

7 Resultate und Diskussion

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Methode erarbeitet, nach der von der Region San Cristóbal ein 3D-Modell des oberflächennahen Untergrundes erstellt wurde. Dabei kamen mit Fernerkundungs- und GIS-Methoden bearbeitete Fernerkundungsdaten, ein Geländemodell und Geländedaten (*ground truth*) zum Einsatz. Aus diesen Daten wurde ein digitales geologisches Modell in der Größe von mehreren tausend km² erzeugt. Nachgebildet sind in diesem Modell Schicht- und Störungsflächen. In diesem Kapitel soll zunächst die Geometrie des erstellten geologischen Flächenmodells bewertet und mit den verfügbaren geologischen Daten verglichen werden, um anschließend die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik sowie ihre spezifischen Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen Methoden darzulegen.

Dabei konnte festgestellt werden, daß:

- das Modell qualitativ als auch quantitativ mit Gelände- und Literaturbefunden vereinbar ist, somit
- durch das Modell Aussagen zur Geometrie des oberflächennahen Untergrundes gemacht werden können
- das Modell ein wertvolles Hilfsmittel bei der Visualisierung komplexer geologischer Flächen und Strukturen am Rechner ist
- das Modell dabei hilft, das dreidimensionale Potential von Fernerkundungsdaten zu verdeutlichen und zu nutzen
- das Modell mit Hilfe von GIS-Funktionen Informationen integrieren und daraus Randbedingungen für andere Methoden der geometrischen Modellierung liefern kann.

7.1 Geologische Aussage des Modells

Das geologische Flächenmodell zeigt einzelne Großstrukturen der Uyuni-Kehnayani-Störungszone (UKSZ). Dabei sind die Uyuni-Kehnayani-Störung selbst als auch die benachbarten Corregidores- und San Cristóbal-Störung erkennbar. Die Störungszone zeigt sich als NNE-SSW streichender Falten- und Überschiebungsgürtel mit hauptsächlich ostvergente Aufschiebungen. Die verschiedenen Störungen konvergieren nach Süden hin, die Faltenstrukturen werden dementsprechend nach Norden hin weitspänniger. Von Ost nach West werden die Aufschiebungsbahnen von saiger stehend bis etwa 75° nach Westen einfallend zunehmend flacher. Aus Datierungen der Arbeitsgruppe Scheuber (Teilprojekt C1A des SFB 267) ist bekannt, daß die Deformation zunächst die westlichen Bereiche erfaßt hat und sich dann nach Osten verlagerte. Die Deformationsintensität nimmt nach Westen und Osten hin ab. Das Modell bildet zwei neogene Formationsgrenzen westlich der San-Cristóbal-Störung ab sowie paläozoische Formationsgrenzen an der UKS im engeren Sinne. Im Höhenzug Corregidores werden kretazisch-paläozäne bis miozäne Formationsgrenzen zu beiden Seiten der Corregidores-Störung dargestellt.

Das geologische Modell erlaubt nur die Ermittlung von Verkürzungsbeträgen aufgrund von Makrostrukturen. Die Einbeziehung von Detailstrukturen ist prinzipiell natürlich möglich, würde jedoch mit Hinblick auf die Anschaulichkeit an der Zielsetzung eines regionalen Modells vorbeigehen. Strukturen im Aufschlußmaßstab wurden deshalb nicht dargestellt, sie sind aus Gründen der Anschaulichkeit und durch die Aufnahmedichte der Geländearbeit nicht zu modellieren. Deshalb fehlen im Modell die kleinen kinematischen Indikatoren, die im Gelände beobachtet werden konnten, zum Beispiel für dextrale Seitenverschiebungskomponenten parallel zur UKSZ. Diese Kleinstrukturen haben sicherlich ebenfalls finite Einengung aufgenommen, ihr Anteil ist jedoch nur schwer zu quantifizieren. Ebenso schwer ist es, die Rolle des *strains*

abzuschätzen, hier kann jedoch mit den Resultaten von ELGER (in prep.) gearbeitet werden. Aus der Literatur (BABY *et al.*, 1997, ELGER *et al.*, 2001) können jedoch Werte für die finite Einengung entnommen werden, die eine Gesamtverkürzung von etwa 20 km für die gesamte Breite des Altiplanos bei 21° S angeben. Bei einer Profillänge von etwa 150 km zwischen dem Westrand des Altiplano am Fuß der Westkordillere und der San-Vicente-Störung ergibt sich daraus eine prozentuale Verkürzung von etwa 13%.

Die GIS-Funktionen des erstellten Modells nutzend, wurden numerische Abfragen nach geologischen Gesichtspunkten entwickelt. Dabei kamen globale und lokale Abfragen zum Einsatz. Aus globalen Flächenvergleichen ergab sich eine finite Einengung von etwa 3,7 km im westlichen Bereich des Arbeitsgebietes. Die Richtung dieser Einengung wurde übereinstimmend aus Felddaten und Lineamentinterpretationen mit WNW-ESE ermittelt. Die über eine großflächige Struktur (die San-Vicente-Basisfläche) im Modell ermittelte prozentuale Verkürzung liegt mit etwa 12,2% (Tab. 6-1) sehr nahe an den Literaturwerten. Die ermittelte finite Einengung und deren Richtung in diesem Teilbereich des Altiplano ist also mit den von BABY *et al.* (1990, 1997) ermittelten Werten für den gesamten Altiplano von 20 km in derselben Richtung in der Größenordnung kompatibel, wie für die absoluten Beträge im folgenden Absatz noch erläutert ist.

