

# **Gravity Data Analysis and Interdisciplinary 3D Modelling of a Convergent Plate Margin (Chile, 36°–42°S)**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften

vorgelegt von

Zuzana Tašárová

am Fachbereich Geowissenschaften  
der Freien Universität Berlin  
im November 2004

Erstgutachter: Prof. Dr. Hans-Jürgen Götze

Zweitgutachter: Prof. Dr. Volker Haak

Tag der Disputation: 30. November 2004

### *Erklärung*

Hiermit versichere ich, daß die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken wörtlich oder inhaltlich entnommen sind, wurden durch entsprechende Angaben der Quellen kenntlich gemacht. Dieser Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

I certify that this thesis is my own composition, all sources have been acknowledged and my contribution to the thesis is clearly identified. The thesis has not previously been accepted for a degree at this or another institution.

---

*FOR MY PARENTS  
& PAOLO*

# ABSTRACT

This thesis was conducted as part of the research program *Sonderforschungsbereich 267* (SFB 267) "Deformation Processes in the Andes". Over the last 12 years, the SFB 267 has focused on understanding of subduction-related processes. The Andean mountain belt is an orogen related to the subduction of the oceanic Nazca Plate below the western margin of the continental South American Plate. The Andes are characterized by significant variations in topography, crustal structure and deformation along the convergent margin. The southern working area of the SFB 267 (36°–42°S) differs significantly from the previously studied, broad and high Central Andes at 20–25°S.

The Southern Andes at 36–42°S are much lower and narrower and, from the geophysical point of view, are less known area than the Central Andes. In 2000 and 2001, two geophysical experiments, ISSA and SPOC, were performed to collect new offshore and onshore data between the trench and the volcanic arc. Based on these data, an integrated 3D density model was constructed that is constrained by all available geophysical and geological additional information. This model should provide insight into the along-strike segmentation of the Andean mountain belt that is particularly evident.

The gravity data used for the modelling were measured during the past 30 years by several South American institutions. Part of the data used were measured and compiled by the gravity group of the SFB 267 (MIGRA 2000–2002 campaigns, subprojects C6 and F4). The analysis of the database, done in the framework of this thesis, revealed some serious problems among the compiled data. These problems are probably caused by the use of different instruments, different data processing methods and, particularly, the lack of information describing the origin of the data. Due to these problems and a lack of information about the data, a resurvey of selected profiles was performed in 2002. After remeasurements, 500 erroneous stations were identified and excluded from the dataset and a reprocessed database for the study area was introduced. This database was then used to construct a 3D density model using the forward modelling technique.

Within the gravity field, three forearc-arc segments have been identified. These segments are also evident in geology and are characterized by variations of the Bouguer gravity anomaly, especially along the coast. The northern segment at 36–39°S is characterized by a pronounced gravity high of  $60\text{--}80 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  in the forearc, whereas the volcanic arc and a backarc are characterized by gravity low of up to  $-160 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ . The middle segment at 39–40°S is characterized by a low gravity in the forearc ( $0 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ) and an increase of the minimum gravity values associated with the main arc and the backarc to some  $-80\text{--}100 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ . The southernmost segment at 40–42°S is characterized by a forearc gravity high of  $60 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  with a longitudinal offset compared to the northern segment. The minimum Bouguer gravity anomaly is related to the backarc area and reaches values of  $-100 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ .

The density model is constrained by the seismic data in the northern segment at 36–39°S, whereas the results from the remaining segments are based only on geology and gravity data interpretation. The values of P-wave velocity from the four seismic profiles available in the study were

converted into densities, which were then used during modelling. Also, two other approaches were used that allow calculating of P-wave velocity and density values of given rocks, based on their composition. The density determination was supplemented by direct density measurements of chosen samples representing the forearc region of the study area.

In general, the study area is characterized by a crustal thickness in the range of 25 to 35 km in the forearc beneath the Longitudinal Valley, 35–45 km below the volcanic arc, with a maximum of 53 km at ~36°S.

