

5 Liefergebietsanalyse

5.1 Einführung und Methodik

Die Rekonstruktion von Liefergebieten basiert auf der Analyse der Sandstein- und der Konglomeratzusammensetzung (vergl. Kap. 4), der Schüttungsrichtungen (vergl. Kap. 2; Anhang Profilie) sowie der Auswertung der stratigrafischen Daten (Kap. 2). Wie bei der Petrografieanalyse wurde nach der Gazzi-Dickinson (GD-) Methode gezählt (Gazzi 1966; Dickinson 1970) und in die von Dickinson & Suczek (1979) und Dickinson et al. (1985) definierten Diagramme geplottet. Betrachtet wurde nur der primäre Detritus (auf 100% normiert), bei Mineralumbildungen wurde versucht, das Ursprungsmineral zu identifizieren.

Für die Definition der Liefergebiete wurden die bereits genannten Methoden (Dickinson & Suczek 1979; Dickinson et al. 1983; Dickinson 1985) nach Suttner & Basu (1981 & 1985; Mack 1984; Ridgeway & DeCelles 1993) erweitert. Diese erweiterten Methoden ermöglichen eine genauere Identifikation einzelner Bestandteile und ihrer Liefergebiete. Die Methode nach Suttner & Basu (1981 & 1985) betrachtet das Gesteinsfragment als Ganzes. Dadurch wird gewährleistet, dass die Information, die in einem Gesteinsfragment enthalten ist, nicht verloren geht, wenn das Liefergestein ein Sediment oder ein Vulkanit gewesen ist.

Die Methode nach Mack (1984) erweitert die Methode nach Dickinson & Suczek (1979) und Dickinson et al. (1985) um sogenannte „anormale Sandsteine“. Solche „anormalen Sandsteine“ enthalten Komponenten, die von der GD-Methode unberücksichtigt bleiben, wie z. B. granitoide und karbonatische Gesteinsfragmente. Diese sind aber zur Identifikation der Liefergesteine im Süd-Altiplano-Becken von besonderer Bedeutung. Mack (1984) schlug vor, die Komponenten solcher „anormalen Sandsteine“ in eigene Diagramme zu plotten bzw. die von Dickinson & Suczek (1979) definierten Diagramme um diese Parameter zu erweitern (siehe **Lv-Lc-Ls-** und **Qp-Lc-Ls-Diagramme**).

Die nach Ridgeway & DeCelles (1993) erweiterte GD-Methode berücksichtigt alle Korngrößen, da z. B. die granitoiden Gesteinsfragmente sicher nur in der Korngröße Grobsandstein zu erkennen sind.

Die Abbildung 5.1 und die Tabelle 5.1 stellen die definierten Liefergebiete und die in diesen Liefergebieten vorkommenden Gesteine dar (Dickinson & Suczek 1979; Dickinson et al. 1983). Die für die Liefergebietsanalyse benötigten Parametern sind in Tab. 5.2 dargestellt. Damit definierte Dickinson (1988) auch charakteristische Petrofazien (siehe Kap. 5.8). Diese können auch zur Liefergebietsanalyse herangezogen werden.

Im **Qt-FL-Diagramm** werden alle quarzischen Körner ($Q_m + Q_p + \text{Chert}$) gemeinsam als Qt (*total quartz*) gezählt. Somit legt das **Qt-F-L-Diagramm** einen besonderen Wert auf die Kornstabilität und gibt Hinweise auf die Verwitterungsprozesse, die Transportmechanismen und die Liefergesteine.

Im **Qm-F-Lt-Diagramm** werden alle Gesteinsfragmente in Lt ($L_s + L_v + L_g$) zusammen geplottet. Somit geht besonders die Korngröße des Ursprungsgesteins ein, da bei der Abtragung feinkörniger Gesteine mehr Gesteinsfragmente entstehen (Dickinson & Suczek 1979).

Das **Qp-Lv-Ls-Diagramm** (polykristalliner Quarz: $Q_p + \text{Chert}$) ist nützlich, um die Liefergebiete „magmatic arc“ und „collision orogen & fold-thrust-source“ zu unterscheiden.

Im **Qm-P-K-Diagramm** werden die Unterschiede von plutonischen/vulkanischen Liefergebieten gegenüber einem Liefergebiet „continental block“ deutlich. Dabei geht der zunehmende Reifegrad der Sandsteine ein.

Jedes der hier gezeigten Diagramme kann zur kritischen Unterscheidung zwischen Provenienzgebieten und Sedimentationsräumen dienen (Dickinson & Suczek 1979; Dickinson 1985).

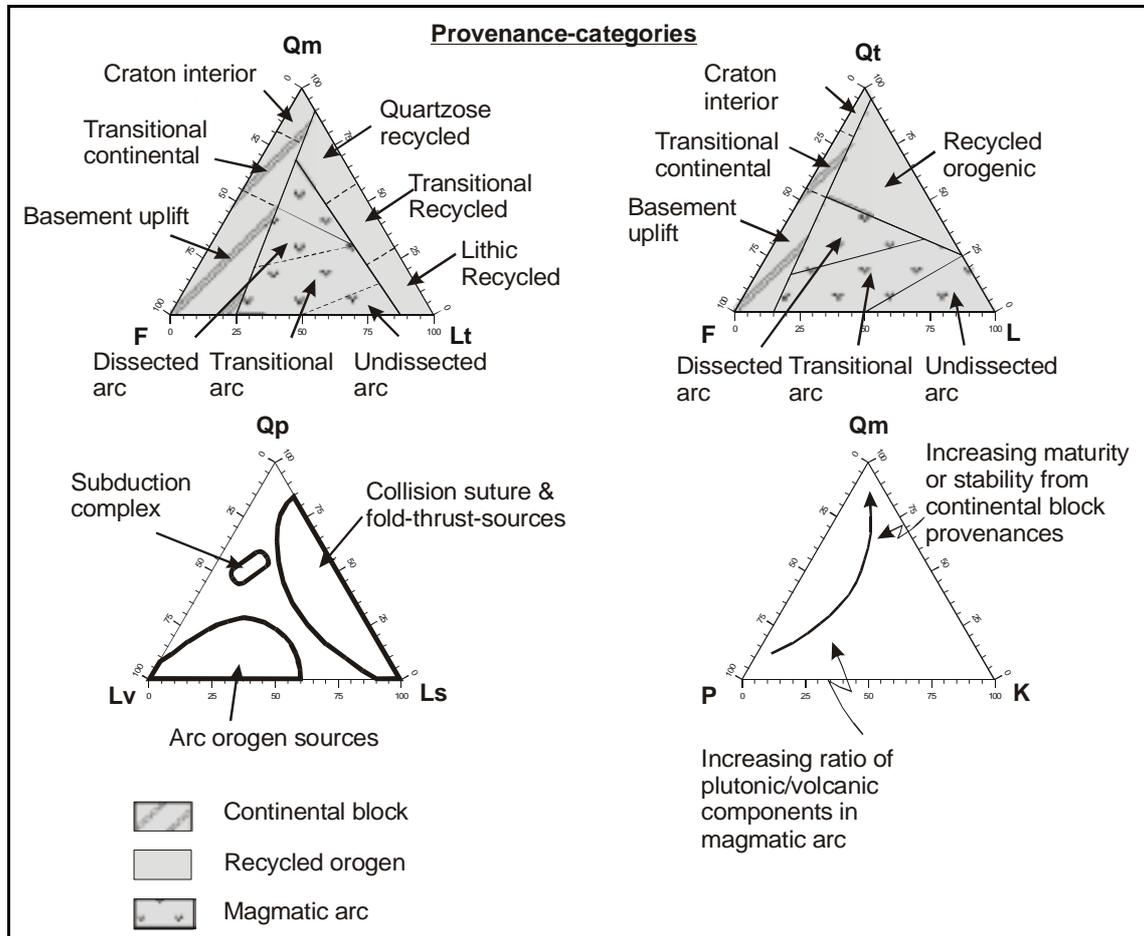


Abb. 5.1 Provenienz-Diagramme nach Dickinson & Suczek (1979). Die Endglieder werden in Tabelle 5.1 erklärt.

