

„Ein geologisches Modell für den südlichen Altiplano bei 21° S (Bolivien), erstellt mit Fernerkundungs- und GIS-Methoden“

Dem Fachbereich Geowissenschaften

Der Freien Universität Berlin
eingereichte

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

Den Gutachtern

PD Dr. E. Scheuber (Erstgutachter)
Prof. Dr. F.K. List (Zweitgutachter)

vorgelegt

von Diplom-Geologen Patrick Goni
geboren am 18.08.1974

Ort und Datum der Disputation

Berlin, den 18. 06. 2003

Inhaltsverzeichnis

<u>INHALTSVERZEICHNIS.....</u>	<u>2</u>
<u>0 ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>4</u>
0.1 ZUSAMMENFASSUNG	4
0.2 ABSTRACT	5
<u>1 EINLEITUNG.....</u>	<u>7</u>
1.1 AUFGABENSTELLUNG	8
1.2 GEOLOGISCHER RAHMEN.....	10
1.2.1 PLATTENTEKTONISCHE GEGEBENHEITEN.....	10
1.2.2 GEOLOGIE DES SÜDLICHEN ALTIPLANO	10
1.3 LITHOLOGISCHE EINHEITEN	14
1.3.1 PALÄOZOIKUM.....	14
1.3.2 KREIDE/ PALÄOZÄN (UNGEGLIEDERT)	15
1.3.3 TERTIÄR	17
1.3.4 QUARTÄRE SEDIMENTE.....	20
1.4 MINERALISATIONEN UND LAGERSTÄTTEN.....	21
<u>2 DATENGRUNDLAGE.....</u>	<u>23</u>
2.1 LUFTBILDER UND TOPOGRAPHISCHE KARTEN	23
2.2 DIGITALES HÖHENMODELL (DHM).....	24
2.3 FERNERKUNDUNGSSYSTEME.....	27
2.3.1 DEFINITION UND GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG	27
2.3.2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	28
2.3.3 DIE SENSOREN UND AUFNAHMECHARAKTERISTIKA VON LANDSAT ETM+ 7.....	31
2.3.4 EINSATZ VON FERNERKUNDUNGSDATEN IN DER GEOLOGIE.....	33
<u>3 DIGITALE BILDVERARBEITUNG.....</u>	<u>35</u>
3.1 ORTHOPHOTOMOSAIK.....	36
3.2 SATELLITENBILDDATEN	38
3.2.1 BILDSTATISTIK.....	38
3.2.2 RGB-FALSCHFARBENKOMPOSITEN	41
3.2.3 BILDKORREKTUR	42
3.3 WEITERGEHENDE BILDVERARBEITUNG	46
3.3.1 QUOTIENTENBILDER (FARBRATIOS).....	47
3.3.2 IHS-TRANSFORMATION.....	48
3.3.3 HAUPTKOMPONENTENTRANSFORMATION	48
3.3.4 DEKORRELIERUNGSSTRECKUNG DER HAUPTKOMPONENTEN	50
3.3.5 TEXTURFILTER.....	50
3.3.6 KANTENVERSTÄRKUNGSFILTER	51
<u>4 ERFASSUNG DES TEKTONISCHEN INVENTARS.....</u>	<u>53</u>

4.1	DEFINITIONEN UND METHODIK	53
4.2	TEKTONISCHES INVENTAR IM GELÄNDE UND IN FERNERKUNDUNGSDATEN	55
4.2.1	GÄNGE	55
4.2.2	STÖRUNGEN	56
4.2.3	FALTEN	63
4.2.4	GESAMTBILD DER GELÄNDEBEOBACHTUNGEN	66
5	<u>METHODIK DER DURCHGEFÜHRTEN GIS-ANALYSE</u>	68
5.1	DEFINITION UND AUFBAU EINES GIS	68
5.2	EXTRAKTION DREIDIMENSIONALER GEOLOGISCHER INFORMATION	70
5.2.1	ALLGEMEINES ZUR MODELLIERUNG	70
5.2.2	DIE GEOLOGISCHE MODELLIERUNG	74
5.2.2	AUSWAHL DER DATEN	77
5.3	IMPLEMENTIERUNG DES GIS-MODELLS	78
5.3.1	DATENVORVERARBEITUNG IN SURPAC UND ANSCHLIEßENDE GOCAD-MODELLIERUNG	78
5.3.2	ANPASSUNG DER FLÄCHEN	80
5.4	GIS-ABFRAGEN	83
5.5	GEOLOGISCHE AUSSAGEKRAFT DES GIS-MODELLS	86
6	<u>INTERPRETATION DER DATEN</u>	88
6.1	INTERPRETATION AUS BILDVERARBEITUNG DER ETM-SATELLITENDATEN	88
6.1.1	RGB-FALSCHFARBENKOMPOSITENBILDER	88
6.1.2	QUOTIENTENBILDER (RATIOS)	88
6.1.3	HAUPTKOMPONENTENBILDER	89
6.1.4	RESULTATE DER STRUKTURINTERPRETATION	89
6.2	INTERPRETATION DES GEOLOGISCHEN MODELLS (GOCAD)	93
6.2.1	GEOLOGISCHE BESCHREIBUNG DES MODELLS	93
6.2.2	NUMERISCHE AUSWERTUNG DES MODELLS	97
7	<u>RESULTATE UND DISKUSSION</u>	104
7.1	GEOLOGISCHE AUSSAGE DES MODELLS	104
7.2	MÖGLICHKEITEN UND SPEZIFISCHE VOR- UND NACHTEILE DER METHODE	109
7.3	SCHLUßFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	112
8	<u>LITERATUR</u>	114
	<u>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TAFELN</u>	121
	<u>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN</u>	122
	<u>TAFELN</u>	124

