

#### 4 Sedimentpetrografie

Die Lithologien der im Gelände aufgenommenen paläozänen bis miozänen Sedimente bestehen aus Sand- und Siltsteinen sowie Konglomeraten, vulkanischen und tuffitischen Sandsteinen sowie Tuffen und Autoklastiten. Evaporite und Karbonate kommen nur untergeordnet vor. Um eine mikroskopische Analyse der Sedimente durchzuführen, wurde im Gelände zunächst eine makroskopische Gesteinsbestimmung durchgeführt, danach wurden repräsentative Proben entnommen. Dünnschliffe von Sandsteinproben wurden daraufhin unter dem Polarisationsmikroskop auf ihre modale Zusammensetzung hin untersucht.

Die Konglomerate der San Vicente-Fm. wurden bereits im Gelände makroskopisch untersucht, um ihre Modalzusammensetzung und ihre Herkunftsgesteine zu ermitteln. Die Zählung erfasste Klasten mit einer Größe zwischen 2 bis 3 cm im Durchmesser. Das Basiskonglomerat der San Vicente-Fm., das genau von der grobkörnigen Potoco-Fm. (siehe Stratigrafie) unterschieden werden kann, erfuhr besondere Berücksichtigung. Es lieferte Anhaltspunkte, welche Gesteine zum Zeitpunkt seiner Ablagerung bereits an der Erdoberfläche lagen.

##### 4.1 Sandsteinpetrografie

Die modale Zusammensetzung der Sandsteine der Santa Lucía-, der Cayara-, der Potoco- und der San Vicente-Formation wurde mit Hilfe mikroskopischer Untersuchungen an Dünnschliffen ermittelt. Insgesamt wurden 124 Schliffe ausgewertet. Gezählt wurde nach der Gazzi-Dickinson-Methode (Gazzi 1966; Dickinson 1970; Ingersoll et al. 1984). Diese Methode berücksichtigt die Korngröße der einzelnen Körner. Um einen statistischen Wert zu errechnen, wurden pro Schliff 300 Körner in der Korngröße von 0,03 mm (30 µm) bis 2 mm gezählt. Die Korngröße reicht somit von Grobsilt bis Grobsand. Anteile kleiner 30 µm werden als Matrix bezeichnet. Der neugebildete Zement wurde mitgezählt, Porenraum dagegen nicht. Eine Fehlerrechnung wurde an jeweils 5 Proben pro Formation gemacht (Anhang). Anhand dieser Analyse wird die Klassifikation der Sandsteine vorgenommen (Datentabelle siehe Anhang).

Abkürzungen	Erläuterung
<b>Qm</b>	monokristalliner Quarz
<b>Qp</b>	polykristalliner Quarz, aus mind. 3 Kristallkomponenten bestehende Körner
<b>C</b>	Chert-Fragmente
<b>P</b>	Plagioklas
<b>K</b>	Kali-Feldspat
<b>F</b>	Feldspäte (Plagioklas + Kalifeldspat)
<b>Mc</b>	Glimmer (mica)
<b>Lsed(klast.)</b>	sedimentäre, klastische Gesteinsfragmente
<b>Lsed(karb.)</b>	sedimentäre, karbonatische Gesteinsfragmente
<b>Lv</b>	vulkanische Gesteinsfragmente
<b>Lgr</b>	plutonische Gesteinsfragmente (i.w. Granitoide)
<b>A</b>	Opake Minerale, Schwerminerale
<b>Mx</b>	Matrix (Komponenten kleiner als 30 µm)
<b>Ct</b>	Zement (cement)

**Tab. 4.1** Erläuterung der verwendeten Abkürzungen für gezählte Parameter in den Sandsteinzählungen.

Die identifizierten Körner bestehen sowohl aus einzelnen Kristallen, wie z. B. monokristallinem Quarz, als auch aus einzelnen Körnern innerhalb von Gesteinsfragmenten. Wenn einzelne Komponenten der Gesteinsfragmente eine Größe von 30 µm überschreiten, werden diese entsprechend der Gazzi-Dickinson-Methode zu den monokristallinen Körnern gezählt. Bei vulkanischen Gesteinsfragmenten, die aus einer feinkörnigen Matrix und einzelnen grobkörnigen (größer als 30 µm) Einzelkristallen bestehen, werden die Einzelkristalle zu den monokristallinen Komponenten und die Matrix zu den feinkörnigen Gesteinsfragmenten gezählt.

Wichtige Komponenten in den Sandsteinen stellen Gesteinsfragmente und Körner dar, die sich aus mehreren Kristalldomänen zusammensetzen, z. B. polykristalline Quarze aus mindestens 3 Quarzkristallen. Zu den Gesteinsfragmenten zählen sedimentäre, darunter karbonatische, vulkanische und granitoide Typen. Karbonate kommen im Arbeitsgebiet und in der Ostkordillere nur in den kretazischen bis spätpaläozänen Sedimenten vor (Fiedler 2002). Die karbonatischen Gesteinsfragmente stellen damit sehr wichtige und gut nachweisbare Komponenten dar, mit denen der Beginn der Abtragung dieser Gesteine zeitlich eingegrenzt werden kann. Schwerminerale wurden quantitativ nicht erfasst, da diese Minerale aufgrund ihres seltenen Auftretens und ihrer geringen Größe eine unzuverlässige Informationsquelle bilden würden.

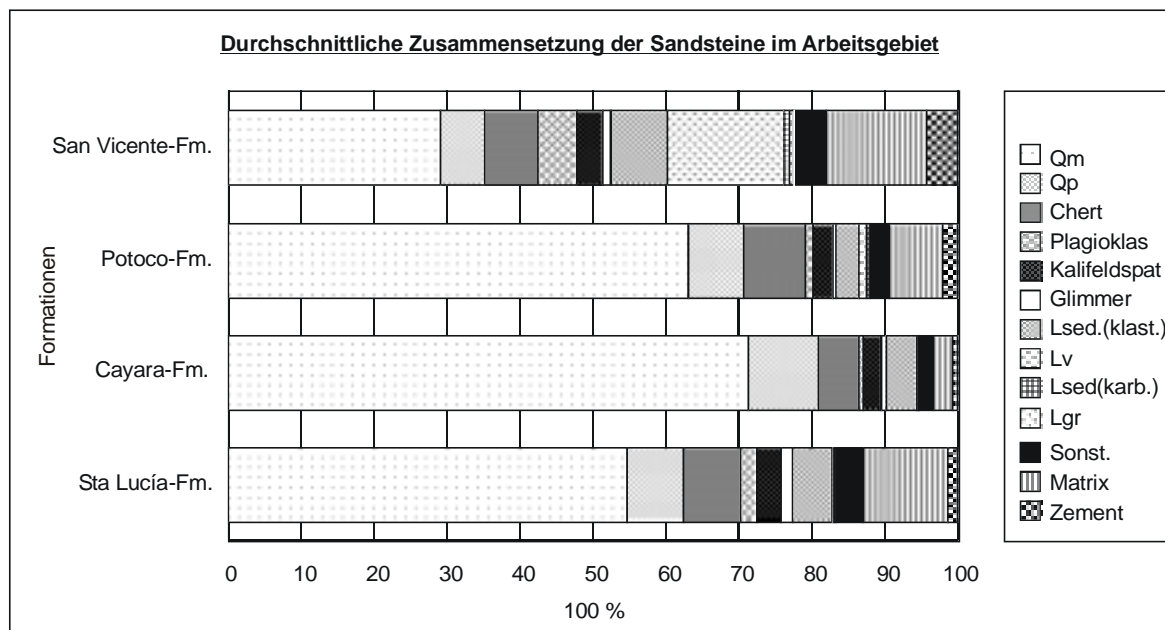


Abb. 4.1 Zusammensetzung der untersuchten Sandsteine (Folk 1974). Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

