der Potoco-Fm., max. 2000 m mächtig, wird durch Ablagerungen einer Überflutungsebene und durch das Architekturelement FF repräsentiert (Abb. 3.1). Während im unteren

Teil dieser ersten Einheit der Lft FL überwiegt, tritt im oberen Teil dieser ersten Einheit der Lft F deutlich hervor, ein Hinweis darauf, dass der Ablagerungsraum sich zunehmend weiter vom Liefergebiet entfernte bzw. das Relief verflachte. Innerhalb dieser Abfolge sind 50 - 150 m mächtige Teilbereiche zu erkennen, die durch jeweils feinkörnige Sandsteine an der Basis mit darüberfolgenden Siltsteinen charakterisiert sind. In diesen Siltsteinen sind als Paläoböden interpretierte Ablagerungen zu finden. Die gradierten Sandsteine (Lft Sg) können als Ablagerungen in einer relativen Nähe zur aktiven Rinne interpretiert werden.

Eine ähnliche Faziesvergesellschaftung interpretiert Horton (2001) als Ablagerungen von Uferdammdurchbruchsfächern.

Zweite Einheit: relativ proximaler Playa Ablagerungsbereich (Abb. 3.9)

Charakteristisch für diese zweite Einheit der Potoco-Fm., max. 1000 m, ist eine Wechsellagerung der Architekturelemente SS und FF. Die Mächtigkeiten dieser Architekturelemente liegen in der Regel zwischen 5 bis 7 m. An der Basis des Architekturelementes SS sind aufgearbeitete Siltsteingerölle und Kolkmarken aufgeschlossen. Die Zunahme der Sandsteinhorizonte und die Anwesenheit der Siltsteingerölle an der Basis des Architekturelementes SS können als „sheet floods“ eines distalen alluvialen Fächers interpretiert werden. Die Gerölle geben Hinweise auf einen temporären, energiereichen Transport. Dieses Architekturelement geht am Top in das Architekturelement FF über.