Qm-F-Lt-Diagramm		
Diagrammfelder	Ursprungsgebiete bzw. -gesteine	Ablagerungsraum
Continental block	siehe Qt-F-L-Diagramm	siehe Qt-F-L-Diagramm
Recycled orogen	Falten- und Überschiebungsgürtel	z. B. Vorlandbecken
Quartzose recycled	Dominanz von Quarzsandsteinen	z. B. Vorlandbecken; Ablagerung von quarzreichen Sandsteinen
Transitional recycled		
Lithic recycled	Dominanz von Gesteinsbruchstück-Sandsteinen	z. B. Vorlandbecken; Ablagerung von Gesteinsfragment-sandsteine
Magmatic arc	siehe Qt-F-L-Diagramm	siehe Qt-F-L-Diagramm

Qt-F-L-Diagramm		
Diagrammfelder	Ursprungsgebiete bzw. -gesteine	Ablagerungsraum und Gesteine
Continental block		
<i>Craton interior</i>	Stabile Kratone und Plattformen; Abtragung kristalliner Gesteine und älterer Sedimente	Ablagerung an passiven Kontinentalrändern und an der Kraton-zugewandten Seite von Vorlandbecken; Ablagerung reifer Sandsteine
<i>Transitional continental</i>		
<i>Basement uplift</i>	Kristallines Basement; Abtragung kristalliner Gesteine und älterer Sedimente	z. B. Gräben; Ablagerung von Arkosen und Subarkosen
Recycled orogen	Falten- und Überschiebungsgürtel; Abtragung von sedimentären und metasedimentären Gesteine	z. B. Vorlandbecken; Ablagerung von Gesteinsfragment-Sandsteinen
Magmatic arc		
<i>Dissected arc</i>	Plutonische Gesteine durch Abtragung des Grundgebirges; Feldspat- und quarzreiche Gesteine	„fore-arc“ und „back-arc“; Ablagerung von feldspat-, gesteinsfragment- und quarzreichen Sandsteinen
<i>Transitional arc</i>		
<i>Undissected arc</i>	Vulkanische Gesteine ± magmatische Gesteine	Trenches; „fore-arc“-Becken, Becken innerhalb des vulk. Bogens; Ablagerung feldspatreicher Gesteine und Gesteinsfragment-Sandsteine
Qp-Lv-Ls-Diagramm		
Diagrammfelder	Ursprungsgebiet	Ablagerungsraum
Collision suture & fold-thrust sources	Liefergebiet innerhalb von Orogenen	Ablagerungen in Vorlandbecken
Subduction complex sources	Liefergebiet im Bereich gehobener Akkretionskeile	Ablagerung in „fore-arc“-Becken und Tiefseeegräben
Arc orogen sources	Liefergebiet innerhalb aktiver magmatischer Bögen	„intra-arc“- bzw. „back-arc“-Becken

Tab. 5.1 Definition der Felder in den Provenienz-Diagrammen sowie der Gesteine und den dazu gehörigen Ablagerungsräumen (Dickinson & Suczek 1979).

Die Abbildung 5.1 und die Tabelle 5.1 stellen die definierten Liefergebiete, die darin vorkommenden Gesteine und den möglichen Ablagerungsraum der von diesen Liefergebieten und Gesteinen abgetragenen Sedimente dar (Dickinson & Suczek 1979; Dickinson et al. 1983).

Abkürzungen	Erläuterung	Rekalkulierte Parameter (Petrofazien)	Erläuterung
Qm	monokristalline Quarzkörner	Qt-F-L:	$Qt = Qm + Qp + C$ $F = P + K$ $L = Lv + Ls + Lc$
Qp	polykristalliner Quarz	Qm-F-Lt:	$Qm = Qm$ $F = P + K$ $Lt = Lges + Qp + Chert$
C	Chert-Fragmente	Qm-P-K:	$Qm = Qm; P = P; K = K$
P	Plagioklas	Qp-Lv-Ls:	$Qp = Qp + Chert;$ $Lv = Lv; Ls = Ls$
K	Kalifeldspat	Lv-Lc-Ls:	$Lv = Lv; Lc = Lc; Ls = Ls$
Lv	vulkanische Gesteinsfragmente	Qp-Lc-Ls	$Qp = Qp + Chert;$ $Lc = Lc; Ls = Ls$
Lc	karbonatische Gesteinsfragmente		
Ls	Sedimentäre, klastische Gesteinsfragmente		
Lg	granitische Gesteinsfragmente		

vorherige Seite **Tab. 5.2** Daten für die Provenienz-Analyse. Daneben die für die Liefergebietsanalyse ermittelten Parameter.

Weitere wichtige Daten für die Liefergebietsanalyse sind Schrägschichtungsmessungen, Ausrichtung von Kolkmarken und Imbrikationsmessungen. Diese Daten erlauben es, Paläoströmungsrichtungen zu rekonstruieren. Weitere wichtige Daten und Hinweise für die Liefergebietsanalyse liefern die bereits bearbeiteten Daten aus der Stratigrafie (Kap. 2), der Faziesanalyse (Kap. 3) und der Petrografie (Kap. 4).

5.2 Liefergebiete der spätpaläozänen bis miozänen Sedimente des Süd-Altiplano-Beckens

Mögliche Herkunftsgebiete der spätpaläozänen bis miozänen Sedimente im Süd-Altiplano-Becken können die Hochgebiete der West- und der Ostkordillere sein. Hinzu kommen Gesteine der internen Hochgebiete im Süd-Altiplano-Becken und, ab dem Ober-Oligozän, Vulkane (Karte zur Liefergebietsanalyse siehe Anhang).

Obwohl die neogenen bis rezenten Vulkane und ihre Auswurfsprodukte ältere Gesteine bedecken, sind präkambrische Gesteine, Granitoide bis niedrigmetamorphe Gesteine als Xenolithe im Westen des Arbeitsgebietes bekannt (Jimenez de Rios 1992 in Horton 2001). Nördlich des Salar de Uyuni sind im Gebiet um den Cerro Uyarani Aufschlüsse von präkambrischen Gesteinen beschrieben worden (Wörner et al. 2000). Dieses kristalline Basement selbst und Gerölle in oligozänen Sedimenten wurden geochemisch untersucht (Wörner et al. 2000).

Weiter im Westen im Gebiet nördlich von Calama (Chile) sind permische, kontinental-vulkanische und vulkanoklastische Abfolgen mit einer Mächtigkeit von etwa 2000 m aufgeschlossen (Günther 2001). Östlich der Präkordillere (Abb. 5.3) lagern rezente Vulkanite diskordant über permischen vulkanoklastischen Abfolgen (Reutter, mündl. Mitteilung).

Im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens, in SW-NE-Richtung verlaufend, sind entlang der UKFZ paläozoische Gesteine aufgeschlossen. Sie bestehen aus feinkörnigen Sand- und Tonsteinen des Silurs und Ordoviziums. Bei Soniquera, im Gebiet um Cerro Gordo, kommen aus dem Paläozoikum grobkörnige Sandsteine und einige Konglomerate hinzu (Egenhoff 2000). An einigen Lokalitäten entlang der UKFZ sind außerdem kretazische bis alttertiäre klastische und karbonatische Sedimente aufgeschlossen, wie bei Corregidores und bei Khala Huasi (Kartierung des Süd-Altiplano-Beckens; YPFB-Santa Cruz 1992).

Im Osten des rezenten Süd-Altiplano-Beckens erhebt sich die Ostkordillere mit über 6500 m NN und einer Breite von etwa 250 km. Der tektonische Kontakt zwischen dem rezenten Süd-Altiplano-Becken und der Ostkordillere wird von der westvergente San Vicente-Überschiebung gebildet (Abb. 5.2; YPFB-Santa Cruz 1992; Müller 2000). Im Hangenden dieser Störung wurden Gesteine an die Oberfläche transportiert, die später erodiert und daraufhin im Süd-Altiplano-Becken abgelagert wurden.

In der westlichen Ostkordillere sind sedimentäre bis niedriggradig metamorphe, paläozoische Gesteine sowie Gesteine des Paläozoikums, Kreide und des Tertiärs aufgeschlossen (Egenhoff 2000; Müller 2000; Fiedler 2001).

Auf diesen Angaben basierend, sind die möglichen Herkunftsgesteine für die paläozänen bis miozänen Sedimente im Süd-Altiplano-Becken folgende:

- Aus Osten: paläozoische, kretazische bis alttertiäre sedimentäre Gesteine sowie oligozäne bis miozäne vulkanische Gesteine.
- Aus dem Zentrum: paläozoische, kretazische bis alttertiäre sedimentäre Gesteine und tertiäre Vulkanite.
- Aus Westen: präkambrisches Basement, permische Vulkanite, tertiäre vulkanische Gesteine und untergeordnet kretazische bis alttertiäre sedimentäre Gesteine.

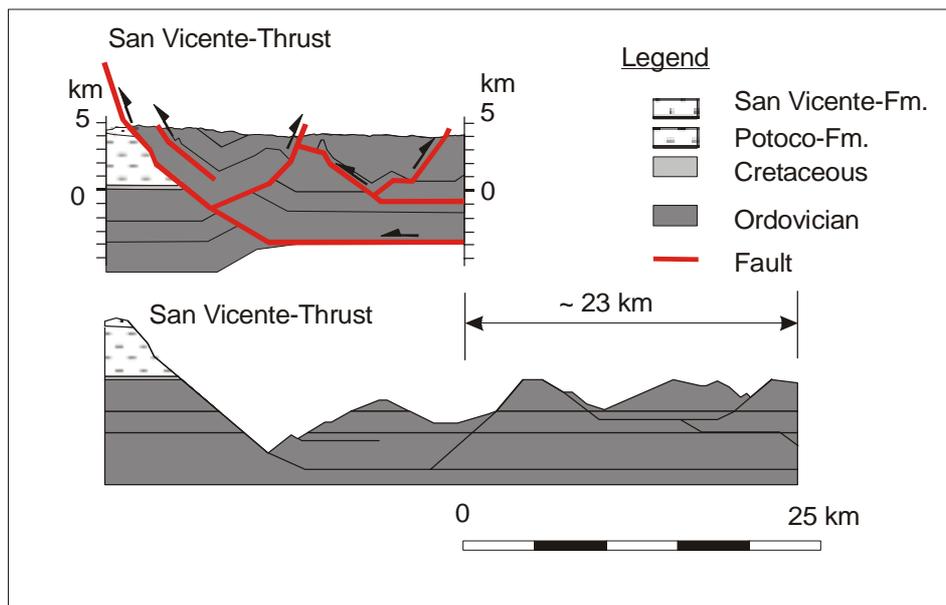


Abb. 5.2 Profil und Vergenz der Störungen am Übergang vom Süd-Altiplano-Becken zur Ostkordillere südlich von Atocha (Müller 2000). Die Gesteine im Hangenden dieser Störungen sind mögliche Liefergebiete für die tertiären Sedimente im Süd-Altiplano-Becken. Vor allem durch die westgerichtete Vergenz der San Vicente-Störung wurden ältere Gesteine erodiert und deren Abtragungsprodukte in das Süd-Altiplano-Becken transportiert (Lage des Profils siehe Karte Anhang).