Im südlichen Altiplano wurden in der Umgebung und im Untersuchungsgebiet selbst eine Reihe von Strukturen beobachtet, die Verkürzungen der Oberkruste aufnehmen können. Diese Strukturen sind von West nach Ost hauptsächlich die Überschiebung im inselartigen Höhenzug nordwestlich von Rio Grande, die Überschiebung an der Ines-Antiklinale, der weitspannige Faltenzug von der Ines-Antiklinale zur San-Cristóbal-Störung, die Corregidores-Störung und die Uyuni-Kehnayani-Störung i.e.S. Unklar bleibt, wie sich die San-Cristóbal-Störung nach Norden hin, unter der Bedeckung durch den Salar de Uyuni, fortsetzt. Aufschluß darüber können die Seismikdaten der YPFB geben, die jedoch nur in unmittelbarer Nähe des Cerro San Cristóbal, nicht jedoch im Gebiet des Salar selbst zur Verfügung stehen. Unklar bleibt deshalb auch, ob die Corregidores-Störung im Norden beim Höhenzug Corregidores und nördlich davon zusätzlich die finite Einengung aufnimmt, die im Süden von der San-Cristóbal-Störung aufgenommen wird. Auf der Höhe direkt nördlich des Cerro San Cristóbal sind jedoch beide Störungen vertreten. Aufgrund der spärlichen Geländedaten und fehlender Leithorizonte konnte im Modell für den dortigen Bereich keine adäquate Fläche eingefügt werden. Darüber hinaus sind in diesem Gebiet nur die oberen Teile der San-Vicente-Formation aufgeschlossen, so dass ein direkter Vergleich der finiten Einengung nicht möglich wäre. So kann die globale finite Einengung zwischen San-Cristóbal-Störung und Corregidores-Störung seit Beginn der Ablagerung der San-Vicente-Formation in der Nähe des San-Cristóbal Vulkankomplexes nicht ermittelt werden.

Wenn man nun, trotz der unterschiedlichen geologischen Verhältnisse, die ermittelte finite Einengung am Westhang von Corregidores auf dieses Gebiet überträgt, dann ergibt sich aus Tabelle 6-1 eine summierte finite Einengung von etwa 7,9 km, bestehend aus der ermittelten finiten Einengung westlich der SCS und aus der ermittelten finiten Einengung zwischen SCS und CS an einem Horizont in kretazisch/paläozänen Schichten. Dies entspricht einem guten Drittel der von BABY *et al.* (1990, 1997) postulierten finiten Gesamteinengung für den südlichen Altiplano.

Zur Erklärung der restlichen finiten Einengung stehen nun noch die verschiedenen ostwärts gerichteten Überschiebungen westlich des Untersuchungsgebietes (siehe Kapitel 4.2.5) sowie natürlich die Uyuni-Kehnayani-Störung selbst zur Verfügung. Darüber hinaus können kleinere, nicht aus Fernerkundungsdaten und Geländebegehungen erkennbare, Einengungsstrukturen im Untergrund sowie der *strain* weitere Deformation aufgenommen haben. Wird die restliche von BABY *et al.* (1990, 1997) postulierte finite Gesamteinengung von diesen Strukturen tatsächlich in etwa gleichmäßig aufgenommen, so ist die finite Einengung an jeder dieser Strukturen in der gleichen Größenordnung wie die im Modell ermittelte zwischen Ines-Antiklinale und San-Cristóbal-Störung. Das heißt, daß auf die UKS i.e.S. etwa 4 km finite Einengung entfallen

würden, die nicht modellierten Störungen im Westen des Arbeitsgebietes ebenfalls etwa 4 km, und schließlich die nicht modellierten Kleinstrukturen und mit Sediment bedeckten Strukturen sowie der Anteil der Transpression an der finiten Einengung zusammengenommen ebenfalls in etwa 4 km. Summiert man all diese Beträge ergibt sich in der Tat eine finite Gesamteinengung, die mit der von BABY *et al.* (1990, 1997) kompatibel ist. Zur sicheren Klärung dieser Frage sind jedoch sicherlich noch weitere Untersuchungen an diesen Strukturen nötig.

Zur Verdeutlichung dieser Resultate wurde ein Profilschnitt in WNW-ESE Richtung südlich des Cerro San Cristóbal aus dem Flächenmodell erstellt, das die im Modell abgebildeten Strukturen plausibel wiedergibt. Das Profil zeigt die Basisflächen der San-Vicente- und Potoco-Formationen, die San-Cristóbal- und Uyuni-Kehnayani-Störungen sowie eine Rücküberschiebung (Abb. 7-1, gelb). Aus der Geometrie dieser Flächen ergibt sich zum einen, daß entgegen den Erwartungen und auch Modelleingabewerten zwischen den Formationsgrenzen keine durchgängig konstante Mächtigkeit der Potoco-Formation zu beobachten ist. Dies kann auf einfache Weise dadurch erklärt werden, daß die Mächtigkeit der Potoco-Formation wahrscheinlich nicht überall gleich ist und Schwankungen unterliegt. Eine andere Interpretation kann davon ausgehen, daß im Zentrum der Synklinale westlich des San-Cristóbal Vulkankomplexes Einengungsstrukturen im Untergrund entstanden sind, die jedoch durch jüngere Sedimente komplett bedeckt und somit an der Oberfläche für Interpretation unsichtbar und für Messungen unzugänglich sind. Die alternative konzeptionelle Umsetzung wird im Profil durch zwei Aufschiebungen umgesetzt, von denen eine nach Westen und eine nach Osten orientiert ist (Abb. 7-1, im Profil schwarz). Interessanterweise ist genau an dieser Position eine der hypothetischen Störungen aus der Kurvatoreninterpretation (Kapitel 6.2.2 Abb. 6-8) gelegen (Abb. 7-1, im Profil blau über schwarz).