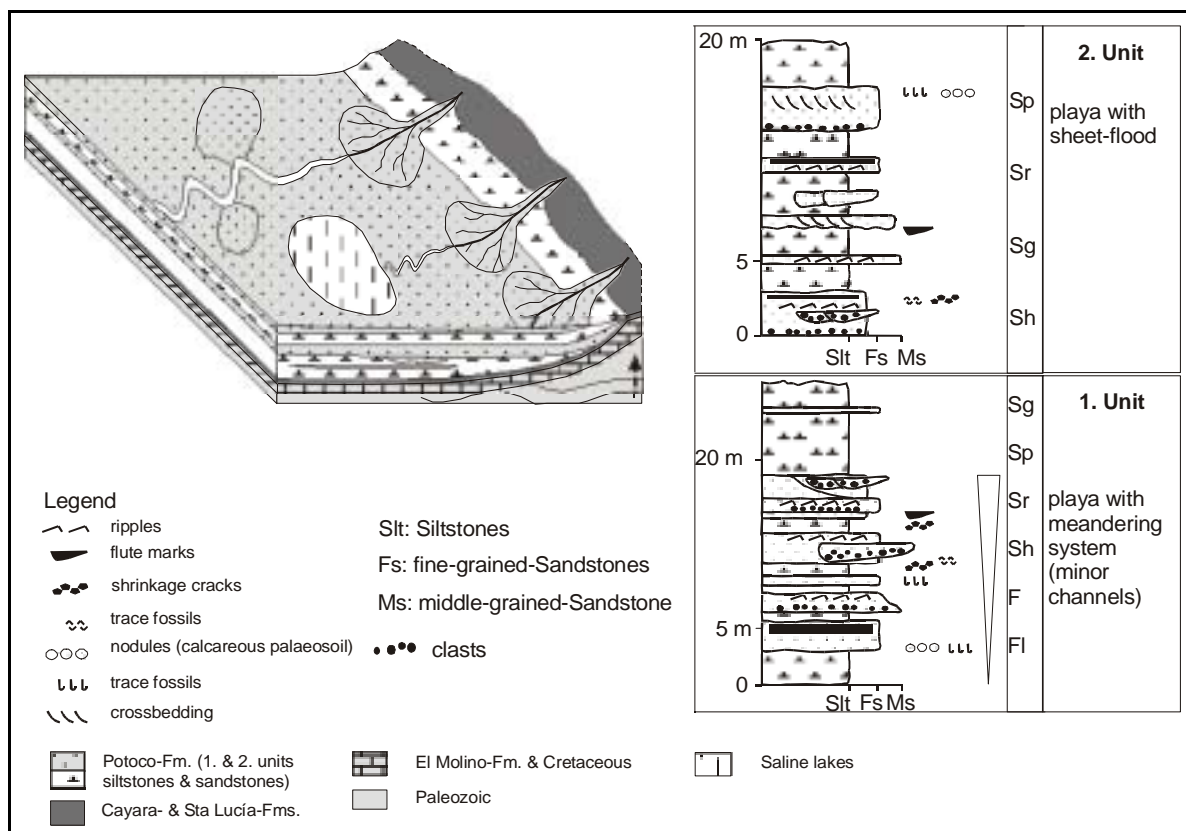


Abb. 3.9 Ablagerungsraum der basalen Potoco-Fm. im gesamten Süd-Altiplano-Becken. Dargestellt sind charakteristische Teilprofile der Potoco-Fm. mit den Lithofaziestypen der ersten und zweiten Einheit und der darausfolgenden Interpretation des Ablagerungsraumes (Erklärung der Lithofaziestypen Tab. 3.1).

Dritte Einheit: fluviatiler Ablagerungsbereich, speziell das eines Mäanders (Abb. 3.10)

Das vorherrschende Architekturelement in dieser dritten, max. 1200 m mächtigen Einheit ist das sanddominierte Architekturelement CH(s). Die Basiskonkontakte dieser Rinnenelemente sind erosiver Natur. Die Mächtigkeit einzelner Elemente liegt bei 3 m Höhe und etwa 15 m Breite, sie erreichen damit eine Width/Depth-ratio von ~ 5. Interpretiert werden diese Elemente als Füllungen fluviatiler Rinnen. Die umliegenden Siltsteine können als „overbank“-Sedimente interpretiert werden.

Vierte Einheit: distaler, alluvialer Ablagerungsbereich (Abb. 3.10)

In dieser vierten Einheit kommen mehrere sandsteindominierte Architekturelemente SS vor. Die grobkörnigen Sedimente, die deutlichen erosiven Basiskonkontakte sowie die charakteristische Faziesvergesellschaftung sprechen für eine Ablagerung in nächster Nähe zum Hochgebiet. Der erosive Basiskonkontakt spricht für einen energiereichen Transportmechanismus.

Die zwischen den einzelnen Architekturelementen aufgeschlossenen Siltsteine, Lft's FI und F lassen zwischen den einzelnen „debris-flows“-Ereignissen auf ruhige Ablagerungsbedingungen schließen.

Bei Ubina erreicht diese vierte Einheit maximale Werte von 1200 m.

Sedimente, Sedimentationsstrukturen	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum	Architekturelement	Einheit
Konglomerate als Rinnenfüllungen, eingebettet in grobkörnige, massige Sandsteine	Gt, Sm	verzweigtes Flusssystem	CH(gr), (SS(p))	Top 5. Einheit
dickbankige, massige, konglomeratische Sandsteine, selten Siltsteine und Konglomerate	Sm, (untergeordnet Gmm, Gmg, F, FI)	Alluvial, proximal (Ablagerungen eines alluvialen Fächers, „sheet floods“)	SS(p)	4. Einheit
Sandsteine als Rinnenfüllungen mit „fining-upward“-Sequenzen, eingebettet in Siltsteine	Gt, Sp, St, (Sr), F	Fluviatil, Mäander	Ch(s)	3. Einheit
Wechsellagerung von gleichmächtigen Sand- und Siltsteinhorizonten, „fining-upward“-Sequenzen, Schrägschichtung, Lamination	F, Sp, Sr, Sh, Sg, St	Playa, distal (Ablagerungen eines distalen alluvialen Fächers)	SS(d) und FF	2. Einheit
Siltsteine, geringmächtige Sandsteinhorizonte mit Rippeln, Schrägschichtung und/oder Lamination	FI, (untergeordnet P, Sp, Sr, Sh, Sg) F	Playa, distal (Ablagerungen in einer Überflutungsebene)	FF	Basis 1. Einheit

Tab. 3.3 Typische Abfolge, Faziesvergesellschaftungen, Architekturelemente und Ablagerungsräume der Potoco-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens. Erklärung der Lithofaziestypen Tab. 3.1.