#### 4.1.2 Beschreibung einzelner Komponenten

##### Quarz (Q)

Quarz stellt in allen Proben den größten Anteil in der Sandfraktion dar. Es können sowohl mono- und polykristalline Quarze als auch Chert unterschieden werden. Für die Klassifizierung der Sandsteine nach Folk (1974) wird Chert als Gesteinsbruchstück betrachtet, während mono- und polykristalline Quarze zusammengezählt werden. Es ist auffallend, dass im gleichen untersuchten Schriff sowohl eckige wie auch gerundete Quarzkörner gefunden wurden. Die Sortierung der Quarze ist in vielen

Proben sehr schlecht. So wurden im selben Schliff Quarzkörner über grob- bis feinkörnig und sogar Quarze, die zur Matrixfraktion gezählt werden, gefunden. Zwischen dem Rundungsgrad und der Größe der Quarzkörner wurde keine Beziehung festgestellt. Oft sind Anwachssäume an den Quarzrändern zu sehen. Besonders deutlich ist dieser Anwachssaum sichtbar, wenn der Zement eine rötliche Farbe hat. Quarzkörner zeigen im gleichen untersuchten Schliff sowohl gerade wie auch undulöse Auslöschung. Deutlich sind in einigen der gerade auslöschenden Quarze Einschlüsse sichtbar. Ebenso sind in den Monoquarzen winzige Schwerminerale sichtbar, die nicht näher identifiziert werden konnten.

Oft zeigen Quarze eine lagenweise Trübung oder Lamellierung, (Böhm'sche Lamellen bzw. Streifung), die einen Hinweis auf dynamische, hier eine spätere tektonische Beanspruchung geben.

**Monokristalliner Quarz (Qm)** stellt den Hauptbestandteil in den untersuchten Sandsteinen dar. Besonders hoch ist sein Anteil in den Santa Lucía-, Cayara- und Potoco-Formationen (Tab. 4.2). Monokristalline Quarze sind gut von den anderen Anteilen unterscheidbar. Oft zeigen die Quarze Undulosität und an den Rändern Einbuchtungen (*embayments*). Letztere gehen oft in Chert über oder sind mit Chert ausgefüllt. Solche Quarze mit Einbuchtungen sind häufig in der Potoco- und in der San Vicente-Formation zu finden. In der Regel wird die Herkunft solcher Embayment-Quarze als vulkanisch angegeben (Pettijohn et al. 1987). Der Rundungsgrad der monokristallinen Quarze variiert innerhalb einzelner Formationen stark. Einzig die Cayara-Fm. bildet eine Ausnahme mit sehr gut sortierten und gerundeten Quarzen. Die Quarze der San Vicente-Fm. stellen das andere Extrem dar. Hier reicht der Rundungsgrad von sehr kantig bis gut gerundet. Die Korngröße der Quarze in der San Vicente-Fm. reicht von fein- bis grobkörnig. In der Santa Lucía-Fm. und der Potoco-Fm. ist der Rundungsgrad der Quarze schlecht, er ist als kantengerundet einzustufen. Einige Proben der Potoco-Fm. haben allerdings gut gerundete Quarzkörner.

Formation	Anzahl der Proben (n)	monokristalliner Quarz (%) (Qm)	polykristalliner Quarz (%) (Qp)	Chert (%) (C)
San Vicente-Fm.	43	29,1 (5,2)	6,1 (3,2)	7,1 (3,2)
Potoco-Fm.	60	65,7 (4,3)	8 (3)	7,8 (2,2)
Cayara-Fm.	9	71,5 (5,1)	9,5 (3,4)	5,5 (2,6)
Santa Lucía-Fm.	9	54,8 (5,5)	7,8 (2,7)	7,8 (2,7)

**Tab. 4.2** Prozentanteil der monokristallinen und polykristallinen Quarze und der Chertfragmente in den untersuchten Formationen des S-Altiplano-Beckens (n: Anzahl der untersuchten Proben; Fehler an 5 Proben pro Formation ( $\sigma$ ) in Klammern).

**Polykristalline Quarze (Qp)** bestehen aus zwei oder mehreren Quarzdomänen (Folk 1974; Pettijohn et al. 1987). In der Regel kommen in den untersuchten Proben mindestens drei Quarzindividuen zusammen vor. Die Korngrenzen der Quarzindividuen können gerade oder suturiert sein. In einigen polykristallinen Quarzen findet eine leichte Einregelung der einzelnen Quarzindividuen statt. In der Regel ist der Anteil der polykristallinen Quarze in den untersuchten Sandsteinen geringer als der der monokristallinen Quarze. Als Entstehungsort der polykristallinen Quarze werden Quarzgänge, sedimentäre Verkieselungszonen, Granitoide und Metamorphite genannt (Zimmerle 1976).

**Chert (C)** kommt in allen Formationen in unterschiedlichen Anteilen vor. Mit Chert werden kieselige Gesteine bezeichnet, die einen mikrokristallinen Aufbau haben. Ihr Ursprung kann sowohl vulkanisch, biogen oder diagenetisch sein. Es kommt sowohl feiner wie auch grobkörniger Chert vor, oft sind braun-rötliche Einschlüsse eingelagert. Die Chert-Bruchstücke können runde wie auch eine kantige Kornform haben. Oft geht Chert in grobkristallinen Quarz über oder ist mit diesem verwachsen.

**Feldspäte (F)** sind in den untersuchten Proben meist gut erhalten. Sie kommen kantig und kantengerundet vor allem in der San Vicente-Fm. vor. Es sind sowohl klare, idiomorphe Feldspatkristalle vorhanden als auch solche, die leicht zersetzt sind und in Karbonate übergehen. Oft ist diese Karbonatisierung der Feldspäte nicht vollständig. Häufig sind die Feldspäte am Rand und entlang von Spaltflächen serizitisiert. Die Größe einzelner Feldspatkristalle ist recht unterschiedlich, wobei die unterschiedliche Größe nicht mit der Serizitisierung zusammenhängt. Die unterschiedliche Größe der Feldspäte ist weder vom Serizitierungsgrad noch vom Rundungsgrad abhängig.

**Plagioklase (P)** kommen in allen Formationen vor. Deutlich sind Plagioklase mit zoniertem Wachstum und polysynthetischer Verzwillingung (Albit-Gesetz) unter dem Mikroskop zu erkennen. Solch zoniertes Wachstum ist nach Tröger (1967) typisch für Plagioklase magmatischer Herkunft.

**Kalifeldspäte (K)** kommen zusammen mit Plagioklasen in allen Formationen vor. Deutlich ist die Verzwillingung nach dem Karlsbader Gesetz erkennbar, seltener ist sie nach dem Bavenoer Gesetz. Eine Trübung mit grauen bis braunen Farbtönen wird durch kleinste Einlagerungen von Serizit, Chlorit und opaken Mineralen, die sich parallel zu den Spaltrichtungen anordnen, verursacht.

**Glimmer (Mica, Mc)** kommen plattenförmig, gut erhalten und frisch in allen Formationen, mit Ausnahme der Cayara-Fm., vor. Der Anteil von Biotit überwiegt den von Muskovit. Für den Biotit typisch ist eine „birds-eye“-Struktur und ein Pleochroismus von rotbraun bis hellgelb. Er zeigt kaum eine randliche Umwandlung. Wie der Biotit ordnet sich der Muskovit oft parallel zur Schichtung an.

**Sedimentäre, klastische Gesteinsfragmente (Lsed(klast.))** kommen in unterschiedlichen Anteilen in der Santa Lucía-, der Potoco- und der San Vicente-Formation vor. Der Anteil von Gesteinsfragmenten in der Cayara-Fm. ist sehr gering. Deutlich sind im Dünnschliff klastische Gesteinsfragmente erkennbar. Diese bestehen aus tonigem bis siltigem Material, oft sind kleinere Quarz- und Feldspatbruchstücke in der Matrix zu erkennen. Das feinkörnige, tonige Material konnte nicht näher bestimmt werden. Die klastischen Gesteinsbruchstücke sind gut gerundet. Ihre Größe ist sehr variabel, oft mittel- bis grobkörnig. Zu den sedimentären Gesteinsbruchstücken zählen auch die karbonatischen Gesteinsbruchstücke, die gesondert gezählt wurden.