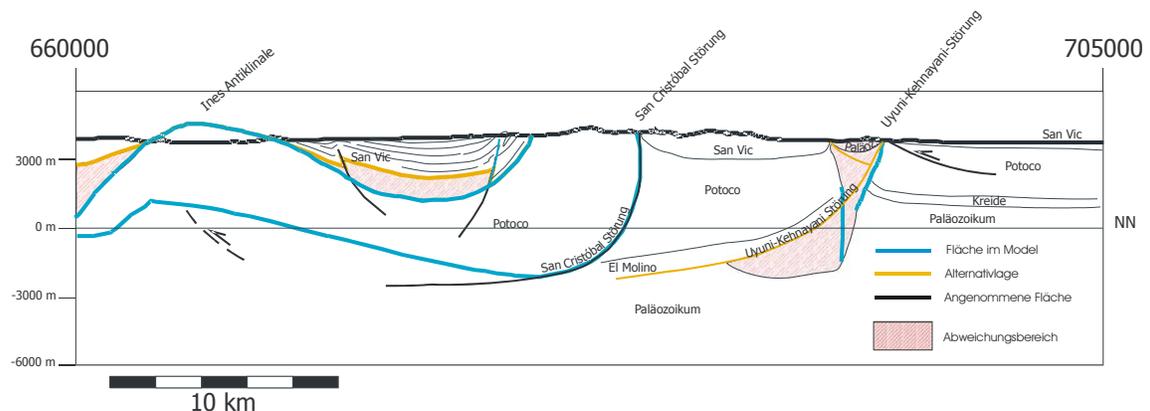


Abb. 7-1: Profilschnitt durch das Flächenmodell mit modellierten Flächen (Blau) und daraus interpretiertem Verlauf (Gelb). Dazu schematische Interpretation des Untergrundes in schwarz und schraffiert der Inkonsistenzbereich. Man beachte, daß dieser mit der Tiefe zunimmt, sowie das Fehlen der Corregidores-Störung, die in der Profilebene nicht mehr ausgebildet ist.

Einige geometrische Probleme tauchen im Westen im Randbereich des Modells auf, hier als steiles Einfallen der Westflanke der Ines-Antiklinale durch Extrapolationseffekte, sowie im Einfallen der Uyuni-Kehnayani-Störung (UKS) im Osten. Hier scheint die Geometrie des Modells hauptsächlich durch den Algorithmus gesteuert zu sein. In diesen Gebieten ist es möglich und erforderlich, geologisches a priori-Wissen als plausible Randbedingung sukzessive in das Modell einzubauen. Im Modell wird sowohl an der UKS als auch an der assoziierten Rücküberschiebung der an der Oberfläche eingemessene steile Einfallswinkel durch den DSI-Algorithmus in die Tiefe beibehalten. Hier ist jedoch eher eine Verflachung bis zum Abscherhorizont anzunehmen. Die Tiefe dieses Abscherhorizonts ergibt sich in der Interpretation aus der Tangentialebene des untersten Punktes der untersten deformierten Formationsgrenze im Modell (Potoco-Basisfläche) und wird in etwa 6 km unter

Geländeoberkante und somit gut 2 km unter NN angenommen. Da die die Potoco-Formation unterlagernden kretazisch/paläozänen Sedimente aus einem Ablagerungsmilieu in Meereshöhe stammen, muß hier dem Modell nach eine Absenkung stattgefunden haben. Die Ines-Antiklinale wird in diesem konzeptionellen Profil als Produkt einer westvergente Aufschiebung aus diesem basalen Abscherhorizont heraus gedeutet, was jedoch nur als Vermutung so bestehen kann.

Wenn dieses konzeptionelle Profil nun mit einem benachbarten, etwa 25 km nördlich gelegenen, aus Seismikdaten interpretierten Profil verglichen wird (Abb. 7-2, ELGER, ONCKEN & KUKOWSKI, 2001), so stellt man fest, daß es sowohl qualitative Gemeinsamkeiten als auch Differenzen gibt. Das Profil durch das erstellte geologische Modell konnte nicht bei denselben Koordinaten erzeugt werden, da die Lage des Seismikprofils außerhalb des Gültigkeitsbereiches des Modells lag. Speziell Extrapolationseffekte verfälschen dort die Geometrie. Daher ist der geologische Bau in den von den beiden Profilen dargestellten Regionen unterschiedlich. Zu beobachten ist, daß im Seismikprofil die Paläozoikumsaufbrüche an der Oberfläche einen bedeutend längeren Weg auf der Überschiebungsbahn der UKS zurückzulegen hatten als im erstellten Modell. Dies hat zur Konsequenz, daß aus dem in dieser Arbeit erstellten Profil eine wesentlich geringere Verkürzung durch Auf-/Überschiebung an der UKS ableitbar ist als im Seismikprofil. Zum anderen gibt es Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Profilen, was die Umsetzung der Verkürzung unter Annahme konstanter Formationsmächtigkeiten im Gebiet der Synform westlich des Cerro San Cristóbal angeht. Beide Profile nutzen ost-west-gerichtete Auf- und Überschiebungssysteme, die durch Sedimente vollkommen bedeckt sind.