Top Fünfte Einheit: fluviatiler Ablagerungsbereich, speziell das eines verzweigen Flusssystems (Abb. 3.10)

Das Architekturelement CH(gr) bildet das charakteristische Merkmal dieser fünften Einheit der Potoco-Fm.. Das Breiten/Höhen-Verhältnis (W/D-ratio) dieser Architekturelemente beträgt ~ 3,3. Die deutliche rinnenförmige Ausbildung dieses Architekturelementes CH(gr), sowie die trogförmig schräggeschichteten Konglomerate (Lft Gt) werden als fluviatile Ablagerungen interpretiert. Die

umliegenden Sandsteine (Lft Sm), Architekturelement SS, lassen den Schluss zu, dass sich dieses Flusssystem auf einem alluvialen Fächer, wie in der vierten Einheit, gebildet hat. Die grobkörnigen Sedimente, die Nähe zum Hochgebiet und die rinnenförmigen Strukturen lassen die Existenz eines verzweigten Flusssystemes zu. Die Mächtigkeit dieser fünften Einheit der Potoco-Fm. erreicht maximale Werte von 400 m.

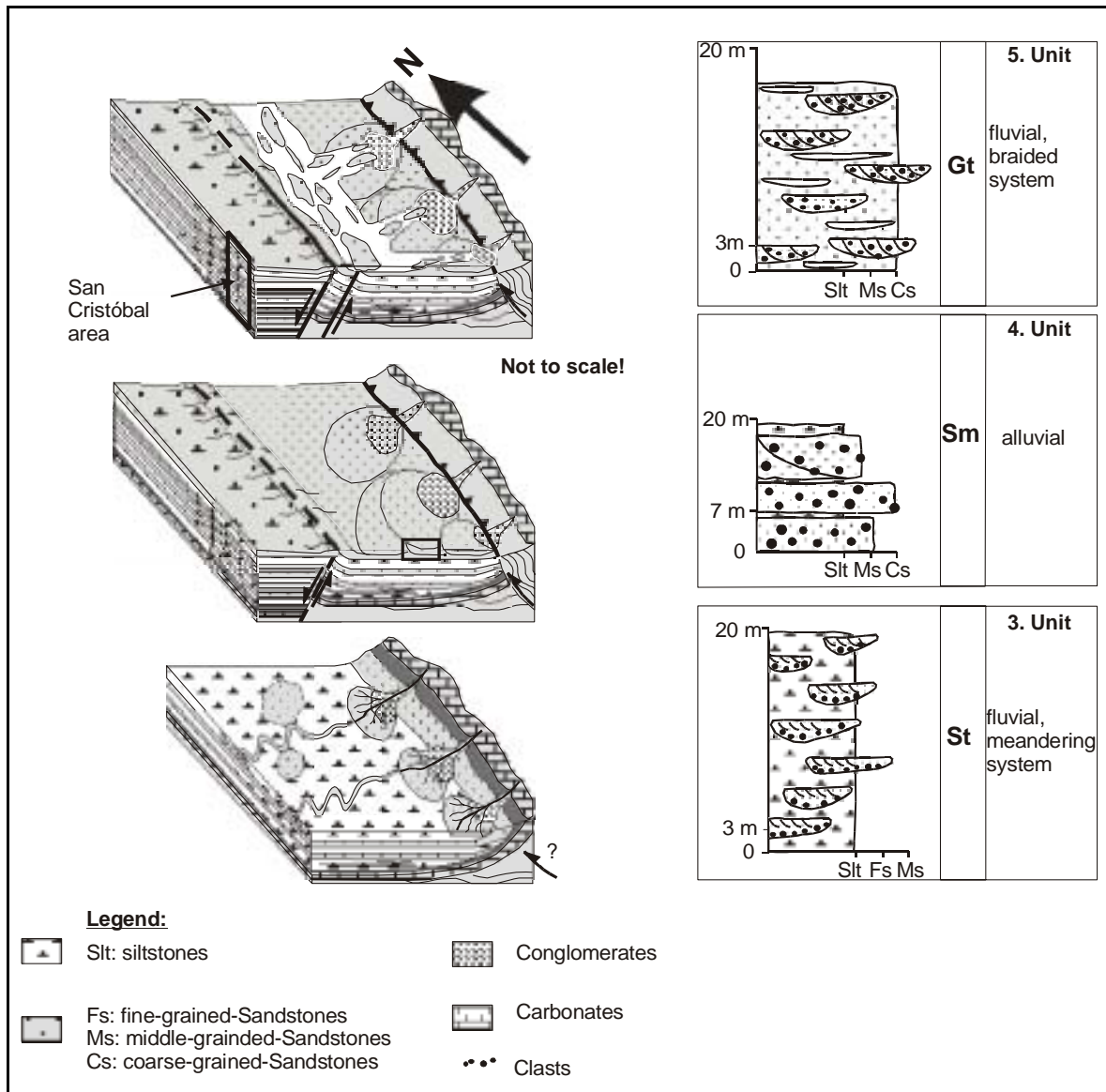


Abb. 3.10 Ablagerungsraum der oberen Potoco-Fm. im gesamten Süd-Altiplano-Becken. Dargestellt sind typische Teilprofile der jeweiligen Einheit der Potoco-Fm. sowie die Lithofaziestypen und die daraus interpretierten Ablagerungsräume (Erklärung der Lithofaziestypen Tab. 3.1; Legende siehe Abb. 3.9).

Die Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Potoco-Fm. im Zentrum des Süd-Altiplano-Beckens (Abb. 3.10)

Im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens kommt ausschliesslich eine Faziesvergesellschaftung mit Lft F, untergeordnet FL, vor. Wie in der ersten Einheit der östlichen Potoco-Fm. werden diese Sedimente als Ablagerungen einer Playa-Ebene interpretiert. Die kaum noch aufgeschlossenen