**Sedimentäre, karbonatische Gesteinsfragmente (Lsed(karb.))** kommen als Oolithbruchstücke im stratigrafisch höheren Teil der Potoco-Fm. und im unteren Teil der San Vicente-Fm. vor. Sie stammen aus kretazischen bis spätpaläozänen Sedimenten (Kap. 2). Deutlich ist der konzentrische Aufbau einzelner Ooide zu erkennen. Die karbonatischen Ooide sind von einem rötlichen Überzug aus feinklastischen Material umgeben. Im unteren Teil der Potoco-Fm. sind zusätzlich noch mikritische Kalke als Klasten erkennbar.

Formation	Anzahl der untersuchten Proben (n)	Lsed(klast.) (%)	Lgr (%)	Lv (%)	Lsed(karb.) (%)
San Vicente-Fm.	43	8,2 (3,1)	0,18 (1)	14,2 (2,5)	1,4 (1)
Potoco-Fm.	60	3,2 (2,8)	---	0,1 (1)	0,5 (1)
Cayara-Fm.	9	4,2 (2,9)	---	0,3 (1)	---
Santa Lucía-Fm.	9	5,5 (2,3)	---	0,4 (1)	0,2 (1)

**Tab. 4.3** Durchschnittlicher prozentualer Anteil von Gesteinsfragmenten in den untersuchten Proben. Die Fehlerrechnung an 5 Proben pro Formation ( $\sigma$ ) ist in Klammer angegeben. Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

**Vulkanische Gesteinsfragmente (Lv)** kommen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nur in der San Vicente-Fm. vor. Sowohl ihre Größe wie ihr Rundungsgrad ist sehr unterschiedlich. Sie bestehen in der Regel aus einer unter polarisiertem Licht fast opaken Matrix, in der größere, gut erkennbare Feldspäte mit Verzwilligung und Zonarbau als fast idiomorphe Einschlüsse vorhanden sind. In einigen Proben der Potoco-Fm. aus den SW-Teil des Süd-Altiplano-Beckens kommen ebenfalls vulkanische Gesteinsfragmente vor.

**Granitoide Gesteinsfragmente (Lgr)**, unterschiedlich groß, kommen in Grauwacken der San Vicente-Fm. nur im Westen des S-Altiplano-Beckens vor. Quarze und Feldspäte zeigen keine Verwachsungen, die auf spätere Umbildungen während der Diagenese deuten würden. Die Kristallränder der einzelnen Kristallindividuen sind gerade.

**Akzessorien (A)** bestehen sowohl aus den opaken Mineralen Pyrit, Hämatit und anderen nicht identifizierbaren Mineralen als auch aus den Schwermineralen Apatit, Amphibol und Rutil. Amphibole kommen sehr vereinzelt nur in der San Vicente-Fm. vor. Die grünen Hornblendekristalle sind langsäulig bis stengelig. Pleochroismus weist grüne und bläuliche Farbtöne auf.

Meist kleine Apatite und Titanite kommen in geringen Anteilen in fast allen Proben vor. Ihre Form ist eckig, rautenförmig bis prismatisch.

**Matrix (Mx)** Die Matrixbestandteile bestehen meist aus feinkörnigem, tonig-siltigem Material sowie einzelnen kleinen Feldspat- und Quarzpartikeln. Das feinkörnige, tonige Material zeigt hohe Interferenzfarben. Der Matrixanteil liegt in den untersuchten Proben der Santa Lucía- und San Vicente-Formationen bei etwa 10 %. In solchen der Cayara- und Potoco-Formationen allerdings liegt er deutlich unter 10 %, in der Cayara-Fm. ist ein Minimalwert bei 2,8% zu verzeichnen. Ein hoher Matrixanteil wurde oft in Sandsteinen der Playaebene gefunden, sowie in alluvialen Sandsteinen der Potoco- und San Vicente-Formationen.

**Zement (C)** Der Zementanteil liegt in fast allen Proben deutlich unter 5%, nur in der San Vicente-Fm. liegt der Zementanteil bei 5,1%. Der Zement besteht aus Karbonat, Silikat und rot gefärbten Eisenoxiden. Letzterer ist in der San Vicente-Fm. häufig. Silikatzement und Eisenoxidzement konnte zudem als Anwachsraum an Quarzen identifiziert werden. An einigen Proben kommen diese Zementtypen als Meniskuszement vor. In einigen Schlifften ist Chalcedon als strahlige Porenfüllung enthalten.

Karbonatzement beschränkt sich auf wenige Proben der Santa Lucía-, der Potoco- und der San Vicente-Formationen. Dieser Zementtyp geht oft in Matrix über, weshalb eine Unterscheidung schwierig ist.

## 4.2 Reifegrad und die Klassifikation der Sandsteine

### 4.2.1 Reifegrad

Der kompositionelle (mineralogische) Reifegrad der Sandsteine nach Pettijohn (1957) bildet eine Möglichkeit, die Zusammensetzung der Sandsteine zu vergleichen. Der kompositionelle Reifegrad (MI) wird durch mehrere Prozesse bestimmt. Diese Prozesse sind:

- Verwitterung des Liefergesteins (Verkleinerung)
- Verwitterung im Boden (z.B. Umwandlung der Feldspäte zu Tonmineralen)
- Korrasion und Korrosion während des Transportes (jeglicher Angriff bewegter Medien auf Gesteine, z.B. Windschliff, chemischer Angriff des Wassers auf Gesteine)
- Umbildungen im Verlauf der Diagenese

Der kompositionelle Reifegrad der Sandsteine wird mit folgendem Index angegeben:

$$\text{Kompositionelle Reife (Maturity Index, MI)} = \frac{\text{Quarz + Chert}}{\text{Feldspäte + Gesteinsbruchstücke}}$$

Dieser Reife-Index (Tab. 4.4) nimmt mit jedem sedimentären Zyklus zu (Füchtbauer 1988). Je häufiger ein Gestein aufgearbeitet wurde, um so geringer ist der Anteil an instabilen Komponenten und desto größer ist der Anteil an stabilen Komponenten. Allerdings darf bei einem neuen sedimentären Zyklus kein neues Material hinzukommen. Eine Mischung aus neuem und altem Material „verfälscht“ den Reife-Index.

Formationen	Anzahl der untersuchten Sandsteinproben	Reife-Index (MI)
San Vicente-Fm.	29	2,1
Potoco-Fm.	57	15,5
Cayara-Fm.	9	79,6
Santa Lucía-Fm.	7	13,9

**Tab. 4.4** Reife-Indizes der Sandsteine in den Formationen des S-Altiplano-Beckens.

Eine weitere Möglichkeit, den Reifegrad von Sandsteinen zu bestimmen, ist das Verhältnis von polykristallinem zu monokristallinem Quarz, also das Qp/Qm-Verhältnis (Pettijohn et al. 1987). Dabei wird angenommen, dass sich monokristalliner Quarz widerstandsfähiger als polykristalliner verhält. Die Struktur von Quarz ändert sich kontinuierlich:

Nichtundulöser Quarz → undulöser Quarz → Deformationsbrüche an undulösen Domänengrenzen → polykristallines Aggregat (elongated crystal fabric) → „polyhedral or polygonized Quarz“

Die Bildung eines polykristallinen Aggregates geht auf dynamische und statische Rekristallisation zurück. Dieser Quarztyp entsteht oft in Metamorphiten.

Polykristalliner Quarz wird bei Verwitterung und Transport im allgemeinen eher zerbrochen als monokristalliner Quarz. So kann nach Blatt (1982) ein großes Vorkommen von monokristallinen Quarz in Sandsteinen als das Ergebnis von größerem Widerstand gegenüber chemischer Verwitterung gedeutet werden.