0 Zusammenfassung

0.1 Zusammenfassung

Die Uyuni-Kehnayani Störungszone (UKSZ) ist eine im Departamento Lipez in Südbolivien gelegene, den südlichen Altiplano 200 km weit in SSW-NNE Richtung durchziehende Störungszone. Sie ist schräg zum allgemeinen N-S gerichteten Gebirgsstreichen orientiert und durch langgestreckte Paläozoikumsaufbrüche gekennzeichnet. Sie trennt schwach bis ungefaltete känozoische Formationen im SE von einem Falten- und Überschiebungsgürtel entsprechender Gesteine im NW. Vom Paläozän bis Unteroligozän wurden zu beiden Seiten unter extensionalen Bedingungen große Mächtigkeiten siltiger Rotsedimente als Beckenfüllung über marinen kretazischen Sedimenten abgelagert. Große Mächtigkeitsunterschiede im Bereich der UKSZ weisen sie als Dehnungsstruktur in dieser Zeit aus, die während der Einengungstektonik im Miozän invertiert wurde. Die UKSZ ist durch ein System von steilen Auf- und Überschiebungen gekennzeichnet.

Kinematische und tektonische Beobachtungen sind durch das Fehlen geeigneter Aufschlüsse mit kinematischen Indikatoren in den meist siltigen Sedimenten schwierig. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die es erlaubt, aus der oberflächlichen geologischen Aufnahme, wie dem Einmessen von Flächenorientierungen in Gelände und Luftbild, ein konzeptionelles geologisches Modell zu erstellen. Als zusätzliche Informationsquelle wurde eine Satellitenbildinterpretation zur Identifizierung bedeutender Störungen und Falten herangezogen. Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin, Oberflächendaten in den Untergrund zu extrapolieren, wobei Digitale Höhenmodelle (DHM) bei saigerstehenden oder überkippten Flächen nicht genutzt werden können. Als Methode wurde der *Discrete Smoothing Interpolator* (DSI) zur Konstruktion von Flächenmodellen mit TIN-Struktur gewählt (Trianguliertes Irreguläres Netzwerk). Außerdem bietet DSI den Vorteil, daß Flächenlage und andere Zusatzinformationen wie Formationsmächtigkeiten als Randbedingungen in das Modell integriert werden können.

Das entstandene geometrische Modell zeigt die Hauptstrukturen im Bereich der UKSZ und ihre Geometrie im Untergrund. Die ungefalteten, flach lagernden känozoischen Formationen südöstlich der UKSZ bilden einen deutlichen Kontrast zu den ihnen entsprechenden westlichen, steilgestellten Formationen. Sie stellen die Füllung eines ehemaligen Halbgrabens dar. Die Basis der känozoischen Sedimente fällt im Modell leicht nach Norden ein, was mit der regionalen Geologie übereinstimmt.

Probleme werden in den Randbereichen des Flächenmodells deutlich. Durchdringungen von Formationsgrenzen und Randeffekte zeigen die Notwendigkeit, detailliertere Informationen in das Modell zu integrieren und auch Gebiete außerhalb des eigentlichen Modells zu berücksichtigen, sowie auch eine höhere Informationsdichte anzustreben. Einige der Inkonsistenzen könnten im Gelände beobachteten kleinmaßstäbigen Strukturen zugeordnet werden, die wegen ihrer scheinbar untergeordneten Bedeutung nicht in das Modell integriert wurden. Andere Inkonsistenzen weisen auf im Untergrund verborgene Strukturen hin.