sanddominierten Lft's und die hier einheitlich feinkörnigen Sedimente sprechen für eine sehr distale Ablagerung.

Ob diese Lft's als Ablagerungen von Uferdammdurchbruchsfächer interpretiert werden können, kann nicht mit Sicherheit angegeben werden. Es fehlt jeder Hinweis auf eine Nähe zur aktiven Rinne. Nach Blair & McPherson (1994) kann es sich um distale Ablagerungen eines alluvialen Fächers handeln. Solche Sedimente sind durch ihre Feinkörnigkeit charakterisiert. Nach Smott & Castens-Seidell (1994) ist der Anteil feinkörnigen äolischen Materials (*windblown dust*) in einer Playa-Ebene sehr groß. Auf diesem Wege können Sedimente aus den umliegenden Hochgebieten in diesen Ablagerungsbereich transportiert und dort abgelagert werden.

Wahrscheinlich spielten alle diese Faktoren bei der Ablagerung zusammen eine wichtige Rolle. Da im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens Gesamtmächtigkeiten von 4500 m erreicht werden und ausschliesslich feinkörnige Sedimente des Architekturelementes FF aufgeschlossen sind, wäre ein einzelner Transport- und Ablagerungsmechanismus eher unwahrscheinlich.

Die Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der Potoco Fm. im Westen und Süden des Süd-Altiplano-Beckens

Die bei Santa Inés aufgenommene Faziesvergesellschaftung mit den Lft's FI, Ev und P kann als Playa-Ablagerung interpretiert werden. Am Top der Potoco-Fm. sind die Lft's Sm, untergeordnet Sp, Sr und Sg, aufgeschlossen. Vergleicht man diese Faziesvergesellschaftung mit der Faziesvergesellschaftung in der vierten Einheit der Potoco-Fm., kann die Vergesellschaftung bei Santa Inés als Ablagerung aus einem distalen „debris flows“ interpretiert werden.