Formationen	Anzahl der Proben (n)	Qp/Qm-Verhältniss	Reifegrad
San Vicente-Fm.	43	0,2 (20,5%)	unreifer
Potoco-Fm.	0	0,1 (12,2%)	
Cayara-Fm.	9	0,1 (13,4%)	
Santa Lucía-Fm.	9	0,1 (14,2%)	reifer

**Tab. 4.5** Verhältnis von poly- zu monokristallinem Quarz als Reifeindex (es wurden sowohl Sandsteine wie auch Grauwacken untersucht).

Die Qp/Qm-Verhältnisse der Santa Lucía-, Cayara- und Potoco-Formationen liegen in einem ähnlichen Bereich (Tab. 4.5). Das Qp/Qm-Verhältnis der San Vicente-Fm. ist deutlich höher. Bei der San Vicente-Fm. findet eine Abnahme von monokristallinen Quarzen und eine Zunahme von polykristallinen Quarzen statt (siehe Anhang). Das bedeutet, dass die Sedimente der San Vicente-Fm. als unreifere Sedimente anzusehen sind als die Sedimente der übrigen Formationen.

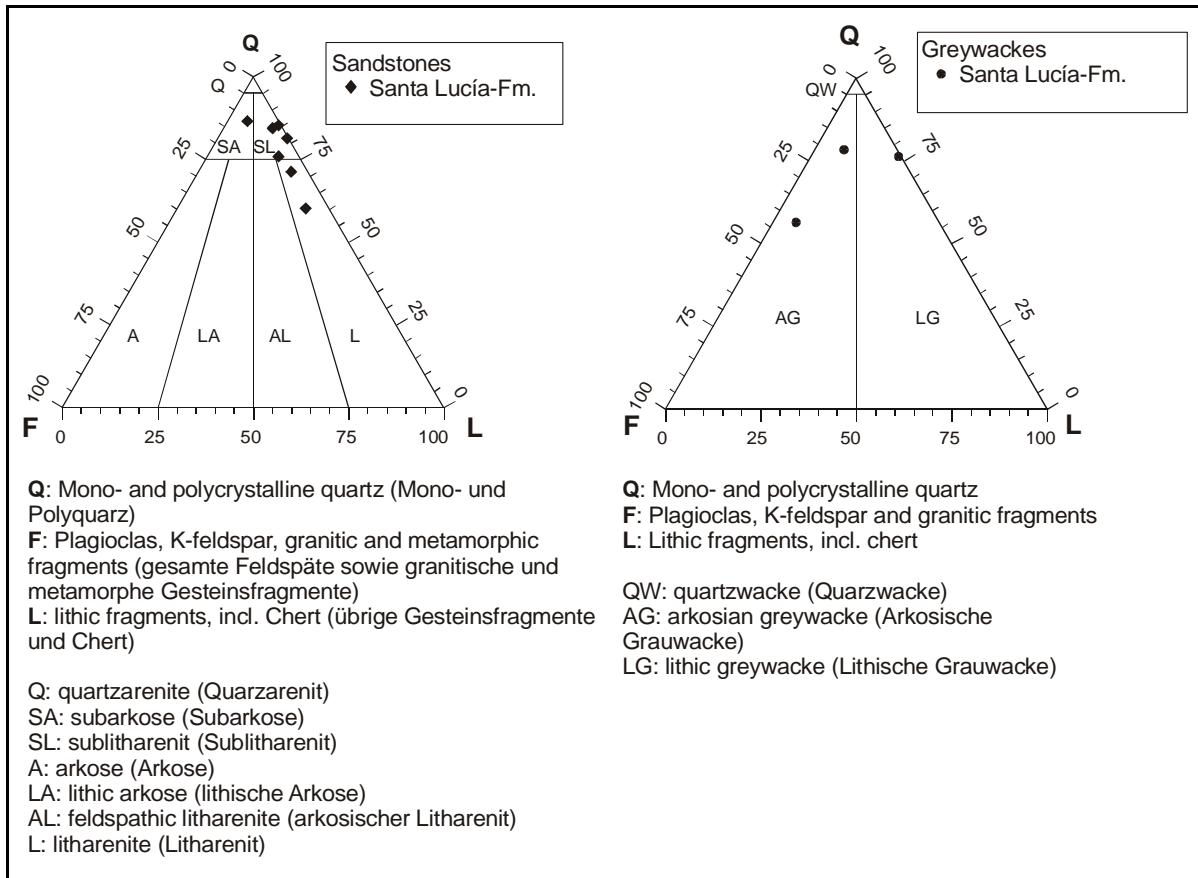
#### 4.2.2 Sandsteinklassifikation

Die Sandsteinklassifikation beruht auf der Partikelzusammensetzung und dem Matrixanteil. Die maximale Korngröße der Matrix wurde nach Pettijohn (1975) bei 30 µm gezogen. Nach ihm liegt zwischen 20 µm und 30 µm die Grenze, unterhalb der eine Unterscheidung zwischen detritischen und diagenetischen Komponenten nicht mehr möglich ist. Die Sandsteine werden nach Folk (1974) klassifiziert und in den von ihm definierten Dreiecksdiagrammen dargestellt. Die Eckpunkte der Dreiecksdiagramme werden von Quarz, Feldspat und Gesteinsfragmenten gebildet. Das Endglied Q (Quarz) beinhaltet sowohl mono- wie auch polykristalline Quarze; F (Feldspat) beinhaltet die gesamten Feldspäte sowie granitische und metamorphe Gesteinsbruchstücke, der dritte Eckpunkt, die lithischen Fragmente, „lithic fragments (Lf)“, sowie alle übrigen Gesteinsbruchstücke inklusive mikrokristalliner Chert-Bruchstücke. Die Grenze zwischen Grauwacken und Sandsteinen liegt bei einem Matrixanteil größer 15 %.

##### 4.2.2.1 Sandsteine und Grauwacken der Santa Lucía-Fm.

Die Sandsteine der Santa Lucía-Fm. sind Sublitharenite und Litharenite. Einzig eine Probe liegt im Subarkose-Feld (Abb. 4.2). Sie sind relativ reif, korngestützt und nur selten matrixgestützt (z. B. Probe chi 02). In der Regel sind die Korngrenzen suturiert. Die Sandsteine sind feinkörnig und gut sortiert. Einzelne Körner sind abgerundet, wobei sie eine hohe Sphärizität haben. Der Zement besteht überwiegend aus Eisenoxid. Oft ist Hämatit als opake Phase zu erkennen. Wenige Sandsteine (z. B.

chi 09) haben einen Karbonatzement. Die Matrix weiterer Sandsteine besteht aus einem feinkörnigen, tonigen bis siltigen Material.



**Abb. 4.2** Sandsteinklassifikation nach Folk (1974) für die Proben der Santa Lucía-Fm..

Santa Lucía-Fm.	MI	Qp/Qm	Qm %	Qp %	Q:F:L*	n
Sandsteine	13,8	0,2	58,5	9,4	78 :4:18	7
Grauwancken		0,1	46,4	4	70 : 18 :12	3

**Tab. 4.6** Die Tabelle gibt einen Überblick über den durchschnittlichen Reife-Index der Sandsteine und Grauwancken der Santa Lucía-Fm. (\* gerundet; n: Anzahl der untersuchten Proben). Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

Die Grauwancken der Santa Lucía-Fm. sind arkosische und lithische Grauwancken (Abb. 4.2). Die Körner sind angerundet und zeigen eine geringe Sphärizität. Die Grauwancken sind relativ feinkörnig, allerdings ist der Übergang zur Matrix fließend. Die Matrix besteht wie bei den Sandsteinen aus tonigem bis siltigem Material. In der Matrix sind kleinere Quarz- und Feldspatbruchstücke unter dem Mikroskop sichtbar. Der Zement der Grauwancken besteht aus Eisenoxiden.