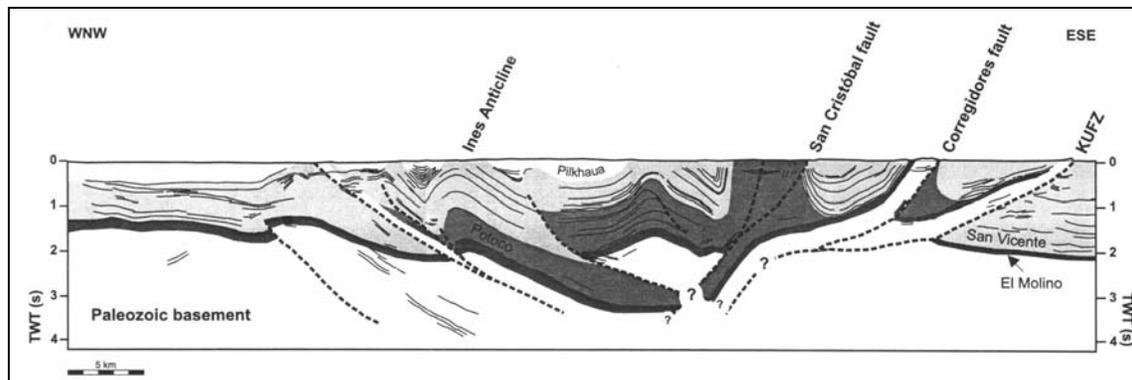


Abb. 7-2: Aus Seismik interpretiertes Profil aus ELGER, ONCKEN & KUKOWSKI (2001).

Ganz allgemein kann vom in dieser Arbeit erstellten Profil gesagt werden, daß die Interpretation der Strukturen im Untergrund mit einem geringeren Grad an Komplexität auskommt. Unterschiede im geologischen Bau werden besonders deutlich durch das Fehlen der Corregidores-Störung im südlichen Profil, sowie dem geringeren Abstand zwischen San-Cristóbal-Störung und UKS. So ist die UKS im vorliegenden Profilschnitt steiler als im Seismikprofil. Dies mag daher kommen, daß Seismik im Gegensatz zu Fernerkundungsdaten nicht in der Lage ist, sehr steil einfallende Strukturen abzubilden.

Abbildung 7-3 zeigt ein Blockbild mit mehreren, direkt aus dem geometrischen Modell extrahierten Profilen. Die dort dargestellte Geometrie ist also kein schon bearbeitetes Interpretationsprodukt aus dem geologischen Modell. In dieser Abbildung wird deutlich, wie sich die Basisfläche der San-Vicente-Formation nach Norden und Süden hin zum Modellrand immer weiter der Potoco-Basisfläche nähert. Dies kann an Randeffekten der Modellierung liegen. Jedoch ist diese Beobachtung auch durch das Fehlen weiterer kontraktionaler Strukturen, wie im Absatz weiter oben erwähnt für das Profil in Abbildung 7-1, zu verstehen. Schließlich wäre es auch denkbar, daß die Mächtigkeit der Potoco-Formation nach Norden hin stark abnimmt. Gegen