Diese Faziesvergesellschaftung bei Santa Inés lässt die Schlussfolgerung zu, dass in einen, möglicherweise zeitweise trockenfallenden See alluviale Fächer hineinreichten und dort grobkörnige, klastische Sedimente abgelagert wurden.

Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum
Siltsteine, Evaporite, Paläoböden	FI, Ev, P	Playa
Konglomeratische Sandsteine, Sandsteine	Sm, (Sp, Sr, Sg)	Alluvial

Tab. 3.4 Überblick über die Faziesvergesellschaftungen der Potoco-Fm. bei Santa Inés.

Ähnlich sind die Faziesvergesellschaftungen bei Cerro Gordo. Dort ist an der Basis der Potoco-Fm. eine Vergesellschaftung mit den Lft's F, FI, St und Sp aufgeschlossen. Darüber folgt eine Faziesvergesellschaftung, die von dem Lft Sm, untergeordnet FL, gebildet wird. Durch einen Vergleich mit der Faziesvergesellschaftung der zweiten Einheit im Osten, kann die Basis der Potoco-Fm. bei Cerro Gordo als „sheet-flood“-Ablagerung in einer Playa-Ebene interpretiert werden.

Die zweite Faziesvergesellschaftung bei Cerro Gordo, Lft's Sm und FL, kann als eine alluviale Ablagerung interpretiert werden. Auch hier ist die Ähnlichkeit mit der Faziesvergesellschaftung der vierten Einheit in der östlichen Potoco-Fm. bemerkenswert.

Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum
Siltsteine, Sandsteine	F, Fl, St, Sp,	„sheet-flood“-Ablagerung in einer Playa-Ebene
Konglomeratische Sandsteine, Siltsteine	Sm, Fl	Alluviale Ablagerung

Tab. 3.5 Überblick über die Faziesvergesellschaftung der Potoco-Fm. bei Cerro Gordo, im Südteil des Süd-Altiplano-Beckens.

3.4.4 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der San Vicente-Fm.

Diese Formation ist faziell, lateral wie vertikal, besonders vielfältig. Neben rein vulkanischen und rein siliziklastischen Gesteinen gibt es in fließenden Übergängen Mischgesteine sowie selten Karbonate. Die Faziesverzahnungen sind daher im einzelnen besonders kompliziert. Rein vulkanische Gesteine werden als eigenständige Lithofazies behandelt. Die Mischgesteine sind, außer in ihrem Anteil an vulkanischen Fragmenten, in ihren Sedimentstrukturen, ihrer Geometrie und ihrer Mächtigkeit vergleichbar mit den rein klastischen Gesteinen. Sie werden daher, mit dem Index (v) versehen, wie klastische Gesteine gestellt. Die klastischen Sedimente und vulkanischen Ablagerungen innerhalb des Süd-Altiplano-Beckens wurden während des Tertiärs wiederholt wiederaufgearbeitet.

Der rein klastische Ablagerungsraum der San Vicente-Fm.

Lakustriner, alluvial beeinflusster Ablagerungsraum (Abb. 3.11)

Der lakustrine Ablagerungsraum in der San Vicente-Fm. wird durch Stromatolithen (Cstr) und biogenreiches Karbonat mit Fossilien (Cfos) repräsentiert. Eingeschaltet sind Konglomerate (Gmm) und feinkörnige Tuffe. Schuttströme eines alluvialen Fächers gelangten vermutlich zyklisch in einen See. Karbonatklasten sind zusätzlich vorhanden und zeigen, dass der Schuttstrom auch karbonatisches Untergrundmaterial aus der Umgebung des Sees oder des Seebodens selbst aufarbeitete.