#### 4.2.2.2 Sandsteine der Cayara-Fm. (Abb. 4.3; Tab. 4.8)

In der Cayara-Fm. kommen nur Sandsteine vor. Im Klassifizierungsdiagramm (Abb. 4.3) liegen die Sandsteine im Quarzarenit-, im Sublitharenit- und im Litharenitfeld. Es überwiegt deutlich der Quarzanteil über die anderen Bestandteile. Diese Sandsteine zeichnen sich durch eine gute Sortierung



aus, die Sphärizität der Körner ist gering. Die Korngröße reicht von mittel- bis grobkörnig. Die Korngrenzen sind suturiert bis konvex-konkav. Eine Matrix ist kaum vorhanden.

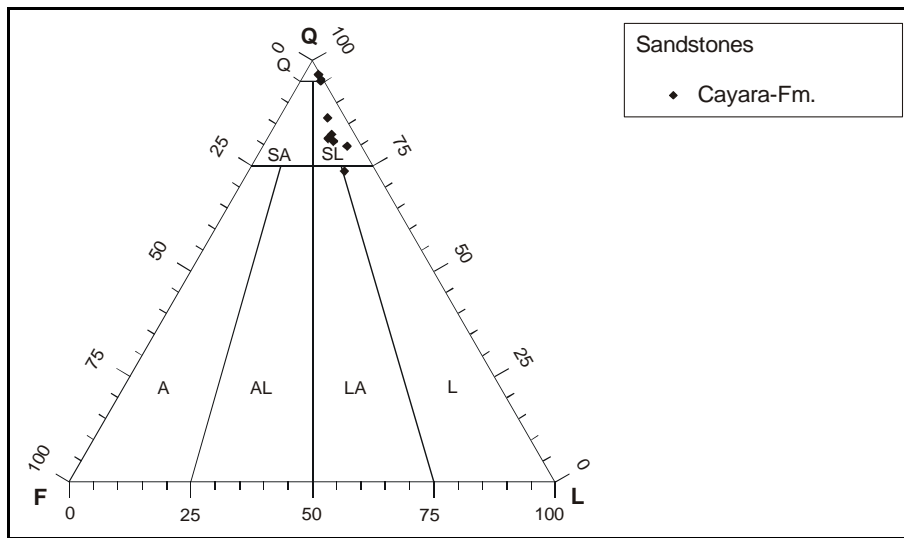


Abb. 4.3 Sandsteinklassifikation nach Folk (1974) der Cayara-Fm. (Legende siehe Abb. 4.2).

Cayara-Fm.	MI	Qp/Qm	Qm	Qp	Q:F:L *	n
Sandsteine.	79,6	0,1	71,5	9,5	86 : 3 : 11	9

Tab. 4.8 Der Reife-Index und das Qp/Qm-Verhältnis der Sandsteine der Cayara-Fm. (\* gerundet; n: Anzahl der untersuchten Proben). Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

#### 4.2.2.3 Die Sandsteine und Grauwacken der Potoco-Fm.

Die Sandsteine der Potoco-Fm. liegen im Klassifizierungsdiagramm (Folk 1974) im Quarzarenit-, Sublitharenit-, Litharenit- und arkosischen Litharenitfeld. Eine einzige Probe liegt im Feld lithische Arkose (Abb. 4.4).

#### Die Sandsteine der Potoco-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens (Abb. 4.4; Tab. 4.9)

Da die Potoco-Fm. im Osten von der Basis bis zum Top eine Entwicklung von fein- zu grobkörnigen Sedimenten durchläuft, ist es notwendig, die Sandsteine gemäss den Einheiten 1 (Basis) bis 5 (Top) zu klassifizieren (siehe Kap. 2 und 3).

Potoco-Fm. im Osten	MI	Qp/Qm	Qm	Qp	Q:F:L *	n	Reife
5. Einheit	4,1	0,2	60,7	12	76 : 0 : 24	1	unreif
4. Einheit	14,8	0,1	72	9,7	91 : 2 : 6	1	reif
3. Einheit	19,05	0,1	68,6	10,3	87 : 2 : 11	9	reif
2. Einheit	34,5	0,2	67,7	11,1	88 : 1 : 10	5	reif
1. Einheit	46,5	0,1	70,1	5,9	86 : 3 : 11	27	rel. reif
gesamt	23,8	0,1	63,5	7,8	78 : 2 : 12	43	
<b>Potoco-Fm. im:</b>							
Zentrum	21,4	0,2	52,4	10,4	74 : 5 : 21	10	reif
Süden	1,2	0,1	28,5	2,9	37 : 23 : 40	4	unreif

vorherige Seite **Tab. 4.9** Reife-Indizes der Sandsteine der Potoco-Fm.. In der ersten Reihe sind die Durchschnittswerte der Potoco-Fm. im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens angegeben, darunter die Werte für die verschiedenen Einheiten der Potoco-Fm.. Zuletzt sind die Werte für die Potoco-Fm. im zentralen und Südteil des Süd-Altiplano-Beckens angegeben (\* gerundet; n: Anzahl der untersuchen Proben). Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

Die Grauwacken der Potoco-Fm. sind als lithische Grauwacken anzusprechen (Abb. 4.4; Tab. 4.10).

Potoco-Fm.	Qp/Qm	Qm	Qp	Q:F:L *	n
Grauwacken <sup>1</sup>	0,05	61	3,5	83 : 2 : 17	2
Grauwacken <sup>2</sup>	0,2	45,3	8,7	74 : 5 : 21	1

**Tab. 4.10** Grauwacken der Potoco-Fm. (<sup>1</sup> Erste Einheit; <sup>2</sup> Potoco-Fm. im zentralen Süd-Altiplano-Becken; \* gerundet). Abkürzungen siehe Tab. 4.1.

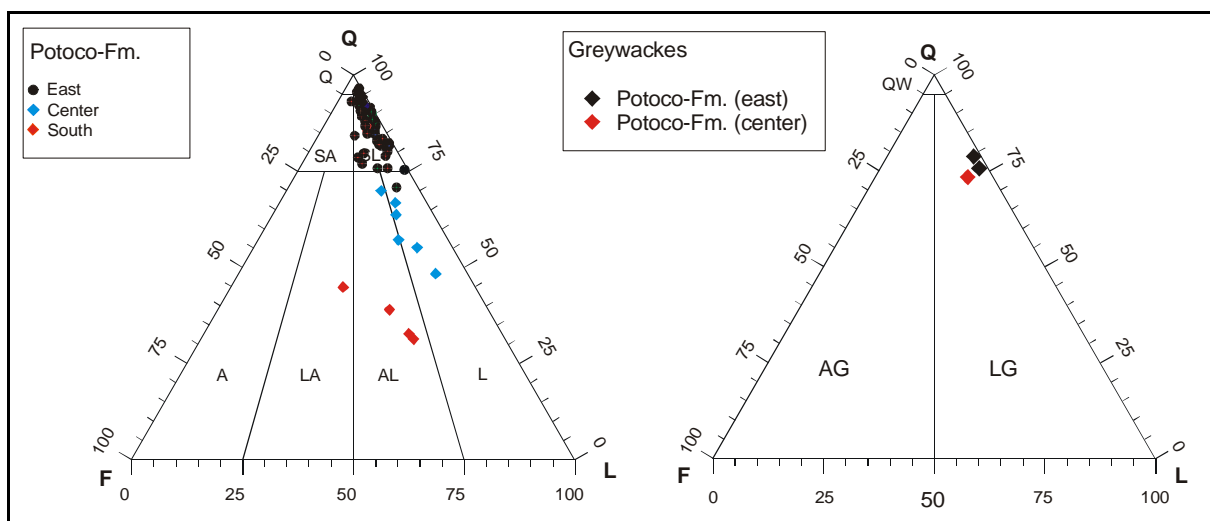
**Erste Einheit**

Makroskopisch ist die erste Einheit durch distale „sheet-flows“ und Playa-Ablagerungen gekennzeichnet (Kap. 2 und 3). Aus dieser Einheit wurden 27 Sandsteinproben untersucht (Tab. 4.9).