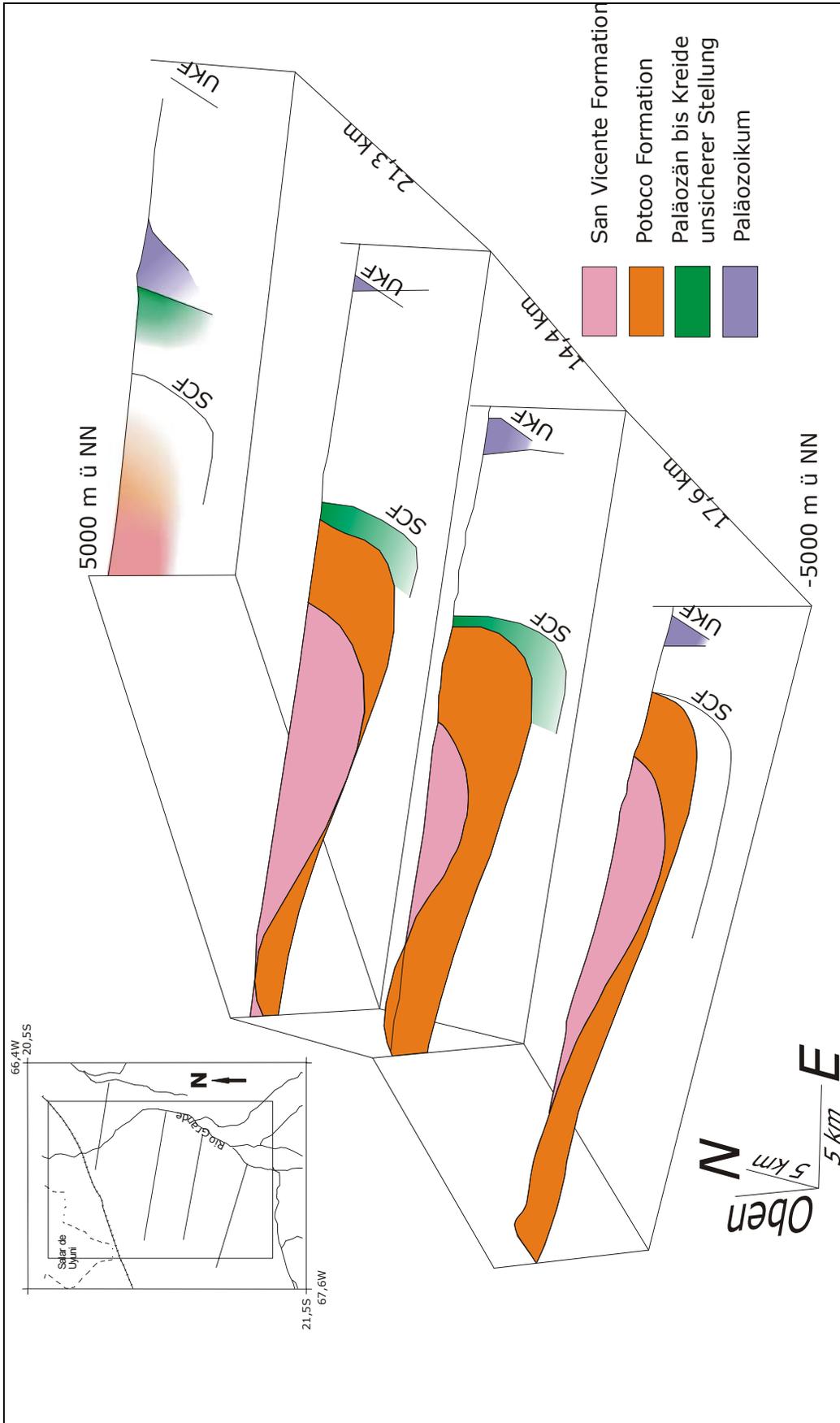


Abb. 7-2: Blockdiagramm von vier verschiedenen, direkt aus dem am Rechner erstellten geologischen Flächenmodell entnommenen Profilen im Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind zwei geologische Grenzflächen und Störungen: Die Uyuni-Kennayani Fault (UKF) und die San Cristóbal Fault (SCF). Das Seismikprofil aus Abb. 7-1 verläuft in etwa zwischen den beiden nördlichen Profilschnitten.

diese Hypothese sprechen jedoch die stratigraphischen Erkenntnisse, die eine Erhöhung der Mächtigkeit der Potoco-Formation auf etwa 6000 m anzeigen (z.B. SILVA, in prep.). An der Basis der Potoco-Formation ist außerdem eine geringere Krümmung als an der Basis der San-Vicente-Formation festzustellen. Dies liegt daran, das der DSI-Algorithmus bestrebt ist, die Krümmung einer Fläche zu minimieren, selbst wenn als weitere Randbedingung der Modellierung eine konstante Mächtigkeit zwischen den Formationsgrenzen angegeben wurde. Bemerkenswert beim Vergleich dieser beiden Flächen ist auch, daß die finite prozentuale Einengung bei beiden Flächen nahezu identisch ist (siehe Tab. 6-1). Dies ist ein Hinweis darauf, daß die verwendete Modellierungsmethode denjenigen Randbedingungen Priorität einräumt, die für eine korrekte Ermittlung der finiten Einengung verantwortlich sind. Ein analoger Effekt ist vermutlich für die im Modell zu beobachtende Verdickung der paläozän/kretazischen Sedimente zwischen Potoco-Basisfläche und San-Cristóbal-Störungsfläche verantwortlich. Das nördlichste Profil zeigt statt durch das Modell definierten Bereichen nur Zonen, in denen die Präsenz einer bestimmten Formation vermutet werden kann. In diesem Bereich ist die stratigraphische Abfolge im Gelände durch quartäre Sedimente überdeckt.

Die Uyuni-Kehnayani-Störung zieht sich durch alle vier Profile in Abb. 7-3. Sie fällt durchweg steil nach WNW ein. Eine direkt westlich der Paläozoikumsaufbrüche entlang der Uyuni-Kehnayani-Störung verlaufende Störung ist ebenfalls modelliert und als steil nach E bis senkrecht einfallende Störung dargestellt. Diese Störung wurde im Gelände an einigen Lokalitäten als Rücküberschiebung der UKS angesprochen. Daß beide Störungen offensichtlich zu steil einfallend modelliert sind mag daran liegen, daß an diesen Störungen in stark zerscherten Zonen im Gelände nicht genügend Orientierungsmessungen angelegt werden konnten. Somit hat die Reduzierung der Krümmung im DSI-Algorithmus für diese Flächen ein Übergewicht bekommen, das für die Steilstellung der Flächen verantwortlich sein kann. Im nördlichsten Profil ist zwischen der UKS und der SCS eine mit etwa 60° nach WNW einfallende Störung zu erkennen. Dabei handelt es sich um die Corregidores-Störung, an der ausreichend Messungen durchgeführt werden konnten. Obwohl nicht im Modell existent, kann man sich in diesem Profil eine Verlängerung nach W der listrischen Störungsfläche der CS vorstellen, die sich mit der SCS zwanglos vereinigt. An der UKS ist dies nicht in diesem Maße gegeben.

Dieses Blockmodell bietet dem bearbeitenden Geologen Hinweise für eine ergänzende geometrische Konstruktion von Flächen. So ist es denkbar, die Corregidores-Störungsfläche bis zur Fläche der SCS zu erweitern. Für die UKS könnte dies ebenfalls durchgeführt werden. Wenn dabei die Störungsflächen einen gemeinsamen Abscherhorizont als Randbedingung nutzen, so wird dies wahrscheinlich dazu führen, daß die UKS im Oberflächenbereich ein geringeres Einfallen zeigen wird. Zur realistischeren Modellierung der Rücküberschiebungsfläche an der UKS ist es denkbar, ein flacheres Einfallen der Rücküberschiebung als Randbedingung zu geben, oder aber den Ort vorzugeben, an dem diese Rücküberschiebung auf die Fläche der UKS trifft. Ein solcher Punkt ist im vorliegenden Blockbild für das erstellte Modell im zweitnördlichsten Profil an der Intersektion der beiden Linien zu sehen.