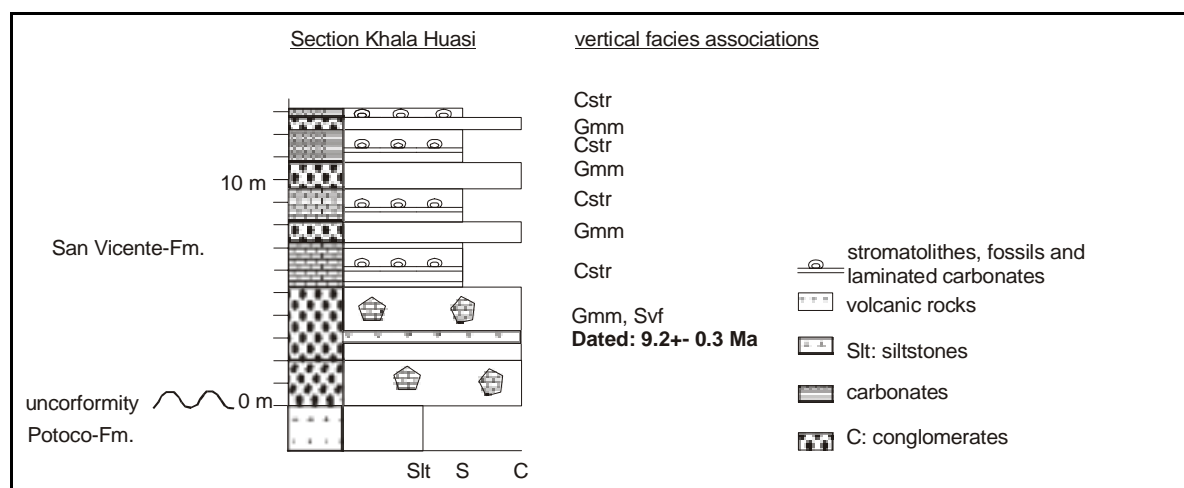


Abb. 3.11 Alluvial beeinflusste, lakustrine Faziesvergesellschaftung bei Khala Huasi. Die Konglomerate Gmm sind mit Cstr, Cfos und Svf vergesellschaftet. Die San Vicente-Fm. lagert winkeldiskordant über feinkörnigen Sedimenten der Potoco-Fm. (Lokalität siehe Karte Anhang). Erklärung der Lithofaziestypen siehe Tab. 3.1.

Der Playa-Ablagerungsraum

Nur im Profil Animas konnte diese Faziesvergesellschaftung aufgenommen werden. Der Lithofaziestyp F überwiegt, zusätzlich gibt es untergeordnet den Lithofaziestyp FI. Da sonst keine grobkörnigeren Sedimente vorkommen, wird ein sehr ruhiges Playa-Ablagerungsmilieu, weit entfernt von einer aktiven Flussrinne, angenommen.

Gesteinstyp	Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum	Profil-Lokalität
Rein klastische Gesteine	Siltsteine, Sandsteine wechsellagernd mit Siltsteinen	F, FI	Playa	Animas
	Karbonate, Konglomerate	Cstr, Cfos, Gmm	Lakustrin, alluvial beeinflusst	Khala Huasi
Mischgesteine	Konglomerate, Sandsteine	Gt/h, Sg(v), Sp(v), St(v)	Fluviatil, verzweigtes Flusssystem	Chita, Ubina, San Cristóbal, Santa Inés, Cerro Gordo
	Konglomerate, Sandsteine	Gmm, Gmg, Sm(v), Sh(v)	Alluvial	San Cristóbal, Chita, Santa Inés
	Sandsteine	Seod, Seod(v)	Äolisch	San Cristóbal, Santa Inés
Rein vulkanische Gesteine	vulkanische Brekzie,	Gvolc, Sm(v)	Vulkanisch-alluvial	San Cristóbal
	feinkörnige Tuffe	Svf	Überflutungsebenen	Chita, Animas, San Cristóbal, Santa Inés
	grobkörnige Tuffe	Svg	Fluviatil, alluvial	Chita, Animas, Atocha, San Cristóbal

Tab. 3.6 Faziesvergesellschaftungen und Ablagerungsräume der San Vicente-Fm..

Der äolische Ablagerungsraum

Der äolische Ablagerungsraum wird durch die Lithofaziestypen Seod und Seod(v) repräsentiert. Letzterer weist auf eine vulkanische Beeinflussung während der Ablagerung der äolischen Sandsteine hin. Dieser kommt in der basalen San Vicente-Fm. nur im zentralen Süd-Altiplano-Becken vor.