Die Sandsteine zeichnen sich durch eine gute bis sehr gute Sortierung aus. Alle Sandsteine sind feinkörnig. Der Rundungsgrad reicht von gut gerundet bis angerundet. Die Sphärizität ist hoch. Es kommen sowohl matrixgestützte wie auch korngestützte Sandsteine vor. Die Kornkontakte sind suturiert und/oder konvex-konkax. Der Zement besteht aus rötlich-violetttem Eisenoxid, Karbonat oder Silikat, die Matrix besteht aus tonigem bis siltigem Material. Einige Quarze haben Anwachssäume. Bei Animas sind in dieser Einheit vulkanische Gesteinsfragmente identifiziert worden (z. B. Proben: at 27, at 31).

Die Sandsteine der ersten Einheit haben einen hohen Reife-Index (Tab. 4.9) der über dem Durchschnitt der gesamten Potoco-Fm. liegt. Das Qp/Qm-Verhältnis ist relativ niedrig (Tab. 4.9). Auffällig ist der hohe Anteil an monokristallinem Quarz. Die Sandsteine sind als Quarzarenite und Sublitharenite anzusprechen.

In der ersten Einheit der Potoco-Fm. kommen Grauwacken vor (Tab. 4.10; Abb. 4.4). Ihr tonig-siltiger, rötlicher Matrixanteil liegt bei etwa 17%.



**Abb. 4.4** Sandsteine und Grauwacken der Potoco-Fm. (Legende siehe Abb. 4.2).

##### **Zweite Einheit**

Die Ablagerungen der zweiten Einheit sind Ablagerungen einer Playa-Ebene (Kap. 3). Die zugehörigen Sandsteine sind alle feinkörnig. Die Korngrenzen können sowohl suturiert wie auch konvex-konkav sein. Die Quarzkörner zeigen Anwachssäume, ihre Rundung reicht von kantig bis gut gerundet. Es kommen sowohl undulös als auch gerade auslöschende Quarze vor. Bei Chita sind am Top dieser Einheit Karbonatbruchstücke vorhanden (z. B. Probe: chi 26). Einige Sandsteine sind matrixgestützt (z. B. Proben: chi 22, ub 37). Der Zement besteht aus Eisenoxid, Silikat oder Karbonat. Die Sandsteine der zweiten Einheit sind als Sublitharenite anzusprechen. Der Reife-Index liegt mit 34,5 immer noch deutlich über dem Durchschnittswert der Potoco-Fm. (Tab. 4.9). Das Qp/Qm-Verhältnis liegt mit 0,2 etwas höher als der Durchschnittswert der Potoco-Fm. und auch dem Wert der ersten Einheit (Tab. 4.9). Der QFL-Wert (88:1:10) gibt einen Hinweis, dass kaum Feldspäte vorhanden sind (Tab. 4.9).

##### **Dritte Einheit**

Diese Einheit ist durch fluviatile Sedimente gekennzeichnet (Kap.3). Die Korngröße der untersuchten, gut sortierten Sandsteine reicht von fein- bis mittelkörnig. Die Kornkontakte sind konvex-konkav. In der Regel sind die Körner gut- bis angerundet. In dieser Einheit sind bei Ubina/Chita die ersten Karbonatgesteinsbruchstücke vorhanden (Proben: ub 39; ub 40; ub 41; chi 28; chi 29). Einige Sandsteine sind matrixgestützt (Proben: ub 40; ub 41; ub 42). Der Zement besteht aus Eisenoxid und Silikat. Die Sandsteine dieser dritten Einheit sind als Sublitharenite anzusprechen (Abb 4.4). Der Reife-Index (MI) liegt mit 19,05 deutlich niedriger als in den ersten zwei Einheiten der Potoco-Fm. (Tab. 4.9). Die Qp/Qm- und QFL-Verhältnisse liegen zwischen der ersten und der zweiten Einheit (Tab. 4.9).

##### **Vierte Einheit**

Diese Einheit besteht aus proximalen Ablagerungen eines alluvialen Fächers (Kap. 3). Die kantengerundeten Sandpartikel sind fein- bis mittelkörnig, ihre Spharizität ist gering. Dieser Sandstein ist matrixgestützt (ub 51). Der Zement besteht aus Eisenoxid, zum Teil ist ein Karbonatzement vorhanden.

Der Reife-Index dieser Probe beträgt 14,82 (Tab. 4.9). Das Qp/Qm-Verhältnis beträgt 0,1, das QFL-Verhältnis (91:2:6) (Tab. 4.9). Der monokristalline Quarzanteil ist deutlich höher als in den anderen Einheiten. Das QFL-Verhältnis gibt einen deutlichen Hinweis auf die kompositionelle Reife dieser Probe.

##### **Fünfte Einheit**

Die Ablagerungen wurden als fluviatile Ablagerungen eines verzweigten Flusssystems interpretiert (Kap. 3). Die Korngröße dieses matrixgestützten Sandsteins ist fein. Die Körner sind kantengerundet. Die Sphärizität ist hoch. Der Zement besteht aus Eisenoxid. Der Reife-Index beträgt 4,1, das Qp/Qm-Verhältnis 0,2 und das QFL-Verhältnis (76:0:24) (Tab. 4.9). Der Reife-Index zeigt eine hohe Reife dieser Probe, während das Qp/Qm-Verhältnis relativ höher als der anderen Einheiten ist.

### **Sandsteine der Potoco-Fm. im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens**

Die Sandsteine der zentralen Potoco-Fm. sind als Sublitharenite, arkosische Litharenite und Litharenite anzusprechen (Abb. 4.4). Die Sandsteine der 10 untersuchten Proben sind gut gerundet. Die Sphärizität ist hoch. Die Sortierung ist gut bis sehr gut. Einige Quarzkörner zeigen Einbuchtungen, andere Anwachssäume. In der Regel sind die Sandsteine matrixgestützt. Der Zement besteht aus Eisenoxid. Der Reife-Index beträgt 21,4 und ist damit relativ niedrig (Tab. 4.9). Das Qp/Qm-Verhältnis liegt mit 0,2 relativ hoch (Tab. 4.9). Das QFL-Verhältnis beträgt (74:5:21) (Tab. 4.9). Der Reife-Index ist ähnlich demjenigen der 2. und 3. Einheit der östlichen Potoco-Fm..

### **Die Sandsteine der Potoco-Fm. im Südteil des Süd-Altiplano-Beckens**

Aus diesem Gebiet konnten 4 Proben zur Potoco-Fm. untersucht werden. Das bedeutet, dass eine repräsentative Aussage aus diesem Gebiet nur beschränkt möglich ist. Die Sandsteine der Potoco-Fm. aus dem Südteil des Süd-Altiplano-Beckens sind als lithische Arkosen und arkosische Litharenite anzusprechen (Abb. 4.4).

Auffällig an diesen Proben ist der hohe Anteil an Feldspäten und der hohe Anteil an vulkanischen Gesteinsfragmenten. Der monokristalline Quarzanteil ist niedriger als in der sonstigen Potoco-Fm.. Sonstige Gemengteile werden von Amphibolen und Glimmern gebildet. Der Reife-Index ist mit 1,2 sehr niedrig (Tab. 4.9). Das Qp/Qm-Verhältnis von 0,1 ist ebenfalls relativ niedrig (Tab. 4.9). Das QFL-Verhältnis (37:23:40) zeigt eine deutlich andere Zusammensetzung als in der übrigen Potoco-Fm. (Tab. 4.9).

### **Zusammenfassung zur Potoco-Fm..**

Die Potoco-Fm. aus dem Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens lässt eine Entwicklung von recht reifen Sandsteinen an der Basis zu eher unreifen Sandsteinen am Top erkennen. Deutlich fällt der Reife-Index von der Basis zum Top.