Als wichtiger Hinweis für die Liefergebietsanalyse wird die Vergenz einzelner Störungen bzw. von Störungssystemen betrachtet und die Hebung und Transportrichtung von Gesteinen im Hangenden einzelner Störungen (Abb. 5.2). Aus der Hebung der „Proto-Ostkordillere“ resultierte bereits im frühen Eozän ein Hochgebiet. Die Kornvergrößerungsabfolge der eozänen bis unter-oligozänen Potoco-Fm. lässt diese Schlussfolgerung zu (Kap. 2; siehe Profile Anhang). Auch Paläoströmungsmessungen im Ostteil des Süd-Altiplano-Becken zeigen Schüttungsrichtungen aus Osten an (siehe Profile Anhang). Dieser Trend setzt sich durch die gesamte Potoco- bis zur San Vicente-Formation fort.

Das tektonische Regime des oligozänen zentralen Süd-Altiplano-Beckens ist ein anderes als das im Osten gewesen. So wird nach eigenen Geländeuntersuchungen und Literaturangaben (Levenhagen 2001) eine rezent als Überschiebung aufgeschlossene Störung nördlich von San Cristóbal als invertierte Abschiebung, die eine Grabenstruktur begrenzte, interpretiert. Durch die Hebung der Grabenränder wurden Gesteine an die Oberfläche gebracht und dabei erodiert. Diese Gesteine bilden

die Liefergesteine für die Sedimente der basalen San Vicente-Fm. im zentralen Süd-Altiplano-Becken. Die Erosion der Karbonate der El Molino-Fm. und der paläozoischen Gesteine im zentralen Süd-Altiplano-Becken begann etwa $27,4 \pm 0,7$ Ma (Tuff, Biotit, K/Ar).

5.3 Beschreibung der untersuchten Sandsteine

Die für die Liefergebietsanalyse untersuchten Proben stammen aus der Santa Lucía-, der Cayara-, der Potoco- und der San Vicente-Formationen (Tab. siehe Anhang).

Es stellte sich während der Liefergebietsanalyse heraus, dass Gesteinsmaterial sowohl als „direct contribution“ als auch als „recycled contribution“ im Sinne von Pettijohn et al. (1987) in den Sedimenten vorhanden ist. Es war daher schwierig mehrzyklisch aufgearbeitetes Material eindeutig einem Liefergestein zuzuordnen. Dies betrifft das sedimentäre-klastische Material, während vulkanisches, karbonatisches und granitoides Material einphasig klare Hinweise auf ihre Herkunft lieferten.

5.4 Konglomerate (Beschreibung siehe Kap. 4.3.1)

Die im Gelände gezählten und identifizierten Konglomeratklasten wurden auch zur Identifikation der Liefergesteine herangezogen (vergl. Kap. 4; Abb. 4.7) und wurden folgendermaßen identifiziert:

- granitoide Klasten
- permische vulkanische Klasten, identifiziert aufgrund ihrer Lithologie (eine Datierung an einem Geröll ergab 256 ± 7 Ma (siehe Anhang)).
- karbonatische Klasten mit Ooiden und zerbrochenen Stromatolithen aus der El Molino-Fm.
- graue bis grüne, feinkörnige Sandstein- und Siltsteinklasten bzw. Gerölle; diese Klasten wurden dem Ordovizium bzw. Silur zugeordnet
- rötlich-braune, fein- bis grobkörnige Sandsteine, oft auch Siltsteine; diese Klasten konnten der Potoco-Fm. zugeordnet werden
- tertiäre Vulkanite; helle, fast weiße Tuffe, mit großen, fast idiomorphen Biotitkristallen

5.5 Gesteinsfragmente in den untersuchten Sandsteinen

Deutlich treten in den Sandsteinen und Grauwacken der San Vicente-Fm. Gesteinsfragmente hervor (Kap. 4). Deren Identifikation spielt eine große Rolle bei der Liefergebietsanalyse, weil sie im Einzelfall direkt einem Gesteinstyp zugeordnet werden können.

- **Vulkanische Gesteinsfragmente (Lv)** kommen in der gesamten San Vicente-Fm. vor; in der Potoco-Fm. nur bei Cerro Gordo;
- **Granitoide Gesteinsfragmente (Lg)** kommen nur bei Santa Inés in der San Vicente-Fm. vor;
- **Klastische sedimentäre Gesteinsfragmente (Ls)** kommen, mit Ausnahme der Cayara-Fm., in unterschiedlichen Anteilen in allen Formationen des Süd-Altiplano-Beckens vor;

- **Karbonatische Gesteinsfragmente (Lc)** kommen, mit einigen Ausnahmen auch in der Cayara-Fm., im stratigrafisch höheren Teil der Potoco-Fm. und im unteren Teil der San Vicente-Fm. vor;

5.6 Interpretation der Liefergebietsanalyse nach Dickinson & Suczek (1979)

5.6.1 Santa Lucía- und Cayara-Formationen

Sandsteine der Santa Lucía- und Cayara-Formationen liegen im quarzreichen Sektor des „recycled-orogen“-Feldes (Abb. 5.3). Das **Qp-Lv-Ls**-Diagramm zeigt eine Provenienz dieser Sandsteine aus einem Kollisionsorogen oder einem Falten- und Überschiebungsgürtel an, welche im wesentlichen aus Sedimentgesteinen bestehen (Abb. 5.3).

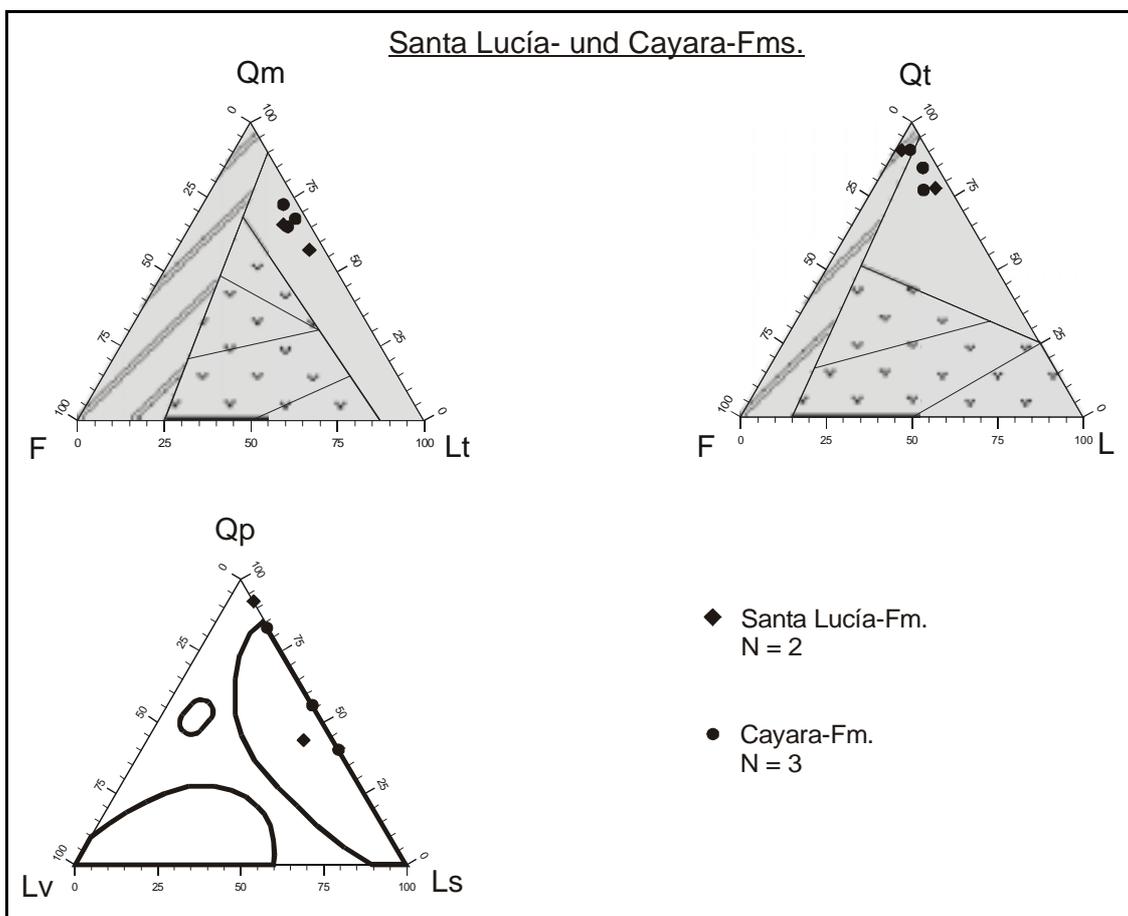


Abb. 5.3 Proben der Santa Lucía- und Cayara-Formationen, geplottet in die Provenienz-Diagramme (Dickinson & Suczek 1979; Legende siehe Abb. 5.1; Tab. 5.1 und Tab. 5.2).