Trotzdem ist das durch die vorgestellte Methode erstellte geologische Modell mit der regionalen Geologie generell konsistent, wobei Gebiete, in denen die Konsistenz des zugrundeliegenden geologischen Konzepts noch nicht ausreichend ist, deutlich erkannt werden können. Die so gewonnenen Hinweise auf Gebiete von hoher Relevanz für das geologische Modell sind für die erfolgreiche Durchführung von Geländekampagnen von großer Bedeutung.

Die numerische Auswertung des Modells ergibt Werte für die finite Einengung entlang der UKSZ, die mit Werten aus der Literatur im Einklang stehen. Die vorgestellte Methode erlaubt die Generierung konsistenter geologischer Modelle, die als Randbedingung für andere geologische Modellierungsmethoden, wie etwa der Erstellung balanzierter Profile, dienen können. Die

Validierung des Modells kann mit Hilfe unabhängiger Datensätze wie etwa seismischen Profilen oder Modellierungen von Schwerefeldanomalien aus Dichtemodellen erfolgen. In diesem Kontext stellt sich die Frage nach der Genauigkeit des Modells. Die Ermittlung der Konfidenzparameter für Geometrie und Topologie ist immer noch ein ungelöstes Problem. Das erarbeitete geologische Modell kann als Ausgangspunkt für Untersuchungen zur Ermittlung von Konfidenzparametern für Geometrie und Topologie dienen. Mit der vorgestellten Methode können konzeptionelle Fehler, die aus geologischen Karten und Profilen allein nicht erkennbar sind, sehr leicht sichtbar gemacht werden.

0.2 Abstract

The Uyuni-Kehnayani Fault Zone (UKFZ) is a major Altiplano-internal structure of the Altiplano located in the Departamento Lipez of Southern Bolivia, it strikes NNE, which is slightly oblique to the N-trending Eastern and Western Cordillera. During Paleocene and Eocene times in an extensional regime, a thick sequence of red siltstones was deposited as basinfill over marine Cretaceous sediments. Later, the UKFZ became a contractional structure and more fine clastic material was syntectonically deposited. The fault zone is marked by a system of thrust faults and branch thrusts that are dipping more and more steeply to the west. The entire structure overthrusts a Paleozoic ridge east of the UKFZ sensu strictu.

Kinematic and tectonic observations are difficult due to the lack of adequate outcrops of the silty clastics. In this contribution, a method is proposed that allows to build a conceptual geological model from surface geology, as well as strike and dip of bedding planes measured in the field and in aerial photographs. Additionally, a satellite image interpretation was performed for identification of major thrust and fold structures. The difficulties in this task consist in extending surface data into the subsurface, where steep or overturned surfaces make the use of a Digital Terrain Model (DTM) impossible. The chosen method uses the Discrete Smoothing Interpolation Algorithm (DSI) for constructing surface models with a Triangulated irregular Network (TIN) structure. Also, bedding and additional information such as sequence thicknesses can be incorporated in this model as constraints for DSI.

The resulting geometrical model clearly shows the main structures of the UKFZ and their subsurface geometry. The nonfolded, flat lying Cenozoic formations east of the UKFZ form a distinct contrast to the upright to overturned orientation of the same formations west of the UKFZ. These overthrust sediments form the infill of an inverse half-graben basin combined with a large anticline west of the UKFZ. The base of Cenozoic sediments is plunging slightly to the north, which is consistent with regional structures.

Problems arose in areas at the borders of the geological surface model. Crosscutting of bedding surfaces and edge effects show the necessity for integrating detailed structures and data from outside of the study area and for closer sampling intervals. Some of the inconsistencies could be attributed to small-scale structures from field investigations that were not integrated into the model because of their apparently small size. Some other inconsistencies could be attributed to hidden subsurface structures.

Areas where consistency of geological concepts is not yet sufficient could clearly be identified. The clues to the location of outcrops of significant importance are crucial for a successful field investigation. The geological model obtained with this approach is consistent with the overall regional geology. Numerical analyses of the model show a value of finite shortening along the UKFZ that is matching the values of previous works.

Our method produces a consistent geological model, which can be used as constraint for other geological methods, such as balancing cross-sections. Validation of the model can be performed in combination with independent data sets such as seismic profiles or gravity anomaly modelling from density models. In this context, there the question arises what is the accuracy of a geometrical model. The assessment of confidence parameters for topology and geometry is still an unresolved problem. The elaborated geometrical model can be a starting point for studies on

this problem. Moreover, conceptual errors that are invisible in geological maps, even combined with sections, are much more easier to detect using the proposed method.