Das Qp/Qm-Verhältnis steigt schon von der ersten zur zweiten Einheit von 0,08 auf 0,2 an. Von der dritten (vierten) zur fünften Einheit ist ein erneuter deutlicher Anstieg zu verzeichnen.

In den Playa-Ablagerungen des Süd-Altiplano-Beckens erreicht der Reife-Index einen Wert von 21,4, das Qp/Qm-Verhältnis einen Wert von 0,2. Dieser ist im Vergleich zur Potoco-Fm. aus dem Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens relativ hoch.

Die Potoco-Fm. aus dem Südteil des Süd-Altiplano-Beckens machte eine eigenständige Entwicklung durch. Der Reife-Index von 1,21 belegt deutlich die Unreife dieser Sandsteine aufgrund des vulkanischen Eintrags. Das Qp/Qm-Verhältnis von 0,1 ist daher relativ niedrig.

#### **4.2.2.4 Sandsteine und Grauwacken der San Vicente-Fm.**

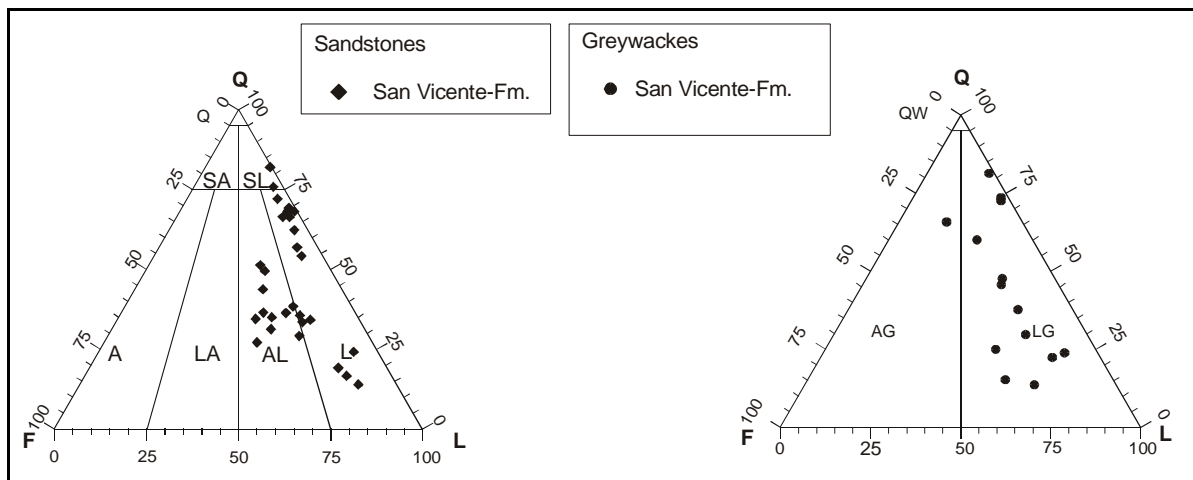
In der San Vicente-Fm. kommen sowohl Sandsteine wie auch Grauwacken vor (Abb. 4.5). Die Sandsteine der San Vicente-Fm. sind im Klassifizierungsdiagramm (Folk 1974) in den Feldern Litharenite, arkosische Litharenite und Sublitharenite anzutreffen (Abb. 4.5). Es überwiegt deutlich der Anteil an Gesteinsfragmenten über den der Feldspäte.

San Vicente-Fm.	MI	Qp/Qm	Qm %	Qp %	Q:F:L *	n
Sandsteine	2,1	0,3	30,9	6,7	46 : 12 : 41	29
Grauwacken		0,2	25,3	4,4	44 : 15 : 41	14

**Tab. 4.11** Indizes für die Sandsteine und Grauwacken der San Vicente-Fm. (\* gerundet; n: Anzahl der untersuchten Proben).

### Sandsteine

Die Bestandteile Quarz und Gesteinsbruchstücke in den Sandsteinen sind in etwa gleich groß. Der Anteil an Feldspäten ist deutlich geringer, der Anteil an Gesteinsfragmenten etwas höher. Der Reife-Index von 2,1 ist niedrig (Tab. 4.11). In einigen Proben überwiegen die karbonatischen über die anderen klastischen Gesteinsfragmente (chi 33; chi 34). Das Qp/Qm-Verhältnis (0,2) ist relativ hoch (Tab. 4.11). In Proben aus San Cristóbal ist sehr deutlich der vulkanische Einfluss in der San Vicente-Fm. erkennbar. Die Sortierung der Sandsteine ist schlecht bis sehr schlecht.



**Abb. 4.5** Sandsteine der San Vicente-Fm. (Legende siehe Abb 4.2).

Die Quarze in den Sandsteinen der San Vicente-Fm. zeigen sowohl gerade wie undulöse Auslöschung. Einige Quarze haben Einbuchtungen und/oder Anwachssäume. An manchen gerade auslöschenden Quarzen sind Böhm'sche Lamellen zu erkennen. Die frischen Feldspäte können eckig wie auch angerundet sein. Deutlich ist an Plagioklasen ein Zonarbau unter dem Mikroskop sichtbar. Einzig bei Proben aus Cerro Gordo sind die Feldspäte etwas zersetzt und eine beginnende Karbonatisierung ist unter dem Mikroskop sichtbar. Als Nebengemengteile kommen in der gesamten San Vicente-Fm. grüne Hornblenden vor. Der Zement besteht aus Eisenoxid und Silikat. Seltener ist ein Karbonatzement vorhanden. Bei einigen Proben mit hohem vulkanischen Anteil kann auch die Matrix aus vulkanischem Material bestehen. Auffällig an allen Proben der San Vicente-Fm. ist die geringe Zersetzung des vulkanischen Materials.

### Grauwacken

Die Grauwacken der San Vicente-Fm. sind lithische Grauwacken. Eine einzige Probe ist als arkosische Grauwacke zu bezeichnen (Abb. 4.5). Bei der San Vicente-Fm. ist der Anteil an instabilen Komponenten (z. B. Gesteinsfragmente) in den Grauwacken hoch, wobei der Anteil an

Gesteinsfragmenten überwiegt. In den Grauwacken aus Santa Inés kommen granitische Gesteinsfragmente vor (siehe Anhang). Die Sortierung ist sehr schlecht. Der Rundungsgrad einzelner Körner reicht von kantig bis gut gerundet. Oft sind Glimmer vorhanden. Als Nebengemengteile sind grüne Hornblenden und Schwerminerale unter dem Mikroskop sichtbar. Der Übergang von Matrix zum Korn ist fließend. Die Matrix besteht aus tonig-siltigem Material; gelegentlich ist eine vulkanische Matrix vorhanden; seltener kommt eine karbonatische Matrix vor.

#### **Zusammenfassung zur San Vicente-Fm..**

Die Sandsteine der San Vicente Fm. sind im gesamten Süd-Altiplano-Becken als unreife Sandsteine anzusprechen. Der Gesteinsfragmentsanteil ist relativ hoch, weshalb sie als Litharenite und arkosische Litharenite zu klassifizieren sind. In der gesamten San Vicente-Fm. ist der vulkanische Eintrag durch vulkanische Gesteinsfragmente nachzuweisen, oft haben die Sandsteine und Grauwacken eine vulkanische Matrix. Die Grauwacken der San Vicente-Fm. sind als lithische Grauwacken anzusprechen.

#### **4.2.2.5 Sandsteine der Chocaya-Fm.**

Die Sandsteine der Chocaya-Fm. konnten nur makroskopisch untersucht werden. Einzelne Gerölle sind darin vorhanden. Der vulkanische Einfluss in Form von Gesteinsfragmenten in den Sandsteinen ist sehr deutlich. Im Gelände sind sowohl Quarze, Feldspäte und andere, dunklere Anteile sichtbar. Die Sortierung dieser Sandsteine ist sehr schlecht. Wie die Sandsteine der San Vicente-Fm. sind die Sandsteine der Chocaya-Fm. wenig verfestigt (Kap. 2).