5.6.2 Die Potoco-Fm.

Im **Qm-F-Lt-Diagramm** liegt die gesamte östliche Potoco-Fm. im „recycled orogenic“-Feld, genauer im „quartzose recycled“-Feld (Abb. 5.4). Somit liefert dieses Diagramm einen Hinweis, dass die Ursprungsgesteine der östlichen Potoco-Fm. in einem Falten- und Überschiebungsgürtel mit einer Dominanz von Quarzsandsteinen gelegen haben (siehe Tab. Nr. 5.1). Damit gibt dieses Diagramm

einen Hinweis auf den Ursprung von Gesteinen, wie sie rezent in der westlichen Ostkordillere vorkommen.

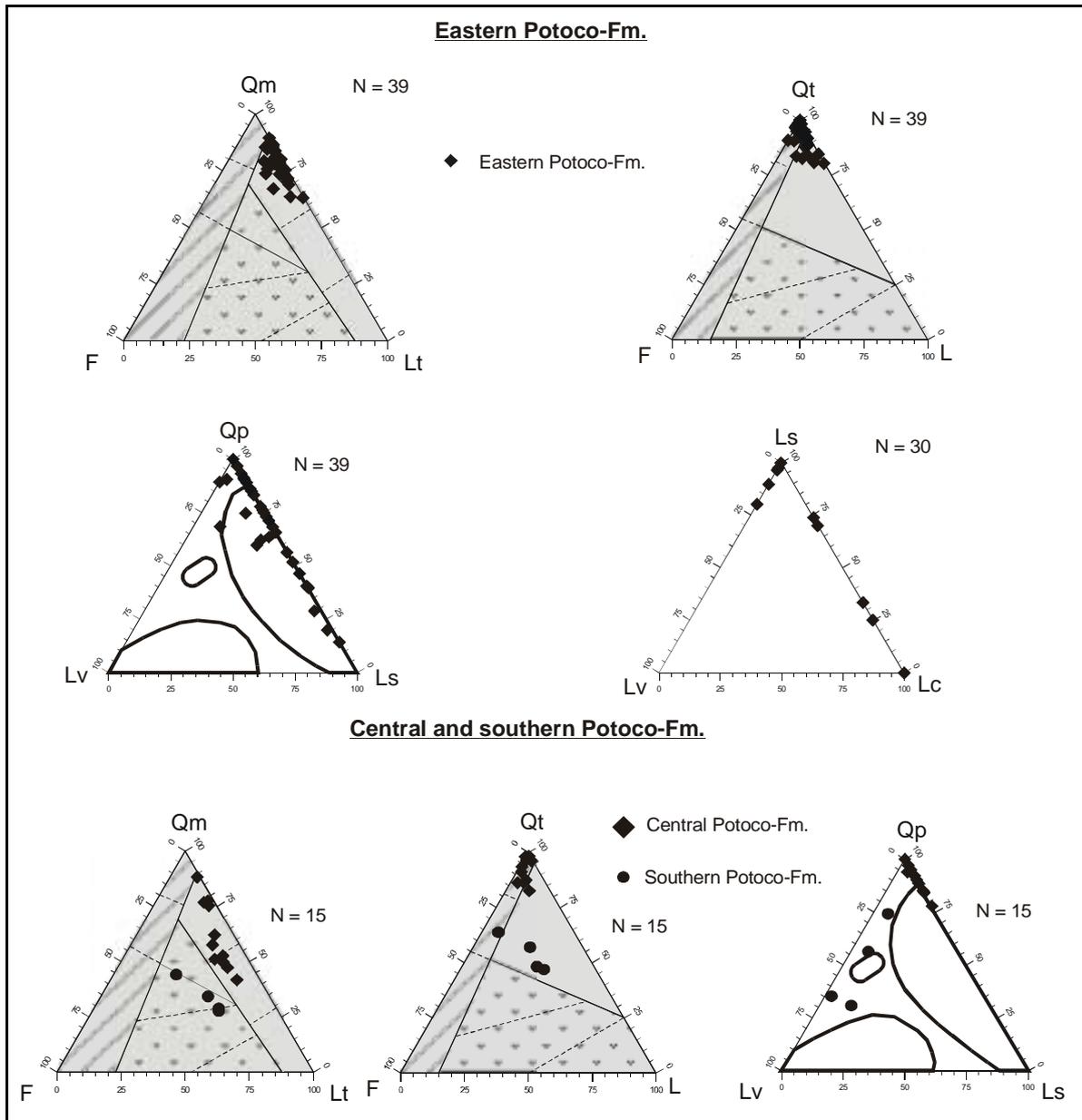


Abb. 5.4 Proben der Potoco-Fm. (Legende siehe Abb. 5.1 und Tab. 5.1 und 5.2).

Im **Qt-F-L-Diagramm** liegt die östliche Potoco-Fm. in den „continental block-“ und „recycled orogenic“-Feldern (Abb. 5.4). Da nach eigenen Beobachtungen und Literaturangaben für die Potoco-Fm. kein „continental block“-Liefergebiet in Frage kommt (Müller 2000; Fiedler 2002), ist das **Qt-F-L-Diagramm** in diesem Fall nicht direkt interpretierbar. Wenn die Sandsteine der östl. Potoco-Fm. durch mehrfache Aufarbeitung immer reifer wurden, wie es z. B. in Vorlandbecken der Fall ist, dann ist dieses Diagramm auf die Potoco-Fm. anwendbar (siehe Kap. 6). Das Feld „recycled orogenic“ schliesst die Anwesenheit von sedimentären und metasedimentären Gesteinen als Ursprungsmaterial für die untersuchten Sedimente ein. Der Unterschied zum **Qm-F-Lt-Diagramm** liegt

möglicherweise in der unklaren Stellung von Chert. Dieser wird im **Qt-F-L-Diagramm** zum Qt-Feld, im **Qm-F-Lt-Diagramm** zum Lt-Feld gezählt (siehe Tab. 5.2).

Die Sandsteine der Potoco-Fm. im zentralen und Südteil des Süd-Altiplano-Beckens unterscheiden sich von der Potoco-Fm. im Ostteil durch die Anwesenheit von vulkanischen Gesteinsfragmenten bzw. von vulkanischen Quarzen. Sie kommen bei Cerro Gordo vor, während bei San Cristóbal vulkanische Quarze vorkommen. Diese vulkanischen Quarze haben Einbuchtungen (*embayments*), die eine vulkanische Herkunft dieser Quarze eindeutig belegen. In den übrigen Lokalitäten des Süd-Altiplano-Beckens überwiegt der Anteil von sedimentären Gesteinsfragmenten in der Potoco-Fm., und die Quarze zeigen keine Einbuchtungen.

Im **Qp-Lv-Ls-Diagramm** (Dickinson & Suczek 1979) liegt ein Großteil der Potoco-Fm. im „collision suture & fold-thrust-sources“-Feld. Dieses Feld gehört ebenfalls zur „recycled orogen province“ und bestätigt damit das **Qm-F-Lt-Diagramm**. Dieses Diagramm liefert damit einen weiteren Hinweis auf die Herkunftsgesteine der Potoco-Fm. aus der „Proto-Ostkordillere“ und ihre Ablagerung in einem Vorlandbecken (siehe Kap. 6). Die Proben außerhalb des „collision suture & fold-thrust-sources“-Feldes stammen aus Cerro Gordo. Diese Sedimente der Potoco-Fm. haben in unterschiedlichen Anteilen vulkanische Gesteinsfragmente mitverarbeitet und liegen in der Nähe des „arc-orogen“-Liefergebietes.

Aufgrund dieser Angaben sind die Bestandteile der Potoco-Fm. nach Pettijohn et al. (1987) als „recycled contributions“, also als Sedimente, wie sie in der Ostkordillere vorkommen, zu betrachten, mit Ausnahme der karbonatischen (Proben aus dem Ostteil) und der vulkanischen Gesteinsfragmente (Proben aus Cerro Gordo). Diese Bestandteile können als „direct contributions“ betrachtet werden. Bei einer mehrfachen Aufarbeitung wären sie als instabile Komponente möglicherweise nicht mehr als solche vorhanden.