Schließlich verdeutlicht das Blockdiagramm einen wichtigen Vorteil eines kontinuierlichen 3D-Flächenmodells gegenüber einem Profilmmodell. Zu beobachten ist zwischen dem nördlichsten Profil und dem südlich anschließenden eine Veränderung im geologischen Bau. Das nördliche Profil zeigt eine Aufschiebung mehr (die Corregidores-Störung), als das südliche. Der Übergang zwischen diesen beiden geologischen Profilen ist mittels der Profilmethode faktisch nur mit einer sehr großen Anzahl von Detailprofilen darstellbar. Ein 3D-Flächenmodell, wenn es denn in diesem Bereich definiert ist, bietet hier einen kontinuierlichen Übergang, der relevante Strukturen nicht aussparen kann.

7.2 Möglichkeiten und spezifische Vor- und Nachteile der Methode

Die dargestellte Methode eines mit GIS-Methoden erstellten geologischen Flächenmodells aus Oberflächendaten ermöglicht eine interaktive, flexible Visualisierung von Geokörpern in

dreidimensionaler Darstellung (Tafel IX). Das Modell ermöglicht die einfache Erstellung abgeleiteter Visualisierungsprodukte wie Profilschnitte (Abb. 7-1 und 7-3) und Mächtigkeitskarten. Die Betrachtung und Auswertung der dreidimensionalen Visualisierungen ermöglicht dem Geologen die Prüfung geologischer Hypothesen im Raum und die Erkennung von Inkonsistenzen im Modell. Grundsätzlich ist dies auch mit analogen Methoden erreichbar, wie etwa dreidimensionalen Kunststoffmodellen, nicht jedoch mit der Interpretation von Profilen oder Karten. Die dargestellte Methode bietet demgegenüber mehrere spezifische Vorteile. So hat sie gegenüber der Profilmethode den Vorteil, daß sie ein kontinuierliches Modell im Raum aufbaut. Demgegenüber kann die Profilmethode immer nur diskrete Schnitte in Form von Ebenen oder gekrümmten Ebenen durch einen geologischen Körper legen, während die Bereiche zwischen diesen Ebenen leer bleiben und sich nur durch Interpolation dem Betrachter zu erschließen vermögen. So können relevante Strukturen in den Löchern zwischen den Profilebenen verschwinden.

Die Besonderheit der vorgestellten Methode liegt darin, daß sie mit Oberflächendaten inklusive Geländemodell als Datenbasis im regionalen Maßstab auskommt. Ihre Vor- und Nachteile ergeben sich zum großen Teil direkt aus dieser Tatsache. Zu beachten ist, daß geometrische Modellierungen in der Beschreibung und die damit einhergehende numerische Modellierung und Vorratsschätzung von Lagerstätten seit langem ein fester Bestandteil der Abbauplanung sind. Diese Modellierungen sind jedoch generell auf den Lagerstättenkörper und seine nächste Umgebung beschränkt, und sie stützen sich auf eine ungleich breitere Datenbasis in Form von Schürfen, Bohrprofilen und anderen Daten, die direkte Aussagen zum Untergrund machen. Umgekehrt wird mit der dargestellten Methode systematisch ein Modell im regionalen Maßstab unter Verwendung eines digitalen Höhenmodells erzeugt. Das erzeugte geologische Flächenmodell hat daher eine um ein Vielfaches größere Ausdehnung bei geringerer Datendichte als ein geometrisches Modell einer Lagerstätte.

Ein Vorteil der Methode ist deren hohe Flexibilität, sowohl im Visualisierungsbereich als auch im Editier- und Skalenbereich. Flexible Erstellungen dreidimensionaler Ansichten sind in modernen CAD-Programmen Standard, so daß unterschiedlichste Ansichten des Modells zu instruktiven Zwecken problemlos und schnell erzeugbar sind (siehe Abb. 7-3 und Tafel X). Dies ist mit analogen Methoden nicht zu leisten. Zudem stellt eine Modellansicht nur Fehler des Modells dar, enthält jedoch keine geometrisch konstruktiven Fehler, die bei der Konstruktion von Ansichten mit dem Bleistift entstehen können. Flexibilität im Editierungsbereich bedeutet, daß Veränderungen in Geometrie und Topologie des Modells jederzeit möglich sind, ohne zwangsläufig eine komplette Neuerstellung des Modells zu erfordern.

Die GIS-Form des Modells ermöglicht es dem Anwender, verschiedenste Daten zum Untergrund je nach Verfügbarkeit im Modell zu integrieren. Dies bedeutet unter anderem, daß aus einem Ursprungsmodell mit fortlaufender Aktualisierung durch zusätzliche Daten unterschiedlichster Quellen (Gelände, Geophysik, Stratigraphie...) beliebig komplexere und detailreichere Modelle erstellt werden können. Ziel ist die Erzeugung eines geologisch konsistenten dreidimensionalen Modells. Im Gegensatz dazu sind 2D-Daten und Datenprodukte oft selbst bei sehr sorgfältiger Erstellung geologisch inkonsistent (z.B. durchdringende Schichten, Löcher in Formationsgrenzen, etc...). Visualisierungen dienen dazu, Inkonsistenzen im Modell deutlich zu machen (z.B. Abb. 7-3) und wenn möglich zu korrigieren. Inkonsistenzen im Flächenmodell weisen auf Nachbearbeitungsbedarf hin, der bei Anwendung der Profilmethode oder anderen 2D-Methoden schlichtweg übersehen werden kann, besonders dann, wenn solche Strukturen absichtlich oder nicht in die Lücke zwischen den Profilen fallen. In jedem Fall ist Nachbearbeitung nur mit zusätzlichem geologischem Wissen aus anderen Datenquellen oder Geländearbeit möglich. Die Methode ersetzt deshalb nicht den kartierenden Geologen, stellt ihm jedoch eine erhebliche Hilfe bei der Planung und Durchführung von Geländearbeiten zur Verfügung, indem sie ihn gezielt auf Punkte mit Bedarf an zusätzlicher Information hinweist. Hieraus ergeben sich Vorteile gegenüber der Interpretation von Seismikprofilen. Zur Erstellung