Based on the results of the forward modelling, the variation within the gravity field along the margin is dominantly caused by regional features, such as the position of the subducting Nazca plate, as well as structures of the overlying continental plate. The structure of the oceanic plate (its position and density) appears to be crucial for the gravity field and hence, various tests were performed in order to show its influence and thus significance for the density modelling.

Based on the density model, the position of the slab below the forearc shows an along-strike variation. It is shallowest in the northern segment, where it is responsible (at long wavelengths) for the observed gravity high, and seems to be deepest in the middle segment. This middle segment where no gravity high is observed, corresponds to the area of the large Valdivia earthquake (1960). Based on the observed gravity field it is interpreted as an anomalous region along the entire length of the margin because the Bouguer gravity high is elsewhere always present. In the density model, the observed gravity in this middle segment was produced by a deep position of the oceanic plate beneath the forearc region and by continental crust with a normal thickness. The position of the slab is, however, dependent on the composition of the forearc accretionary wedge. In turn, the density of the accretionary wedge determines the depth of the oceanic plate. Therefore, a careful analysis of the surface rocks is necessary in order to derive a density value that represents the composition of the continental crust. However, with no geophysical data showing deeper features in the crust and because both density of the upper plate and the position of the lower plate are unknown, the nature of the forearc crust remains unresolved.

The gravity high in the southern segment, shifted landwards, is the result of crust thinned to 25 km beneath a well-developed Longitudinal Valley with a sediment infill of some 3 km. Because the region south of ~39°S is unconstrained by other geophysical data (apart from the gravity data), several versions of the model were also tested in order to identify the best interpretation of the observed gravity field. The curvature technique was applied to detect characteristics of the gravity field and to compare the modelled fields reproduced from two different models with the measured data. The results show that the preferred (final) model with a thin crust under the Longitudinal Valley matches the measured gravity better than the modified version having a crust that is thicker and more dense.

The study area in the Southern Andes at 36–42°S will remain the subject of investigations in the framework of the TIPTEQ project (as part of the German Geotechnology program). Therefore, the new additional data are expected to improve the quality of the future gravity modelling because they will provide more constraining information that is necessary. Also, an improvement for the further density modelling will come from the results of the new satellite mission GOCE. This mission will conduct high-accuracy measurements of the gravity gradients and provide global models of the Earth's gravity field, which can help to improve the existing gravity database.

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 267 (SFB 267) "Deformationsprozesse in den Anden" durchgeführt. Seit 12 Jahren werden in diesem Schwerpunktprogramm subduktionsbezogene Prozesse und die Gebirgsbildung am aktiven Kontinentalrand Südamerikas in interdisziplinärer Weise untersucht und modelliert. Die Anden zeichnen sich durch starke laterale Variationen und strukturell-dynamische Segmentierung entlang des Kontinentalrandes aus. Um der Frage nachzugehen, warum es in den zentralen Anden zur Plateaubildung kam und in den Südanden nicht, wurden zwei SFB Arbeitsgebiete zu Vergleichszwecken ausgewählt und mit einem dichten Netz geowissenschaftlicher Feldarbeiten überdeckt. Die beiden Untersuchungsgebiete des SFB 267 unterscheiden sich erheblich in Bezug auf ihre Ausdehnung, Höhe, morphologische Ausprägung, Klima und ihren tektonischen Stil. Es ist das Ziel dieser Arbeit, ein 3-dimensionales Dichtemodell für das südliche SFB-Untersuchungsgebiet zu erstellen und an Hand der übrigen Informationen und Daten zu interpretieren.

Die Topographie der Südanden zwischen 36°–42° S ist im Vergleich zu den Zentralanden deutlich geringer ausgebildet und weniger breit und - was die Kenntnis der Lithosphäre betrifft - aus geophysikalischer Sicht weitgehend unbekannt. Deshalb wurden dort in den Jahren 2000 und 2001 zwei geophysikalische Messkampagnen durchgeführt: das ISSA und das SPOC Experiment. Basierend auf diesen Daten, die sowohl offshore als auch onshore zwischen der Küste und dem vulkanischen Bogen erhoben wurden, ist ein umfassendes 3D-Dichtemodell erstellt worden. In diesem Modell werden Schwerefelddaten und viele der verfügbaren geophysikalischen und geologischen Informationen zusammengeführt, um neue Erkenntnisse zur Segmentierung in den südlichen Anden zu gewinnen.