5.6.3 San Vicente-Fm.

Die San Vicente-Fm. enthält neben zahlreichen Gesteinsfragmenten aus vulkanischem Material vor allem solche aus terrigenen Sedimentgesteinen. Im basalen Teil des San Vicente-Fm. kommen zusätzlich karbonatische Gesteinsfragmente vor (siehe Anhang Tabelle).

Paläoströmungsmessungen an Schrägschichtungen und imbrizierte Klasten im Ostteil des Süd-Altiplano-Becken zeigen Schüttungsrichtungen aus östlichen Richtungen.

Im **Qt-F-L-Diagramm** liegt die San Vicente-Fm. in den „recycled orogenic“- und „dissected arc“-Feldern (Abb. 5.5; Tab. 5.1). Die Liefergesteine der San Vicente-Fm. können somit Sedimente und Metamorphite sein (Tab. 5.1). Solche Gesteine sind in der Ostkordillere aufgeschlossen (Egenhoff 2000; Müller 2000). Die Gesteinsfragmente der östlichen und zentralen San Vicente-Fm. werden von feinkörnigen sedimentären, vulkanischen und karbonatischen Fragmenten gebildet. Somit könnten die Liefergesteine der San Vicente-Fm. aus einem Hochgebiet stammen, wie es rezent u.a. die Ostkordillere bildet. Die klastischen und karbonatischen Gesteinsfragmente stammen aus paläozoischen und kretazischen bis altpaläozänen Gesteinen. Allerdings sind auch Liefergebiete im zentralen Süd-Altiplano-Becken möglich. Auch hier sind in den Hochgebieten ähnliche Gesteine wie in

der Ostkordillere vorhanden. Die vulkanischen Fragmente stammen aus der vulkanischen Tätigkeit im Süd-Altiplano-Becken.

Im **Qm-F-Lt-Diagramm** liegen die Liefergesteine der San Vicente-Fm. in den „recycled orogen“, „dissected“ und „transitional arc“-Feldern. Sehr deutlich liegt die San Vicente-Fm. in den „quartzose-“ und „lithic-recycled“-Feldern. Damit können die Sedimente der San Vicente-Fm. aus einem Falten- und Überschiebungsgürtel mit sedimentären und metamorphen Gesteinen stammen und z. B. in einem Vorlandbecken sedimentiert worden sein. Die Liefergesteine aus dem „magmatic arc“-Feld werden von den oligozänen bis miozänen vulkanischen Auswurfsprodukten und Intrusionen gebildet. Diese Gesteine können unter anderem in einem „back-arc“-Becken bzw. hinter dem vulkanischen Bogen sedimentiert worden sein.

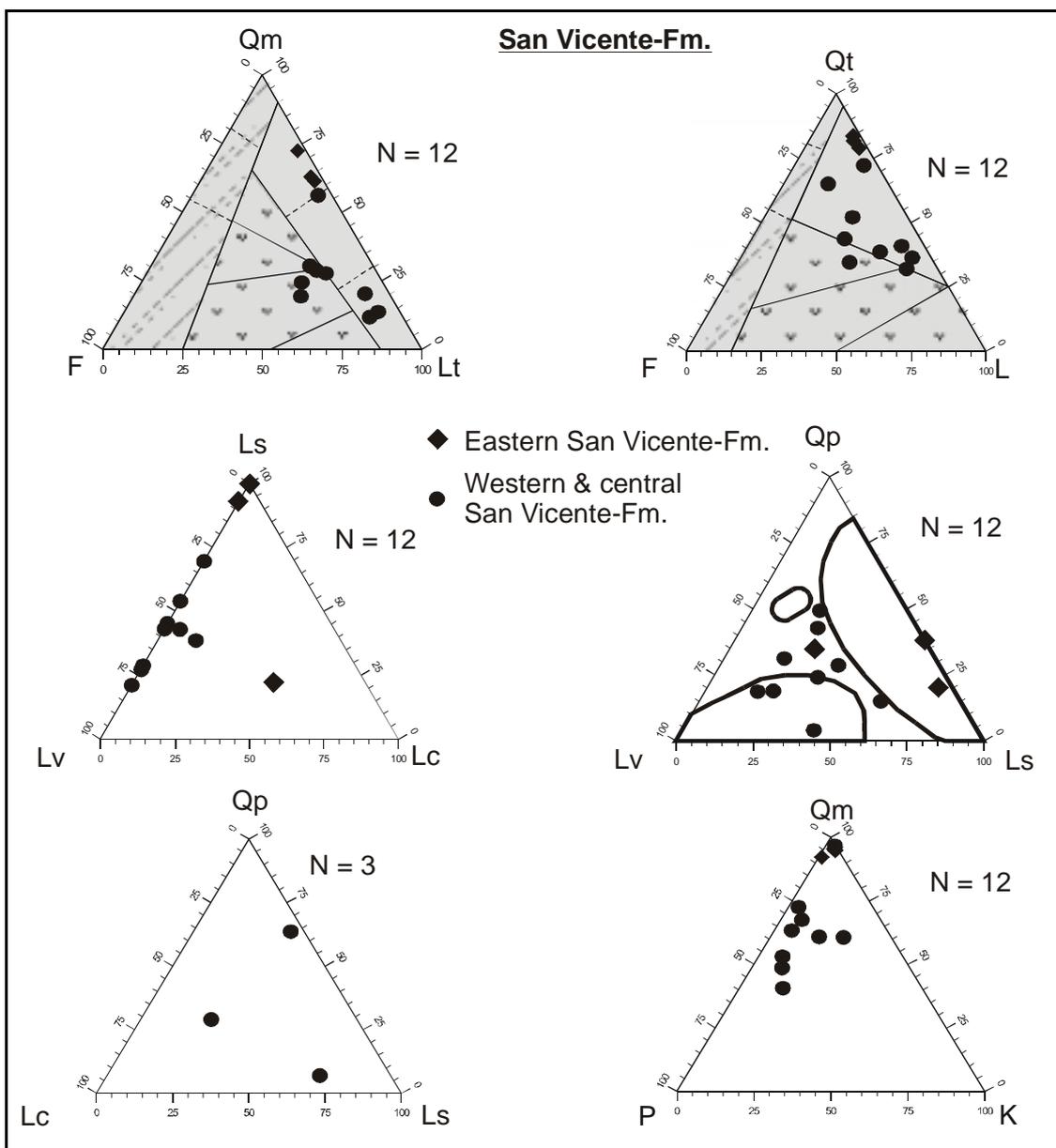


Abb. 5.5 Sandsteine der San Vicente-Fm. geplottet in den ternären Diskriminationsdiagrammen (Legende siehe Abb. 5.2; Tab. 5.1 und 5.2).

Die **Ls-Lv-Lc-, Qp-Lv-Ls-, Qp-Lc-Ls- und Q-P-K-Diagrammen** (Abb. 5.5) geben Hinweise auf die prozentuale Zusammensetzung der Gesteinsfragmente und Feldspäte in der San Vicente-Fm..

Im **Qp-Lv-Ls-Diagramm** liegt die San Vicente-Fm. in den „arc orogen“-, „collision orogen“- und „subduction complex“-Feldern (Abb. 5.5). Das „arc orogen“-Liefergebiet kann durch den Vulkanismus erklärt werden, der ab dem mittleren Oligozän am östlichen Rand und im gesamten Süd-Altiplano-Becken aktiv gewesen ist.

Im **Qm-P-K-Diagramm** liegen die Proben in der Nähe des Qm-Endgliedes (Abb. 5.5). Dieses Diagramm verdeutlicht die Entfernung vom vulkanischen Bogen, denn mit zunehmender Entfernung von Bogen nimmt der Anteil an Feldspäten als instabile Komponenten ab. Dieses Diagramm zeigt somit den Reifegrad von Gesteinen mit einem „continental block“-Liefergebiet (Abb. 5.1; Tab. 5.1 und 5.2)

5.7 Herkunft der tertiären Sedimente im Süd-Altiplano-Becken

Die Liefergebietsanalyse bietet nicht nur die Möglichkeit, die Zusammensetzung der Gesteine eines rezent aufgeschlossenen Liefergebietes zu interpretieren, sondern auch abgetragene oder überdeckte Liefergebiete zu rekonstruieren. Der Provenienz-Pfad der tertiären Sedimente ist kompliziert, da mehrfache Aufarbeitung der Sedimente wahrscheinlich ist. Es lassen sich mindestens 4 Zyklen ableiten (Abb. 5.6).

Da nur die tertiären Formationen im Süd-Altiplano-Becken untersucht wurden, wird für die Zusammensetzung älterer Sedimente auf Literaturangaben zurückgegriffen. Nach Sempere et al. (1997), Marshall et al. (1997) und Fiedler (2002) waren paläozoische Gesteine, rezent in der Ostkordillere weit verbreitet, die Liefergesteine der klastischen, kretazischen bis paläozänen Sedimente der El Molino-Fm..