eines geologischen Modells aus Seismikprofilen wird naturgemäß ebenfalls die Profilmethode mit ihren Nachteilen genutzt. Außerdem sind Seismikprofile nur für begrenzte Gebiete in meist flachem Gelände verfügbar, und dann meist teuer oder mit Mühe von der Industrie zu beschaffen.

Gegenüber der Seismik besitzt die vorgestellte Methode den weiteren Vorteil, daß sie vertikale bis subvertikale Strukturen in Fernerkundungsdaten erkennen und in das Modell einfließen lassen kann. Sie integriert damit konsequent auf regionaler Ebene gesicherte Oberflächendaten mit einem Geländemodell zur Erstellung eines kontinuierlichen Untergrundmodells.

Ein geologisches Flächenmodell, wie es mit dieser Methode erstellt wird, kann für weiterführende Arbeiten als Randbedingung dienen. Dies können zum Beispiel geophysikalische oder kinematische Modellierungen sein. Durch die relativ einfache Konvertierbarkeit in ein *boundary representation* Volumenmodell (siehe Kapitel 5.2.1) eignet sich ein Flächenmodell gut zu diesem Zweck. Außerdem ist es, wie oben erwähnt, kontinuierlich und auf Konsistenz geprüft, was gegenüber der Profilmethode bei der Umwandlung in ein Volumenmodell einen Fortschritt darstellt. In der Tat benötigen geologische Modellierungen jeder Art ein konsistentes geometrisches Eingangsmodell.

Die vorgestellte Methode verwendet günstig verfügbare Fernerkundungsdaten und Geländemodelle. Somit werden alle verfügbaren digitalen Oberflächendaten flächendeckend genutzt, Lücken in der Datenstützung ausgenommen (plio-quartäre Bedeckung, Vegetation, Wasserflächen...). Die genutzten Fernerkundungsdaten werden in absehbarer Zukunft immer leichter verfügbar und von höherer spektraler und räumlicher Auflösung sein, so daß die Durchführung der vorgestellten Methode einem immer größeren Kreis von Anwendern möglich sein wird.

Es konnte außerdem gezeigt werden, daß aus dem erstellten geologischen Flächenmodell direkt lokale und globale Abfragen durchzuführen sind, die Aussagen zu geologischen Fragestellungen ermöglichen. Diese Aussagen sind mit Informationen aus anderen Quellen kompatibel.

Ein Nachteil der Methode ist der hohe initiale Aufwand zur Erstellung eines geologischen Flächenmodells im regionalen Maßstab. Neben der Gewährleistung der Verfügbarkeit unterschiedlichster Software spielt die Einarbeitungsphase hier eine entscheidende Rolle. Ebenfalls recht hoch ist der Aufwand zur Erstellung eines brauchbaren Geländemodells, was jedoch seit kurzem durch neue, frei verfügbare Datenprodukte auf diesem Gebiet entschärft wird. Insgesamt ist der Aufwand jedoch vertretbar, wenn eine intensivere oder längerfristige Bearbeitung eines Gebietes bevorsteht, um mit Hilfe dieser Methode Interessenschwerpunkte aus der Geometrie und den Inkonsistenzen des Modells zu erarbeiten sowie geometrische Randbedingungen für andere Methoden zu stellen.

Ein schwer zu ermessender Faktor bei der Erstellung geometrischer Modelle ist der Einfluß der verwendeten Modellierungssoftware. Die jeweils verwendeten Interpolationsalgorithmen bestimmen maßgeblich die erzielten Resultate. Der hier verwendete DSI-Algorithmus erscheint als gute Lösung mit spezifischen Vorteilen bei der Integrierung von Randbedingungen. Inwieweit aber andere Algorithmen bei gleicher Datenausgangslage zu anderen Ergebnissen kommen oder in der Lage sind, mit DSI erzeugte Modelle weiterzuverarbeiten, bleibt noch zu untersuchen.

Nicht unterschlagen werden darf die Notwendigkeit von Geländeaufnahmen zur erfolgreichen Erstellung eines geologischen Modells. Stratigraphische und gefügekundliche Erkenntnisse sind nur in Ausnahmefällen bei entsprechend optimaler Aufschlußlage flächendeckend und nicht nur punktuell aus Fernerkundungsdaten messbar. Kartenwerke können hier hilfreich sein, wenn sie diese Informationen enthalten.