Die Schweredaten, die hierbei verwendet wurden, sind über die letzten 30 Jahre von verschiedenen südamerikanischen Institutionen und der Arbeitsgruppe Gravimetrie im Rahmen des SFB 267 gemessen und kompiliert worden (MIGRA-Kampagnen 2000 und 2002 der SFB-Teilprojekte C6 und F4). Während der für diese Arbeit durchgeführten Analyse der gravimetrischen Datenbasis traten bei der Zusammenführung der Datensätze erhebliche Schwierigkeiten in Form von inkompatiblen Schwerewerten und offensichtlichen Mess- und Auswertefehlern auf. Diese Probleme gehen nach den Recherchen in dieser Arbeit auf den Einsatz unterschiedlicher Messinstrumente, deren fehlerhaften Einsatz sowie auf unvollkommene Prozessingmethoden zurück. Hinzu kommt, dass keinerlei Metadaten für ein Re-Prozessing zur Verfügung standen. Aus diesen Gründen erfolgte 2002 entlang ausgewählter Profile eine Neuaufnahme von Schweredaten. Anhand dieser Messungen konnten 500 fehlerhafte Stationen identifiziert und der Datensatz homogenisiert werden. Dieser verbesserte Datensatz wurde als Grundlage für die Berechnungen des 3D-Dichtemodells mit Hilfe der Vorwärtsmodellierung verwendet.

Bereits bei der numerischen Analyse der Schwereanomalien (Filtern, Feldfortsetzung, Felderseparation, Curvature etc.) wurden drei Segmente identifiziert. Diese Segmente zeichnen sich besonders in Bereich der Küstenregion auch in den geologischen Strukturen und in Variationen der Bouguerschwere ab.

Der nördliche Teil des Untersuchungsgebiets zwischen  $36^\circ$  und  $39^\circ$  S ist (1) durch ein ausgeprägtes *Schwerehoch* von  $60\text{--}80 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  im Forearc und (2) durch mehrere Schwereminima im Bereich des vulkanischen Bogens und Backarc von bis zu  $-160 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  charakterisiert. Im Unterschied zum Rest des Arbeitsgebietes zeichnet sich das mittlere Segment zwischen  $39^\circ\text{--}40^\circ$  S durch ein verhältnismäßig ausgeprägtes *Schweretief* im Forearc-Bereich ( $0 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  und einem Schwereminimum von  $-80$  bis  $-100 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  im Bereich des vulkanischen Bogens und des Backarcs aus. Der südlichste Teil des Untersuchungsgebiets zwischen  $40^\circ$  und  $42^\circ$  S ist durch ein Schwerehoch von  $60 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  im Forearc-Bereich gekennzeichnet, das im Vergleich mit dem nördlichen Abschnitt eine Verschiebung nach Osten aufweist. Die negative Bougueranomalie in diesem Segment mit Werten von ca.  $-100 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  liegt im Backarc-Gebiet.

Das in dieser Arbeit vorgestellte 3D-Dichtemodell wird im nördlichen Segment durch Messungen anderer geophysikalischer Methoden gut gestützt, die beiden übrigen Segmente basieren allein auf der Interpretation von geologischen Befunden und Schweredaten. Die Werte der aus vier seismischen Profilen abgeleiteten P-Wellengeschwindigkeiten wurden in Dichten überführt und im Modell verarbeitet. Zusätzliche Informationen zu typischen P-Wellengeschwindigkeiten und Dichten der Lithosphäre wurden aus der Literatur entnommen oder für Gesteine und größere Modellformationen mit bekannter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung abgeleitet. Eigene Dichtemessungen an diversen Gesteinsproben, die im Forearc-Arc Bereich des Untersuchungsgebiets genommen wurden, vervollständigen die Dichteinformationen für die Modellierungen. Nach den Modellrechnungen beträgt die Krustendicke  $Z$  im Untersuchungsgebiet (1) im Forearc-Bereich unter dem Längstal zwischen  $25 \text{ km} < Z < 35 \text{ km}$  und (2)  $35 \text{ km} < Z < 45 \text{ km}$  ( $Z_{\text{max}} = 53 \text{ km}$  auf der geographischen Breite von  $36^\circ\text{S}$  unterhalb des Vulkanbogens).