Der gemischte (vulkano-klastische) Ablagerungsraum (Abb. 3.12)Fluviatil, verzweigtes Flusssystem, vulkanisch beeinflusst

Diese Faziesvergesellschaftung besteht vorwiegend aus klastengestützten Konglomeraten (Lft Gt/h) und untergeordnet aus Sandsteinen (Lft's Sg(v), Sp(v), St(v)), die in der Regel nicht mehr als 20 cm mächtige Einschaltungen darstellen. Die Sandsteine sind, wie der Index (v) zeigt, stets mit vulkanischem Material vermengt.

Interpretiert wird diese Faziesvergesellschaftung als die Ablagerung eines verzweigten, geröllführenden Flusssystems. In den Rinnen wurden die Gerölle als Bodenfracht transportiert. Sand wurde nach Ablagerung der Gerölle in die verbleibenden Zwischenräumen eingefüllt und in dünnen Lagen über den geröllführenden Horizonten sedimentiert. Aufgeschlossen ist diese

Faziesvergesellschaftung sehr deutlich im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens; sie kann allerdings mit leichten Änderungen im gesamten Süd-Altiplano-Becken erkannt werden.

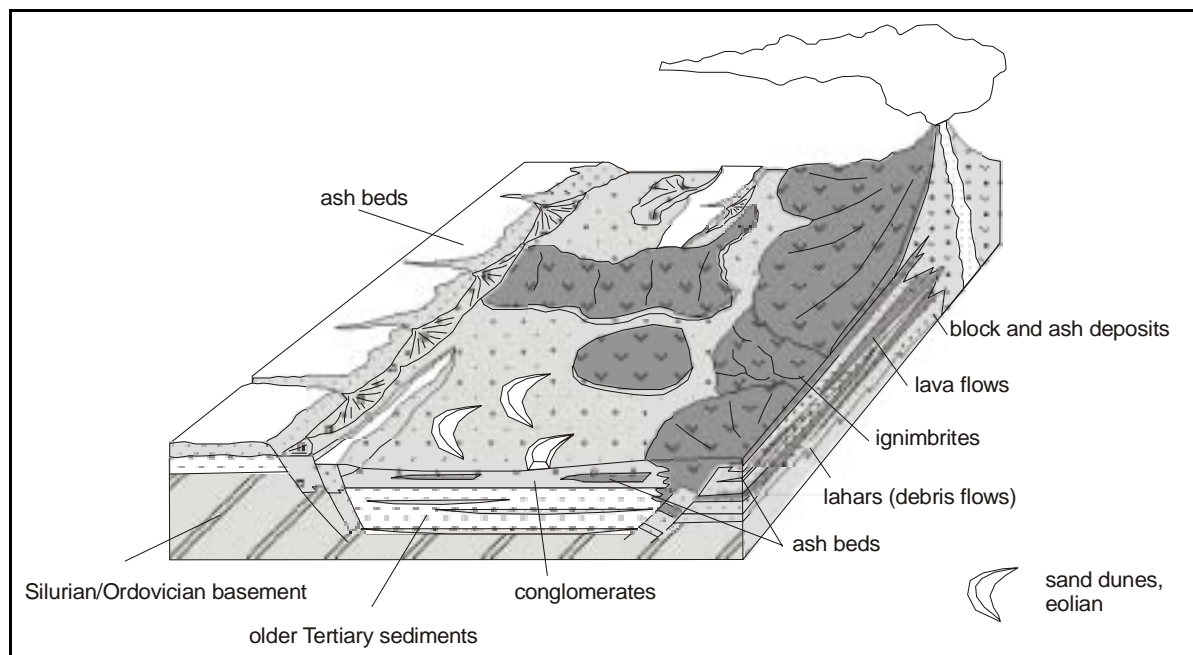


Abb. 3.12 Ablagerungsraum der San Vicente-Fm. im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens. Deutlich ist das Beisammensein von rein klastischen, vulkano-klastischen und rein vulkanischen Ablagerungen dargestellt. Die Interpretation eines Grabens im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens bei San Cristóbal basiert auf eigenen Geländebeobachtungen und wird von der Interpretation seismischer Linien bestätigt (Elger 2003). Durch dieses schnell subsidierende Teilbecken konnten große Sedimentmächtigkeiten schnell abgelagert werden. Auch die Erhaltung von äolischen Sanddünen ist eine Folge dieser schnellen Absenkung, da sie damit vor weiterer Erosion geschützt wurden.