Nach der hier vorliegenden Untersuchung wurden während der Entstehung der „Proto-Ostkordillere“, die bereits im Paläozän bis Eozän in Teilen der heutigen Ostkordillere stattgefunden hat (Lamb & Hoke 1997; Ege 2004), kretazische bis paläozoische Gesteine erodiert und zumindest in Teilen des östlichen Süd-Altiplano-Beckens in ein Vorlandbecken umgelagert. Von Lamb & Hoke (1997) wurde aufgrund von Untersuchungen an Sedimenten ein paläozänes bis eozänes Hochgebiet in der heutigen westlichen Ostkordillere als „Proto-Ostkordillere“ bezeichnet. Seine Bildung führte im Paläozän bis Eozän zur Zweiteilung des Ablagerungsraumes in das westlich gelegene Altiplano-Becken und das weiter im Osten gelegene Camargo-Becken (Lamb & Hoke 1997; Düll 2000; Fiedler 2002). Apatit-Abkühlungsalter bestätigen diese Angaben (Ege 2004). Beide Becken wurden mit Sedimenten beliefert. So stammen die Sedimente der Cayara- und Potoco-Formationen im Süd-Altiplano-Becken aus dem Osten. Aufgearbeitet wurden so zum einen die Santa Lucía-Fm., zum anderen vermutlich bereits lokal kretazische und paläozoische Sedimentgesteine.

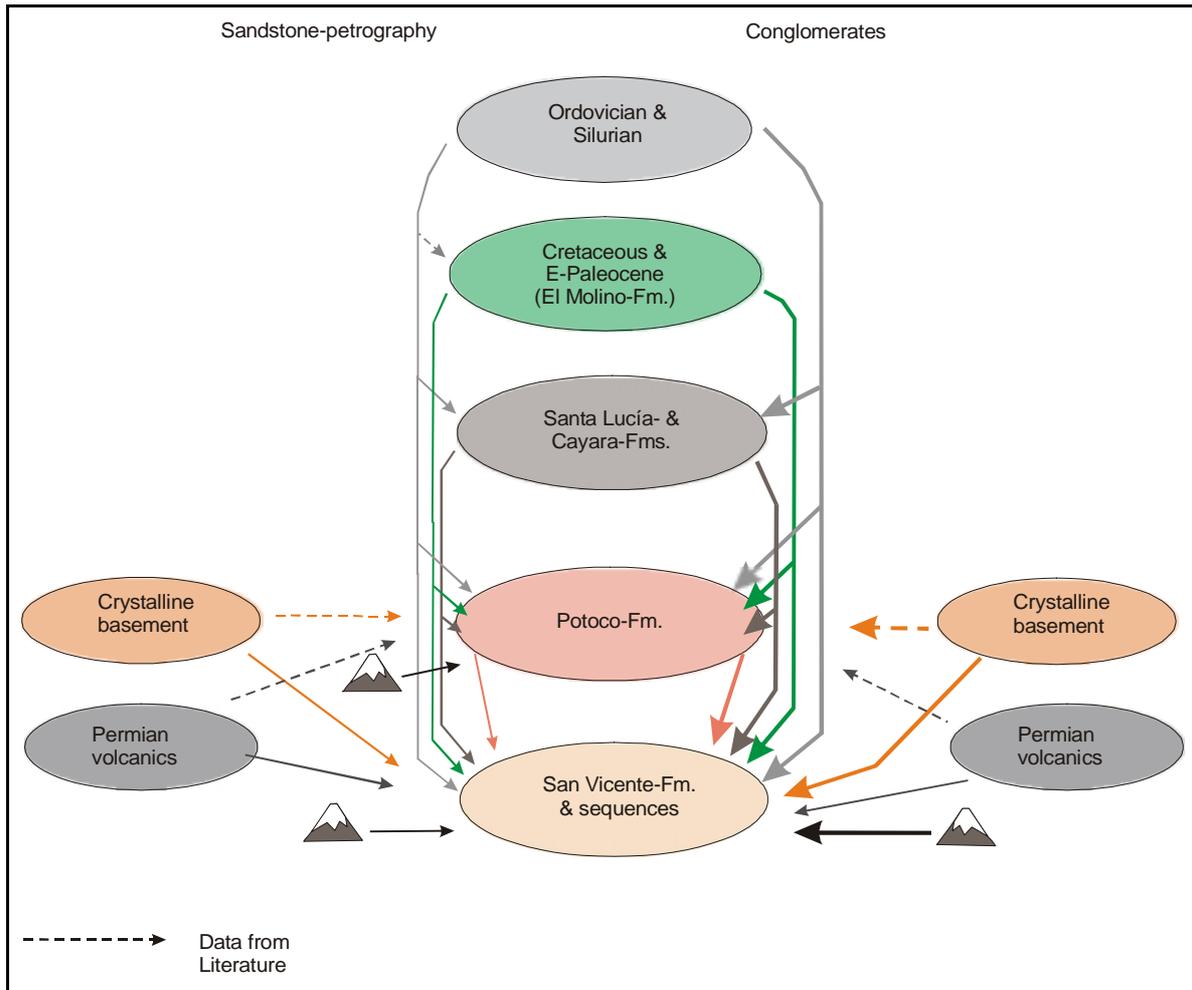


Abb. 5.6 Provenienz-Pfad für die tertiären Sedimente des Süd-Altiplano-Beckens, abgeleitet aus der vorgestellten Analyse. Die vulkanische Aktivität begann im Oligozän, obwohl in der Potoco-Fm. vereinzelt eozäne Tuffe eingeschaltet sind.

Vom Eozän bis in das Unter-Oligozän wurde im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens eine Kornvergrößerungsabfolge innerhalb der Potoco-Fm. abgelagert. Die Herkunft der Bestandteile der Potoco-Fm. stammt aus der „Proto-Ostkordillere“. Bei der Entstehung der „Proto-Ostkordillere“ wurden sequentiell die alttertiären, kretazischen und paläozoischen Sedimente erodiert und im Süd-Altiplano-Becken in einem Vorlandbecken abgelagert.

Cerro Gordo ist eine der wenigen Lokalitäten im Süd-Altiplano-Becken, in der vulkanische Gesteinsfragmente in den Sedimente der Potoco-Fm. mitverarbeitet wurden. Die übrigen Gesteinsfragmente der Potoco-Fm. bei Cerro Gordo bestehen aus sedimentären, klastischen Fragmenten. Diese vulkanischen Gesteinsfragmente stammen aus dem Westen, denn nur dort sind in diesem Zeitraum vulkanische Gesteine aufgeschlossen. Über die Beckenkonfiguration kann wenig ausgesagt werden, wahrscheinlich ist ein sehr distales Becken anzunehmen.

Die Liefergebietsanalyse der östl. San Vicente-Fm. des Süd-Altiplano-Beckens zeigt deutlich eine Herkunft aus der Ostkordillere. Während der anhaltenden Hebung der „Proto-Ostkordillere“ im Oligozän und Miozän wurden die paläozoischen und die kretazischen bis paläozänen Gesteine weiter erodiert und im Süd-Altiplano-Becken in ein Vorlandbecken sedimentiert. Die vulkanische Tätigkeit, die

ab dem Oligozän im Süd-Altiplano-Becken stattfand, brachte zusätzliches Material in das Süd-Altiplano-Becken ein.

Bei Santa Inés, im Westteil des Süd-Altiplano-Beckens, unterscheidet sich die Herkunft der San Vicente-Fm. gänzlich von der im Ostteil. Das Liefergebiet wird von folgenden Gesteinen gebildet: kristallines Basement, permische Vulkanite, alttertiäre Karbonatgesteine und tertiäre Vulkanite. Im Oligozän bestand im Westen des Süd-Altiplano-Beckens ein Hochgebiet. Permische Vulkanite und kristallines Basement wurden erodiert, in das Süd-Altiplano-Becken transportiert und dort abgelagert. Dieses Material wurde nur in der westlichen San Vicente-Fm. verarbeitet. Zusätzlich wurde durch die vulkanische Tätigkeit ab dem Oligozän, wie im Osten und Zentrum des Süd-Altiplano-Beckens, vulkanisches Material herantransportiert.

5.8 Petrofazien der Potoco- und San Vicente-Formationen

Im Süd-Altiplano-Becken konnten aus den untersuchten Sandsteinen mehrere Petrofazien identifiziert werden (siehe Abb. 5.7).

Zusätzlich wurden die Gesteinsfragment (Lf)- und QFL-Petrofazies der Potoco- und San Vicente-Formationen detailliert untersucht, weil deren karbonatische (Lsed(karb)) und vulkanische (L(vulk)) Gesteinsfragmente spezifische Informationen auf die Zusammensetzung, Unterscheidung der Liefergebiete und -gesteine dieser zwei Formationen geben. Obwohl die Sedimentzusammensetzung generell abhängig von Verwitterung und Transport ist, ist eine Provenienz-Information in den Sedimenten selbst enthalten (Dickinson 1988).

Petrofaziesanalysen können eine eindeutige Sedimentherkunft anzeigen, wenn der Transportweg kurz und direkt ist (Dickinson 1988); dagegen ist dieser Zusammenhang zwischen Liefergebiet und Sedimentationsraum nicht eindeutig, wenn die Sedimente mehrfach aufgearbeitet wurden (Mack 1984) und ist nicht möglich, wenn das Transportsystem sehr komplex und weit gefächert ist (Velbel 1985).