Weiterhin konnten auf Grund der durchgeführten Dichtemodellrechnungen im Rahmen dieser Arbeit die Variationen im Schwerfeld am Kontinentalrand erklärt werden. Dies trifft insbesondere auf regionale bzw. lokale Besonderheiten des Modellgebietes zu, wie z.B. die Tiefenlage und der Abtauchwinkel der subduzierten Nazca-Platte bzw. die Struktur und Dichte der darüber liegenden Kontinentalplatte. Der geometrische und kompositionelle Aufbau der ozeanischen Platte haben einen signifikanten Einfluss auf das gemessene Schwerfeld und aus diesem Grunde wurden verschiedene Tests zu alternativen Modellvarianten durchgeführt, um den dominierenden Einfluss der ozeanische Platte auf das Schwerfeld zu demonstrieren und diskutieren.

Mit dem Dichtemodell konnte gezeigt werden, dass die sich ändernde Lage der abtauchenden Platte unterhalb des Forearcs entlang der Subduktionszone nachweisbar ist. Im nördlichen Segment liegt die Platte verhältnismäßig flach und verursacht Anomalien in den langen Wellenlängen des beobachteten Schwerehochs. Am tiefsten liegt die Platte im mittleren Teil des Arbeitsgebietes. Dieses Segment, in dem kein Schwerehoch beobachtet wurde, korrespondiert mit dem Gebiet des Valdivia-Erdbebens von 1960. Im beobachteten Schwerfeld ist dieser Bereich als "anomal" zu interpretieren, weil im Vergleich zum gesamten chilenischen Kontinentalrand hier das



typische "Trench-parallele" Schwerehoch fehlt. Die beobachtete Schwere im mittleren Segment lässt sich durch eine tiefere Lage der ozeanischen Kruste unterhalb der Forearc-Region und einer normalen kontinentalen Krustendicke ableiten. Allerdings lassen sich die beiden Hauptschwereeffekte, die (1) durch die Tiefelage der ozeanischen Platte und (2) durch die petrologische Zusammensetzung (Dichte) des Forearc Akkretionskeils verursacht werden, nicht wirklich eindeutig trennen. Es konnte durch Modelltests gezeigt werden, dass die Dichte des Akkretionskeils einen signifikanten Einfluss auf die Modellschwere hat und damit mittelbar die Festlegung der Tiefenlage der ozeanischen Modell-Platte beeinflusst. Daher ist eine sorgfältige Analyse der oberflächennahen Gesteine notwendig, um zuverlässige Dichtewerte zu erhalten, die der Zusammensetzung der kontinentalen Kruste möglichst nahe kommen. Leider konnte anhand der bestehenden geophysikalischen Datenlage und der damit verbundenen Verfügbarkeit "harter" Randbedingungen für die Vorwärtsmodellierung das Zusammenspiel zwischen Oberplattendichte und Tiefelage der Unterplatte nicht abschließend erklärt werden.

Das Schwerehoch, das im südlichen Abschnitt in Richtung des südamerikanischen Kontinents verschoben ist, wird durch eine Krustenausdünnung von bis zu 25 km unterhalb des ausgeprägten Längstals erklärt, das mit Sedimentmächtigkeiten von etwa 3 km verfüllt ist. Da die Interpretation des Gebiets südlich von ca. 39° S ausschließlich auf Schweredaten basiert, wurden auch hier mehrere Modellvarianten getestet, um die Zuverlässigkeit (Aussage-Signifikanz) beurteilen zu können. Zusätzlich wurden über eine Berechnung von Krümmungsparametern des Schwerefeldes besondere Eigenschaften des Schwerefeldes herausgearbeitet und in zwei Modellen verifiziert. Es konnte damit gezeigt werden, dass das originale Model mit einer geringeren Krustenmächtigkeit (ca. 25 km) die beobachtete Schwere besser reproduziert als die modifizierte Version mit einer dichteren Kruste von etwa 40 km Mächtigkeit.