Alluvial, vulkanisch beeinflusst (Abb. 3.12)

Diese Faziesvergesellschaftung besteht aus den Lithofaziestypen Gmm, Gmg. Vulkanische Sandsteine (Lft's Sm(v) und Sh(v)) sind überall zu finden, zum Top nimmt ihr Anteil zu. Die vulkanischen Anteile in den vulkanischen Sandsteinen (Lft Sm(v)) bestehen aus schlecht gerundeten, aufgearbeiteten, grobkörnigen Tuffen. Interpretiert wird der Transportmechanismus als der eines „debris flows“ in einer intereruptiven Phase. Dafür sprechen die Zusammensetzung der Konglomerate, die fehlende Gradierung, der hohe Matrixanteil der Konglomerate und die in den vulkanischen Sandsteinen aufgearbeiteten Epiklastite. Im stratigrafisch höheren Teil der San Vicente-Fm. nördlich von San Cristóbal und bei Chita, im Nordteil des Süd-Altiplano-Beckens, ist diese Lithofaziesvergesellschaftung aufgeschlossen.

Der vulkanische Ablagerungsraum (Abb. 3.12)

Vulkanisch, alluvial

Die syneruptive Phase und der vulkanische Ablagerungsraum wird durch eine vulkanische Brekzie (Lft Gvolc) und die Tuffe (Lft's Svf und Sfg) repräsentiert. In der Matrix der vulkanischen Brekzie ist sehr viel vulkanisches Material aufgearbeitet worden. Nach Smith (1986) können vulkanische „debris flows“

mehrere 100 km vom Ursprungsort zurücklegen und sich über mehrere Quadratkilometer ausbreiten. Wo das Eruptionszentrum dieser vulkanischen Brekzie lag, konnte im Gelände nicht mit Sicherheit ermittelt werden. Dieser Ablagerungsraum ist nördlich von San Cristóbal aufgeschlossen.

Tuffe, sowohl feinkörnige wie grobkörnige, kommen mit wenigen Ausnahmen im gesamten Süd-Altiplano-Becken vor.

3.4.5 Faziesvergesellschaftung und Ablagerungsraum der Chocaya-Fm.

Alluvialer Ablagerungsraum, vulkanisch beeinflusst

Diese Faziesvergesellschaftung besteht aus den Lithofaziestypen Gmm, Sm(v) und F, wobei der Lithofaziestyp F in sehr geringen Anteilen vorkommt. Sowohl die Fragmente der vulkanischen Sandsteine als auch die Klasten der Konglomerate bestehen aus sedimentärem und vulkanischem Material. Zwischen den einzelnen Konglomerathorizonten sind feinkörnige Sedimente aufgeschlossen. Einzelne Ablagerungsereignisse lassen sich kaum bestimmen, da der Erhaltungszustand der Sedimente sehr schlecht ist. Diese Faziesvergesellschaftung ist im gesamten Atocha-Becken sehr verbreitet aufgeschlossen.

An der Basis der alluvialen Faziesvergesellschaftung kommt ein ~ 50 cm mächtiger Tuff, Lft Svg, vor.

Sedimente	Faziesvergesellschaftung	Ablagerungsraum
Konglomerate, vulkanische Sandsteine, vulkanisches Material (Tuffe), Siltsteine	Gmm, Sm(v), untergeordnet F	Alluvial
Grobkörniger Tuff, Svg	Svg	Alluvial

Tab. 3.13 Faziesvergesellschaftung und der Ablagerungsraum der Chocaya-Fm..

Die Faziesvergesellschaftung der Chocaya-Fm. steht in enger Beziehung zu einem intensiven Vulkanismus. Der basale Tuff, Svg, wurde mit einem Alter von $20,3 \pm 0,5$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar) datiert und gibt somit einen Hinweis auf das Alter der vulkanischen Tätigkeit in dieser Region.