Die untersuchten Sedimente der Potoco- und San Vicente-Formationen im Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens haben ein relativ gut definiertes Liefer- und Sedimentationsgebiet, das von der „Proto-Ostkordillere“ als Hochgebiet gebildet wurde (Kap. 5.6.2 und 5.6.3). Der Sedimentationsraum war der eines Vorlandbeckens (siehe Kap. 6). Der Transportweg für die unteren Einheiten der Potoco-Fm. ist wie die Faziesanalyse zeigt (Kap. 2), relativ lang, für die oberen Einheiten der Potoco-Fm. dagegen relativ kurz (Kap. 2 und 3). Die San Vicente-Fm. ist grobkörnig, was für kurze Transportwege spricht (Kap. 2 und 3).

Dagegen haben die Sedimente der Potoco-Fm. im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens kein gut definiertes Liefergebiet. Die Feinkörnigkeit dieser Sedimente spricht möglicherweise für lange Transportwege (Kap. 2 und 3). Die Sedimente der San Vicente-Fm. haben im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens ein relativ gut definiertes Liefergebiet und wie im Osten relativ kurze Transportwege (Kap. 2 und 3). Der Ablagerungsraum dagegen wird im Kapitel 6 besonders untersucht.

Die QFL-Petrofazien der Potoco- und San Vicente-Formationen unterscheiden sich in den drei vollständig aufgeschlossenen Profillokalitäten Chita, Ubina und San Cristóbal in ihrer Zusammensetzung

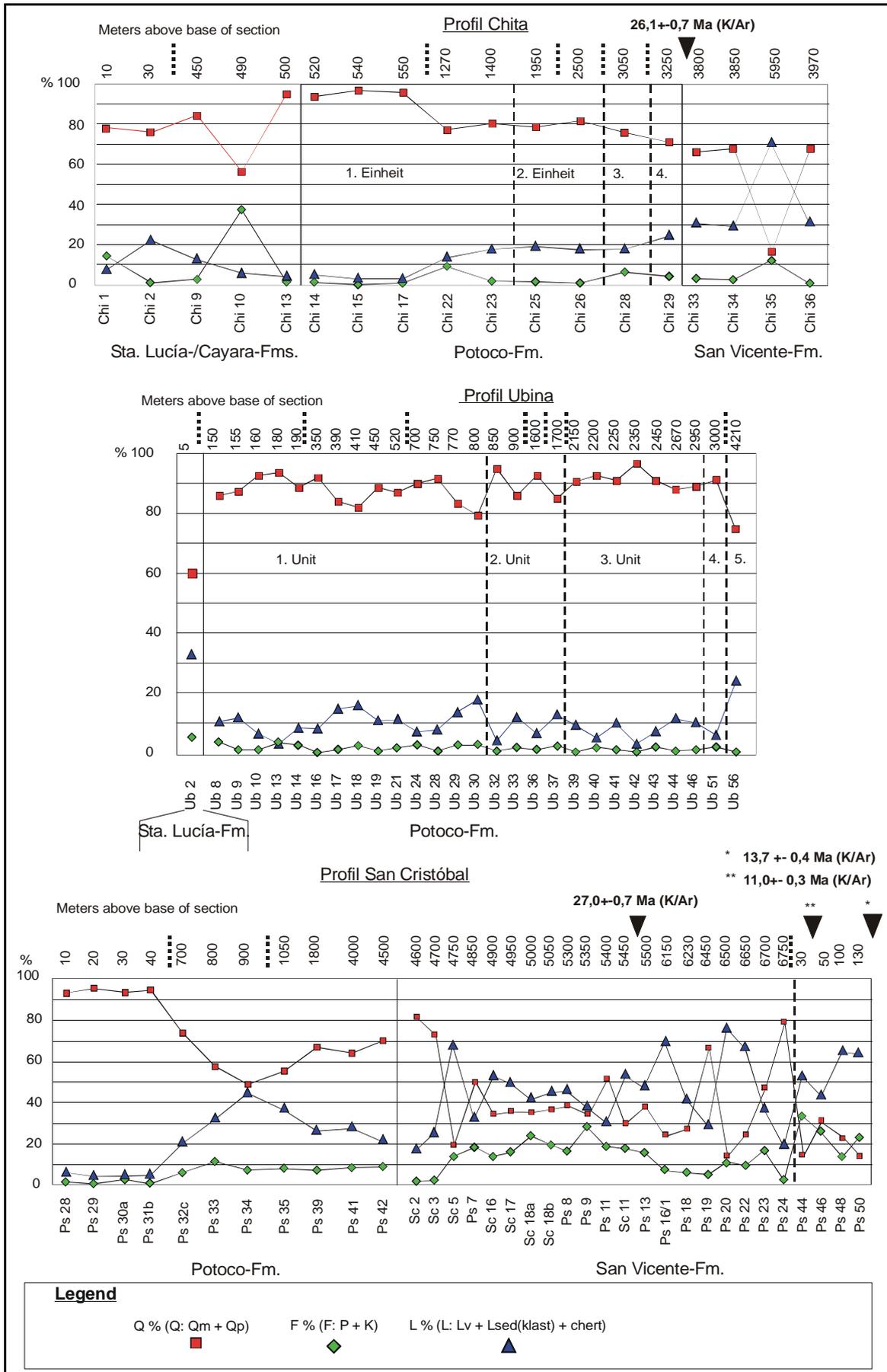
sehr deutlich (Abb. 5.7). Die Potoco-Fm. ist durch eine „quarzitische“-Petrofazies (Dickinson 1988) charakterisiert. Diese ist charakteristisch für Gesteine aus einem Falten- und Überschiebungsgürtel mit einer mehrfachen Aufarbeitung der Sedimente (Dickinson 1988), was für eine Ablagerung in einem Vorlandbecken spricht (Kap. 6).

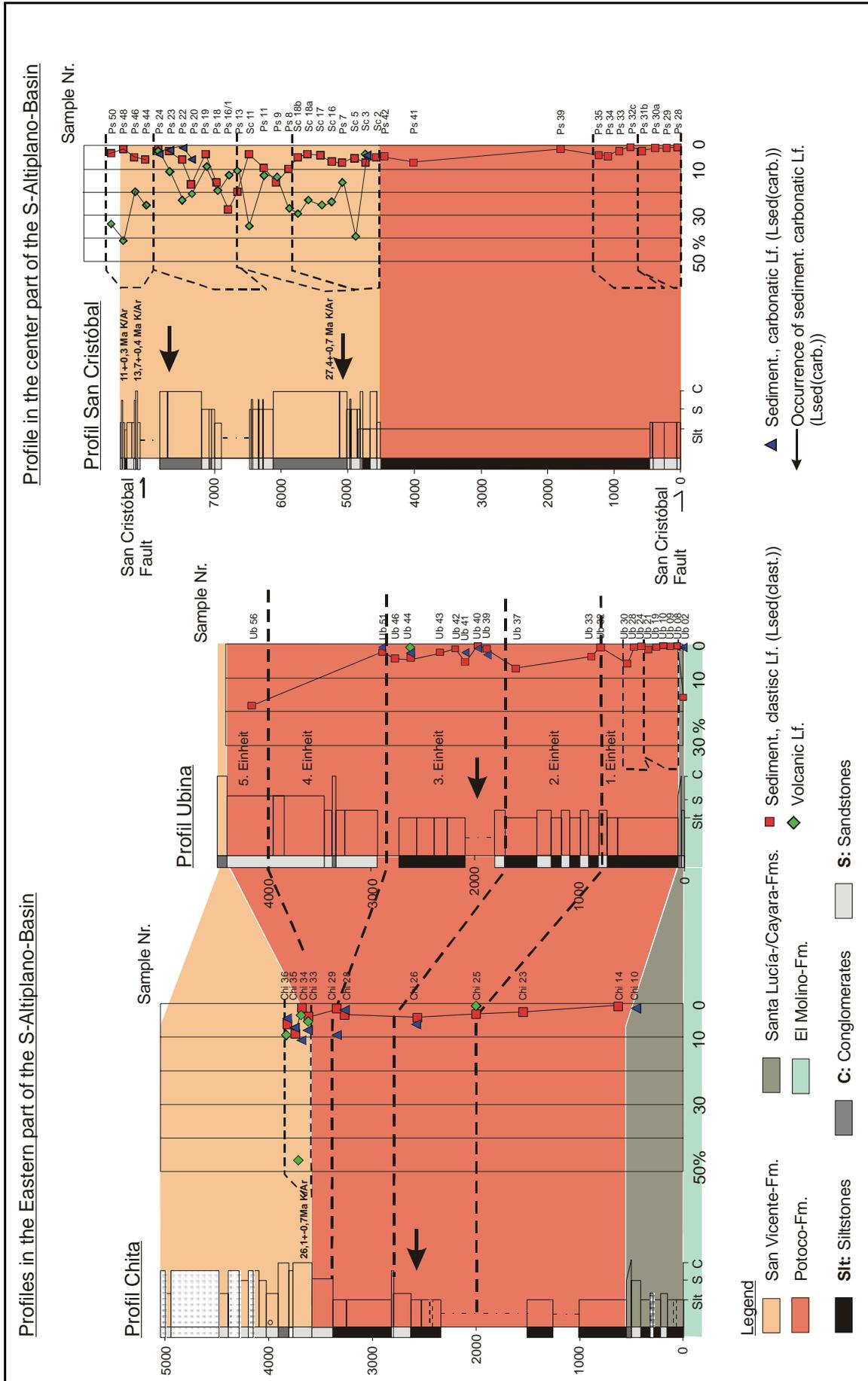
Die QFL-Petrofazies der Potoco-Fm. im zentralen Süd-Altiplano-Becken ist variabler als im Ostteil. Während an der Basis noch keine regionalen Unterschiede bestehen, ändern sich die Anteile der quarzitären Petrofazies zum stratigraphisch höheren hin. Aus der Deformationsgeschichte (siehe Kap. 6.1) ist bekannt, dass während der Ablagerung der oberen Potoco-Fm. Extension im zentralen Süd-Altiplano-Becken stattfand. Möglicherweise wurde von den Grabenschultern die untere Potoco-Fm. erodiert und im neu entstandenen Graben abgelagert (Kap. 6.1).