Es ist zu erwarten, dass mit den neuen seismischen Experimenten im Rahmen des TIPTEQ-Programms (als Teil des deutschen Geotechnologie-Programms) die Datenlage am südlichen Kontinentalrand Südamerikas erheblich verbessert wird, so dass für zukünftige Modellierungen der Schwerefeldkomponenten härtere Randbedingungen zur Verfügung stehen werden. Auch die Verfügbarkeit von Schweregradienten (GOCE Satelliten-Mission) wird die Schwerefeldmodellierung weiter verbessern können.



# Table of Contents

1	INTRODUCTION.....	1
2	GEOLOGY.....	5
2.1	Regional scale features of the Andes .....	5
2.1.1	Introduction and a short outline of the evolution.....	5
2.1.2	Segmentation/variations along the margin .....	7
2.2	Local features of the study area (36°–42°S).....	10
2.2.1	Offshore.....	10
2.2.2	Onshore.....	13
2.2.3	Volcanic arc .....	13
2.2.4	The Morphotectonic Units .....	14
2.3	Geological segmentation – local scale.....	17
2.3.1	Arauco - Lonquimay (37°S–39°S).....	17
2.3.2	Valdivia - Liquiñe (39°S–40°S).....	18
2.3.3	Bahía Mansa - Osorno (40°S–42°S).....	19
3	GRAVITY DATABASE.....	21
3.1	Offshore.....	21
3.2	Onshore gravity database.....	22
3.3	Analysis of the gravity database.....	26
3.4	Accuracy of the gravity database.....	37
4	CONSTRAINING DATA.....	45
4.1	Introduction.....	45
4.2	Geophysical constraints.....	46
4.2.1	Data from the ISSA experiment.....	46
4.2.2	Data from the SPOC experiment.....	54
4.2.3	Magnetotelluric study .....	56
4.3	Velocity – Density Relationship.....	57
4.3.1	Introduction.....	57
4.3.2	Indirect methods of density determination.....	58
4.3.3	Problems associated with indirect density determination.....	63
4.3.4	Direct methods.....	65
5	DENSITY MODEL.....	67
5.1	IGMAS.....	67
5.1.1	Mathematical background.....	67
5.1.2	Three dimensional structure.....	69
5.1.3	Constraining data and GIS functions.....	71
5.1.4	The reference model.....	74
5.2	Description of the density model.....	76
5.3	The interpretation of the gravity field .....	80
5.4	The continental plate .....	89
5.4.1	Structures and density of the upper plate.....	89
5.4.2	Thickness of the continental crust.....	93
5.4.3	The upper and middle crustal layers.....	94
5.4.4	The lower crust.....	94

5.5	The oceanic plate .....	95
5.5.1	Density of the subducting slab.....	95
5.5.2	Position of the subducting slab.....	98
5.6	Summary of the density model results.....	102
6	DISCUSSION.....	103
6.1	Comparison to the constraining data.....	103
6.1.1	Comparison to the SPOC and ISSA profiles.....	103
6.1.2	Comparison to magnetotelluric profiles.....	106
6.1.3	Comparison to the local earthquake tomography model.....	108
6.1.4	Misfits between the gravity model & other geophysical data.....	113
6.1.5	Euler deconvolution.....	116
6.2	Varying parameters related to the continental crust.....	119
6.2.1	Modified lower crustal densities and thickness.....	119
6.2.2	Conclusions for the continental crustal structure.....	122
6.3	Varying parameters related to the oceanic plate.....	123
6.3.1	Slab density.....	123
6.3.2	The slab beneath the forearc (all three segments).....	126
6.3.3	The slab under the Arauco-Lonquimay segment.....	129
6.3.4	The slab and the crustal thinning south of 40°S.....	134
6.4	Curvature technique.....	136
6.5	Conclusions.....	145
7	SUMMARY AND OUTLOOK.....	147
7.1	Conclusions.....	147
7.2	Outlook.....	151
	REFERENCES.....	153
A.	ADDITIONAL FIGURES.....	163
B.	P/T DETERMINATION.....	167