Die Methode ist überall dort gut anwendbar, wo aus Fernerkundungsdaten qualitativ hochwertige Eingangsdaten für das zu untersuchende Gebiet vorliegen. Die Methode erzeugt die besten Resultate bei hohem Relief in Verbindung mit erkennbaren Flächenausbissen und guten

Aufschlußverhältnissen. Ihre Grenzen erreicht die dargestellte Methode bei der Modellierung tiefer liegender und horizontaler Strukturen. Da die Methode in der dargestellten Form sich nahezu ausschließlich auf Oberflächeninformationen stützt, können Untergrundstrukturen, die keinen Ausbiß an der Oberfläche erzeugen, nicht direkt modelliert werden. In diesem Fall sind nur Interpretationen aus dem Gesamtkontext des Modells möglich, wie im interpretierten Profil gezeigt (Abb. 7-1). Probleme treten auch auf, wenn horizontale Strukturen modelliert werden sollen. Diese sind aus Fernerkundungsdaten schlecht zu erkennen, und daher ist die Methode auf Regionen mit ausreichendem Relief beschränkt. Bei schlechten Aufschlußverhältnissen über weite Bereiche, zum Beispiel in ausgedehnten rezenten Becken, ist eine Modellerstellung jedoch stark erschwert. Hier ergibt sich ein Ergänzungspotential von seismischen Daten. Diese sind typischerweise in Gebieten mit niedrigem Relief erhoben und können senkrechte Strukturen im Untergrund nicht abbilden. Eine generelle Integration von Seismikdaten in das Modell scheint daher angebracht.

Dennoch bietet die vorgestellte Methode bei schlecht oder nicht zugänglichen Gebieten eine Möglichkeit zur Erstellung regionaler geologischer Untergrundmodelle. Wenn Geländearbeit als Methode zur Erkundung des geologischen Baus noch nicht durchführbar ist, mag die dargestellte Methode die einzige Möglichkeit sein, effizient geologische Hypothesen zu testen und numerische Auswertungen durchzuführen. Dies ist einer der größten Vorteile fernerkundungsbasierter Methoden, der dafür gesorgt hat, daß sich die Fernerkundung solch einer großen Beliebtheit bei der geologischen Erkundung politisch instabiler, schwer zugänglicher und extraterrestrischer Gebiete erfreut.

7.3 Schlußfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit konnte ein dreidimensionales geologisches Modell am Rechner erzeugt werden, das wichtige Strukturen an der Uyuni-Kehnayani-Störungszone abbildet und geometrische Abfragen an diesen Strukturen ermöglicht. Aus der entwickelten Geometrie des geologischen Modells geht hervor, daß die aus ihm ableitbare finite Einengung der Oberkuste in der Größenordnung mit der von BABY *et al.* (1990, 1997) postulierten finiten Gesamteinengung kompatibel ist. Weiter ist aus dem Modell eine Tiefe des Abscherhorizonts der modellierten Überschiebungen von 5 bis 6 km Tiefe unter Geländeoberkante ableitbar. Die Tiefe dieses Horizonts macht deutlich, daß es vor der kontraktionalen Phase zu einer Absenkung des Gebietes westlich der UKS i.e.S. gekommen sein muß.

Am Beispiel von Seismikinterpretationen (siehe Abb. 7-2) konnte gezeigt werden, daß Schwächen der einzelnen Methoden durch deren Kombination im Rahmen des erstellten geologischen Flächenmodells überwunden werden können. Die Anwendung der vorgestellten Methode hauptsächlich in Gebieten mit hohem Relief, ergänzt zum Beispiel Seismikdaten, die typischerweise nur in flachem Relief aufgenommen werden. Es hat sich gezeigt, daß die vorgestellte Methode von Erweiterungen durch zusätzliche Datentypen nur profitieren kann. Deshalb sollte bei der Anwendung dieser Methode eine möglichst breite Datenbasis sowohl von Oberflächendaten, als auch von Untergrunddaten genutzt werden. Dazu gehören neben Seismikdaten vor allem Bohrprofile. Bei der Erstellung regionaler geologischer Modelle kommt der Methode deshalb eine fachübergreifende Bedeutung zu. Denkbar ist deshalb das Konzept eines zentral verwalteten und erweiterbaren Modells, das von mehreren Fachrichtungen Daten geliefert bekommt und im Gegenzug detailreiche, konsistente geometrische Modelle und geologische Interpretationen zurück liefert.

Die Notwendigkeit der Einbeziehung geologischer Informationen aus Geländearbeiten und der hohe initiale Aufwand zur Erstellung des Modells lassen eine Anwendung dieser Methode zwischen der ersten Geländekampagne und einer Folgekampagne optimal erscheinen. Einmal

erstellt, ermöglicht das Modell jedoch auch lokale und globale Abfragen zu geometrischen Parametern der Flächen, woraus sich beispielsweise finite Einengung ableiten läßt.

Ein für weiterführende Arbeiten interessanter Aspekt ist der Faktor Zeit. In der Tat kann eine geometrische Modellierung des Untergrundes als Grundlage für eine zeitliche Darstellung der Einengungsvorgänge dienen. Solch eine dynamische Rückwärtsmodellierung stellt mit ihrem erheblichen Arbeitsaufwand eine eigenständige wissenschaftliche Arbeit dar.

In der Zukunft werden dreidimensionale geologische Modelle durch die immer größere Anzahl verfügbarer Daten und Software zu diesem Zweck eine immer breitere Anwendung finden. Eingangsprodukte für Modellierungen verschiedener Art, wie z. B. kinematischer und geophysikalischer Modellierung, oder aber für bilanzierte Profile, werden konsistente geometrische Modelle des Untergrundes sein. Die vorliegende Arbeit kann in diesem Zusammenhang als Beitrag gesehen werden, eine Methode zur Erstellung dieser Modelle aufzuzeigen.