Dagegen ist die San Vicente-Fm. im gesamten Süd-Altiplano-Becken durch variable Petrofazien charakterisiert, deren Aussage allerdings durch die geringe Probenzahl beschränkt ist. Die San Vicente-Fm. ist sowohl durch eine „quarzitische“- , eine „vulkanoklastische“- und eine „vulkanoplutonische“-Petrofazies charakterisiert, was für unterschiedliche Ursprungsgesteine spricht (Abb. 5.7). Diese Variabilität in der Zusammensetzung der Ursprungsgesteine wird durch unterschiedliche Liefergebiete und den darin aufgeschlossenen Gesteinen erklärt (Kap. 5.6.3). Hinzu kommt, dass die San Vicente-Fm. durch syntektonische Sedimentationsbedingungen charakterisiert ist (Kap. 2 und 6). Ihr Ablagerungsraum ist im Osten der eines Vorlandbeckens, im zentralen Süd-Altiplano-Becken dagegen der eines „intra-arc“-Beckens (siehe Kap. 6).

nächste Seite: **Abb. 5.7** Die Abbildung zeigt die Zusammensetzung der unterschiedlichen Petrofazien der Potoco- und San Vicente-Formationen. Für die Definition der Petrofazien wurde nach Folk (1974) Chert als Gesteinsbruchstück betrachtet. Die „quarzitische“-Petrofazies der Potoco-Fm. entlang der Ubina-, Chita- und San Cristóbal-Profile ist deutlich zu erkennen. Grundlage für die Betrachtung als quarzitive Petrofazies ist die Klassifizierung nach Dickinson (1988), wonach **Qm > Qp und F (K > P)** ist.

Die Zusammensetzung der „quarzitären“- , „vulkanoklastischen“- und „vulkanoplutonischen“-Petrofazien der San Vicente-Fm. sind in den Chita- und San Cristóbal-Profilen zu erkennen. Definiert werden diese nach Dickinson (1988). Ergänzend zur quarzitären Petrofazies ist die „vulkanoklastische“-Petrofazies durch **Lv > F; F (P > K)** mit geringen Qm-Anteile definiert und die „vulkanoplutonische“ durch variable Anteile von **Qt (Qm > Qp) und F (P > K) und L (Lv > Ls)**.





vorherige Seite: **Abb. 5.8** Gesteinsfragment-Petrofazies der Potoco- und San Vicente-Formationen im Ostteil und zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens. Deutlich ist der Unterschied in der Zusammensetzung der Petrofazies in den jeweiligen Formationen zu sehen. Die sedimentäre, klastische-Petrofazies der Potoco-Fm. (**Lsed(klast.) > Lvulk und Lsed(karb.)**) ist in der gesamten Potoco-Fm. deutlich zu erkennen.

Die charakteristische Gesteinsfragment-Petrofazies der San Vicente-Fm. (**Lv \geq Lsed(klast.)**); mit geringen Anteilen von Lsed(karb.)) besteht aus vulkanischen, sedimentär-karbonatischen und sedimentär-klastischen Fragmenten.

Durch die unterschiedlichen Ursprungsgesteine kann sich die Zusammensetzung der „quarzitischen“-Petrofazies so geändert haben, dass der Gesteinsfragmentanteil gestiegen und der Quarzanteil gefallen ist.

Die Gesteinsfragment-Petrofazies der Potoco- und San Vicente-Formationen sind in Abb. 5.8 dargestellt. Deutlich können diese zwei Formationen aufgrund der Zusammensetzung der Gesteinsfragmente unterschieden werden. Die Gesteinsfragmente der Potoco-Fm. werden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, durchgehend von sedimentär, klastischen Gesteinsfragmenten (Lsed(klast.)) gebildet (Abb. 5.8), welche auch die Petrofazies charakterisieren: (**Lsed(klast.) \gg Lvulk und Lsed(karb.)**). Nur in den oberen Einheiten kommen vereinzelt sedimentär, karbonatische (**Lsed(karb.)**) Gesteinsfragmente vor, die aus Oolithbruchstücke bestehen und damit einen Hinweis auf den relativen Beginn der Erosion der El Molino-Fm. in den umliegenden Hochgebieten geben. Diese Gesteinsfragmente Lsed(karb) tauchen nur in den oberen Einheiten der Potoco-Fm. und in der San Vicente-Fm. auf.

Die Gesteinsfragment-Petrofazies der San Vicente-Fm. wird von Lsed(klast.), Lvulk und Lsed(karb) gebildet und kann somit als „vulkanoklastisch“ und „vulkanoplutonisch“ (Dickinson 1988) mit Anteilen von Karbonat-Fragmenten bezeichnet werden. Definiert wird diese Petrofazies durch ihren hohen Anteil an vulkanischen Gesteinsfragmenten: **Lv \geq Lsed(klast.)**, mit geringen Anteilen von Lsed(karb.). Im zentralen Teil des Süd-Altiplano-Beckens ist der vulkanische Gesteinsfragmentanteil Lv in der gesamten San Vicente-Fm. höher als der Anteil der anderen Gesteinsfragmente. Karbonatische Gesteinsfragmente kommen sowohl in der basalen der San Vicente-Fm. vor, wie auch im oberen Teil. Damit kann die San Vicente-Fm. im gesamten Süd-Altiplano-Becken von älteren Sedimenten unterschieden und als eine vulkanoklastische Ablagerung identifiziert werden. Dagegen wird die Potoco-Fm. als eine rein sedimentär-klastische Ablagerung identifiziert.

5.9 Zusammenfassung zur Liefergebietsanalyse

Aufgrund der vorliegenden Untersuchung kann ein „östliches und zentrales Liefergebiet“ sowie ein „westliches Liefergebiet“ definiert werden. Das erstere wird aus ordovizischen und silurischen, kretazischen bis paläozänen und weiteren alttertiären Sedimenten sowie vulkanischem Gesteinsmaterial aufgebaut. Solches ist rezent in der Ostkordillere und in einigen isolierten Aufschlüssen im zentralen Süd-Altiplano-Becken entlang der UKFZ aufgeschlossen.

Das Herkunftsgebiet der Santa Lucía-, der Cayara- und Potoco-Formationen lag im Osten und wurde von der Proto-Ostkordillere gebildet, ihr Ablagerungsraum war ein Vorlandbecken. Eine Ausnahme

bildet die bei Cerro Gordo aufgeschlossene Potoco-Fm.. Diese Formation wurde zum Teil aus Westen beliefert, wie die vulkanischen Gesteinsfragmente zeigen.

Die Herkunftsgebiete und Ostteil des Süd-Altiplano-Beckens aufgeschlossenen San Vicente-Fm. lagen in der Ostkordillere und entlang einzelner Hochgebiete an der UKFZ. Im Osten bildete die „Proto-Ostkordillere“ das Hochgebiet, der Ablagerungsraum war ein Vorlandbecken.

Das „westliche und zentrale Herkunftsgebiet“ wird zusammengesetzt aus kristallinem Basement, permischen Vulkaniten, ordovizischen/silurischen, kretazischen bis paläozänen und weiteren tertiären Sedimenten und Vulkaniten. Das kristalline Basement und die permischen Vulkanite sind im Süd-Altiplano-Becken rezent nicht aufgeschlossen. Auf ihre Anwesenheit an der Oberfläche während des Oligozäns bis Miozäns kann aufgrund des aufgearbeiteten Materials in den Sandsteinen und Konglomeraten der San Vicente-Fm. bei Santa Inés geschlossen werden. Diese Anteile stammen aus Westen, während die ordovizischen und silurischen Anteile aus Hochgebieten entlang der UKFZ stammen. Die tertiären Sedimente in der San Vicente-Fm. wurden durch mehrfaches Aufarbeiten alttertiärer Sedimente miteingebracht. Im gesamten Süd-Altiplano-Becken lieferte ab dem Oligozän der Vulkanismus einen deutlichen Beitrag. Der Ablagerungsraum der westlichen und zentralen San Vicente-Fm. war vulkanisch beeinflusst, ein „intra-arc“-Becken (siehe Kap. 6).