#### **4.3 Konglomerate der San Vicente-Fm.**

Ausgewählte Konglomerathorizonte wurden auf die quantitative Zusammensetzung der 2-3 cm großen Gerölle in einer 20 x 20 cm großen Fläche hin überprüft. Diese Klastengröße wurde ausgewählt, um den Einfluß von proximalen zu distalen Ablagerungen zu verringern, dabei sollten die untersuchten Konglomerate eine ähnliche Klastengröße haben. Die Gerölle geben Auskunft über die Lithologien in den Abtragungsgebieten und damit den Stand der Heraushebung bzw. des Abtragungsniveaus. Eines der ausgewählten Konglomerate ist das Basiskonglomerat, das im Zeitraum zwischen  $27,4 \pm 0,7$  Ma;  $25,3 \pm 1$  Ma/ $26,1 \pm 0,7$  Ma und  $24,3 \pm 1,2$  Ma (Datierungen siehe Tabelle und Karte im Anhang) abgelagert wurde. Andere Konglomerate sind über progressiven Diskordanzen markant in ihrer Komposition und geben damit Auskunft über die Zusammensetzung der erodierten Gesteine.

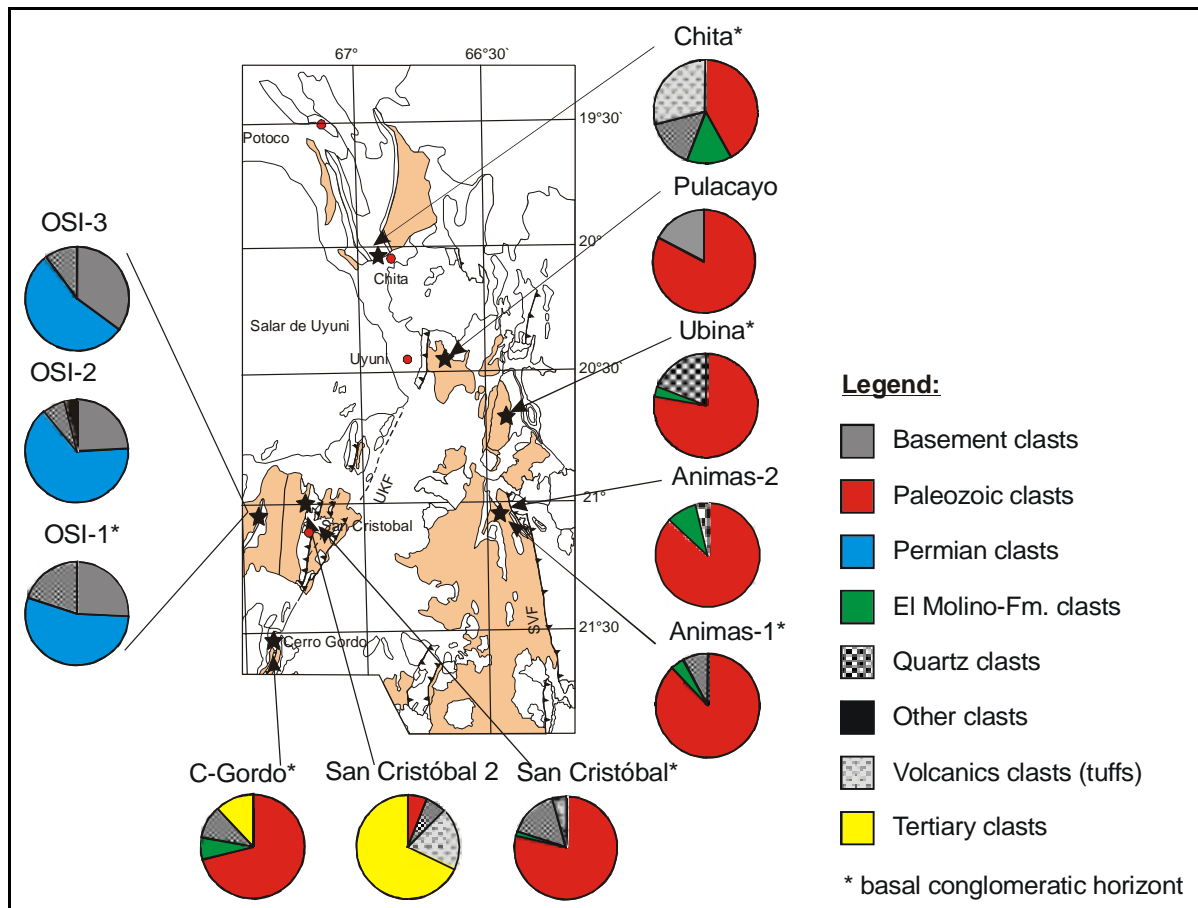
##### **4.3.1 Zusammensetzung der Konglomerate**

##### **4.3.2 Konglomerate im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens**

Die Konglomerate im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens werden durch paläozoische Sedimentklasten charakterisiert (Abb. 4.7). Der Anteil der paläozoischen Klasten liegt zwischen 45 % und 75 %, maximale Werte werden bei Animas mit 85 % erreicht. In allen Proben kommen Milchquarze mit

Anteilen von etwa 10 %, sowie Karbonatklasten der El Molino-Fm. mit ebenfalls etwa 10 % vor. Einzig bei Chita im Norden liegt der Anteil an aufgearbeitetem vulkanischem Material bei etwa 30 %.

Bei Pulacayo wurde zusätzlich ein stratigrafisch höhergelegenes Konglomeratniveau untersucht. Dieses liegt etwa 500 m unter einem Tuff mit einem Alter von  $10,4 \pm 0,3$  Ma (Tuff, Biotit, K/Ar). Das Pulacayo-Konglomerat hat mit 80 % paläozoischen Anteil und 20 % tertiären Anteil (Potoco-Fm.) keine Ähnlichkeit mit den Basiskonglomeraten im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens.



**Abb. 4.7** Zusammensetzung der Basiskonglomerate in der San Vicente-Fm. (Die Sterne zeigen die untersuchten Lokalitäten).

#### 4.3.3 Konglomerate aus dem zentralen und Südteil des S-Altiplano-Beckens

Im Zentrum des Süd-Altiplano-Beckens wurde das Basiskonglomerat bei San Cristóbal untersucht (Abb. 4.7). Dieses besteht bis zu 75% aus Klasten des Paläozoikums, 20% Milchquarzen, 5% Vulkaniten und wenigen Fragmenten der El Molino-Fm.. Damit zeigt es große Ähnlichkeit mit den Konglomeraten im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens. Ein Konglomerathorizont, San Cristóbal 2, über einer progressiven Diskordanz mit einem Alter von ~10 Ma ist mit 70% tertiären Sedimentklasten, 20% Vulkaniten, 5% Milchquarzen und 5% paläozoischen Anteilen deutlich abgesetzt. Im Südteil, bei Cerro Gordo, zeigt das Basiskonglomerat der San Vicente-Fm. ebenso Ähnlichkeiten mit den Basiskonglomeraten im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens (Abb. 4.7). Die Anteile der paläozoischen Fragmente, der Karbonatklasten der El Molino-Fm., der Milchquarze und der tertiären Sedimente liegen in der gleichen Größenordnung.

#### **4.3.4 Konglomerate aus dem Westteil des Süd-Altiplano-Beckens**

Im Westen, bei Santa Inés, bestehen das Basiskonglomerat und auch die Konglomerate in stratigrafisch höheren Niveaus der San Vicente-Fm. aus etwa 60 % permischen Vulkaniten (Datierung an einem Klast ergab ein Alter von  $256 \pm 7$  Ma), 25 % Basementgeröllen (Granitoide und leicht metamorphisierte Granitoide) und einigen Milchquarzen (Abb.4.7). Die Konglomerate zeigen damit eine ganz andere Zusammensetzung und Herkunft (siehe Kap. 5) als die Konglomerate im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens.