

3-D Lokalbebtomographie der südlichen Anden zwischen 36° und 40°S

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften

am Fachbereich Geowissenschaften

der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Mirjam Bohm

Januar 2004

Erstgutachter: Priv. Doz. Dr. Günter Asch
Zweitgutachter: Prof. Dr. Rainer Kind

Tag der Disputation: 20. Februar 2004

Ein heftiges Erdbeben zerstört mit einem Schlage alle gewohnten Vorstellungen, daß nichts so sicher und fest sei wie die Erde, die wir bewohnen; nun schwankt plötzlich der Boden unter unseren Füßen wie eine dünne Kruste über einer unsicheren Flüssigkeit.

Ch. Darwin

Zusammenfassung

Die südlichen Anden sind Teil des aktiven Kontinentalrandes von Südamerika, der durch eine Kombination subduktionsgebundener Prozesse gebildet wurde. Die andine Gebirgskette erstreckt sich über den gesamten südamerikanischen Kontinent, variiert jedoch merklich in Höhe und Krustenmächtigkeit. Während die Zentralen Anden, vor allem auch die tieferen Strukturen bis in den oberen Mantel, vergleichsweise gut erforscht sind (SFB 267), ist über den geophysikalischen Aufbau der südlichen Anden bisher relativ wenig bekannt. Aus diesem Grund wurde das seismische Experiment ISSA 2000 in den südlichen Anden durchgeführt. In dieser Arbeit wurde mithilfe der Methode der lokalen Erdbebentomographie ein 3-D Modell der seismischen Geschwindigkeitsstruktur erstellt. Die gleichzeitig durchgeführte Lokalisierung der registrierten Erdbeben, ergibt darüberhinaus ein detailliertes Bild der Verteilung der Seismizität im Untersuchungsgebiet.

Im Rahmen des ISSA 2000-Experimentes wurde ein seismologisches Netzwerk mit 62 Seismographen betrieben, das die Subduktionszone von der Küste bis in den *backarc* zwischen 36° und 40° S überdeckt. In einem Zeitraum von 3 1/2 Monaten wurden 440 lokale Erdbeben registriert, die Aufnahme in den ISSA 2000-Datenkatalog fanden.

P- und S-Laufzeiten von 150 ausgewählten, gut lokalisierbaren Erdbeben wurden für das 1-D Geschwindigkeitsmodell und die Hypozentralparameter invertiert. Das Geschwindigkeitsmodell diente als Startmodell in der 3-D Tomographie. Die Hypozentren der Erdbeben zeigen eine $\sim 30^\circ$ geneigte Wadati-Benioff-Zone mit kontinuierlicher Seismizität bis in 120 km Tiefe, die vereinzelt bis in 200 km Tiefe zu beobachten ist. Sowohl die generell geringe Seismizität im Untersuchungsgebiet als auch die geringe Tiefenerstreckung der Wadati-Benioff-Zone u.a. im Vergleich zu den Zentralen Anden sowie die Konzentration der mitteltiefen Erdbeben in 60 km Tiefe, spiegeln wahrscheinlich den Einfluß des jungen Alters und des damit verbundenen hohen thermischen Zustandes der Nazca-Platte auf das Subduktionsregime wider. Die krustale Seismizität konzentriert sich im *forearc* Bereich nördlich und südlich der Arauco-Halbinsel am Beginn aktiver Störungszonen (Bio-Bio- und Gastre-Störung) und damit in einem Gebiet, das die höchsten Hebungsraten im *forearc* aufweist. Während sich die Diskontinuitäten ins Landesinnere bis zur Hauptkordillere fortsetzen, ist ihr seismische aktiver Teil auf den *forearc* begrenzt.

Die 3-D v_p Tomographie wurde nach dem graduellen Ansatz durchgeführt, d.h. es wurde noch ein 2-D Modell als Zwischenschritt erstellt. Diese Vorgehensweise stellt sicher, daß in Gebieten mit geringerer Auflösung, die wahre Struktur besser durch ein regionales 2-D Modell abgeschätzt wird. Besonderes Gewicht wurde auf die Abschätzung der Lösungsqualität gelegt. Neben den Standardparametern, wie DWS, RDE und *spread* Funktion, wurden auch synthetische Test in die Analyse einbezogen. Die kombinierte Abschätzung der Lösungsqualität ergab gut aufgelöste Bereiche für die Küstenkordillere und das Längstal bis in 100 km Tiefe. Unterhalb der Hauptkordillere nimmt die Auflösung ab und variiert von N nach S zwischen 30 und 100 km Tiefe. Für das v_p/v_s Verhältnis konnte ein 2-D Modell berechnet werden.

Das tomographische v_p Modell zeigt zum ersten Mal die Geschwindigkeitsstruktur der südlichen Anden (Küstenkordillere bis Hauptkordillere) bis in eine Tiefe von 100 km. Es ist im Wesentlichen durch von Osten nach Westen variierende Geschwindigkeitsanomalien geprägt. Die Nazca-Platte ist durch die Lage der Erdbeben definiert und durch hohe v_p Geschwindigkeiten gekennzeichnet (7,2–8,3 km/s). Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten in der kontinentalen Kruste sind im gesamten v_p Modell relativ hoch (5,5–6,5 km/s). Die tieferliegende Struktur kann in drei Gebiete unterteilt werden.

Erniedrigte v_p Geschwindigkeiten in 30–50 km Tiefe unterhalb der Küstenkordillere und oberhalb der abtauchenden Platte deuten eine mögliche Hydratisierung und Serpentinisierung des kontinentalen Mantelkeils an. Die Konzentration der Erdbeben in 60 km Tiefe, die auf Dehydratisierungsprozesse innerhalb der subduzierten ozeanischen Lithosphäre zurückzuführen ist, könnte mit der beobachteten Geschwindigkeitsanomalie verbunden sein. Mantelgeschwindigkeiten werden in diesem Bereich nicht beobachtet.

Der Bereich unterhalb des Längstals ist von einer markanten Anomalie erhöhter v_p Geschwindigkeiten geprägt, die das gesamte Untersuchungsgebiet von N nach S durchzieht. Mantelgeschwindigkeiten werden hier ab 40 km Tiefe erreicht.

Weiter nach Osten nimmt die Krustenmächtigkeit zu und erreicht 50–55 km unterhalb der Hauptkordillere und des aktiven vulkanischen Bogens. Geringe Geschwindigkeiten, ein erhöhtes v_p/v_s Verhältnis und die sich durch die Spektralanalyse andeutende Zone erhöhter seismischer Dämpfung könnte auf das Vorhandensein partieller Schmelzen und deren mögliche Anlagerung unterhalb der Kruste (magmatische Unterplattung) hindeuten.

Abstract

The Southern Andes are part of the South American active continental margin, which was built by a combination of subduction related processes. The Andean mountain chain covers the whole South American continent from north to south, but varies remarkably in elevation and crustal thickness. Whereas the Central Andes, above all the deeper structures as far as the upper mantle, are studied quite intensively (SFB 267), so far little is known about the geophysical constitution of the Southern Andes. For this reason the seismic experiment ISSA 2000 was carried out in the Southern Andes. In this study a 3-D model of the seismic structure was derived using local earthquake tomography. The simultaneous localisation of the registered earthquakes results also in a detailed picture of the distribution of seismicity in the area under investigation.

Within the framework of the ISSA 2000 experiment a seismological network with 62 seismographs was operated, covering the subduction zone from the coast to the backarc between 36° and 40° southern latitude. In a time span of 3 1/2 month 440 local earthquakes have been registered and were collected in the ISSA 2000 data catalogue.

P and S travel times of 150 selected, well localized earthquakes were used to invert for the 1-D velocity model and the hypocentral parameters. The velocity model was used as input model for the 3-D tomography. The hypocenters of the earthquakes show a $\sim 30^\circ$ dipping Wadati-Benioff zone with continuous seismicity until 120 km depth, which can be observed partly until 200 km depth. Both the general low seismicity in the area under investigation, the low depth extent of the Wadati-Benioff zone (especially when compared to the Central Andes) and the concentration of the intermediate depth seismicity in 60 km depth reflect most probably the influence of the young age and therefore high thermal state of the Nazca plate to the subduction regime. Crustal seismicity is concentrated in the forearc, north and south of the Arauco peninsula at the beginning of active fault zones (Bio-Bio and Gastre fault) and therewith in an area with highest uplift. Whereas the discontinuities can be observed until the Main Cordillera, their seismically active part is restricted to the forearc.

For the 3-D v_p tomography the gradual approach was used, i.e. as an intermediate step a 2-D model was calculated. This procedure ensures that in areas of low resolution the real structure is estimated better with a regional 2-D model. The evaluation of the solution quality was done

very carefully. Beside the standard parameter, like DWS, RDE and spread function, synthetic tests were executed. The combined estimation of the solution quality resulted in areas of good resolution beneath the Coastal Cordillera and the Longitudinal Valley until a depth of 100 km. Beneath the Main Cordillera the resolution is less and varies from north to south between 30 and 100 km depth. For the v_p/v_s ratio a 2-D model could be calculated.

The tomographic v_p model shows for the first time the velocity structure of the Southern Andes (Coastal Cordillera to Main Cordillera) until a depth of 100 km. It is mainly characterized by from east to west varying velocity anomalies. The downgoing Nazca plate is defined by the location of the earthquakes and characterized by high v_p velocities (7.2–8.3 km/s). The mean velocities in the continental crust are relatively high throughout the whole v_p model (5.5–6.5 km/s). The lower structures can be divided into three subregions.

Low v_p velocities in 30–50 km depth beneath the Coastal Cordillera and above the downgoing plate indicate a possible hydratization and serpentization of the continental mantle wedge. The concentration of earthquakes in 60 km depth, which can be attributed to dehydration processes within the subducted oceanic lithosphere, could be connected to the observed velocity anomaly. Mantle velocities are not observed in this area.

The area beneath the Longitudinal Valley shows a most prominent anomaly of increased v_p velocities, which can be observed in the whole area under investigation from north to south. Mantle velocities are reached here in 40 km depth.

Further east crustal thickness increases and reaches 50–55 km below the Main Cordillera and active volcanic arc. Low velocities, an increased v_p/v_s ratio and a zone of increased seismic attenuation which can be seen in the spectral analysis suggest the existence of partial melts and its possible attachment below the crust (magmatic underplating).

Resumen

Los Andes del Sur son parte del margen continental activo de Sudamérica, y tienen origen en una serie de procesos relacionados con la subducción. La cordillera andina se prolonga a lo largo de todo el continente sudamericano, y varía marcadamente en altura y espesor de la corteza continental. Mientras que los Andes centrales, están relativamente bien investigados, principalmente por parte del SFB 267, desde las estructuras profundas hasta el manto superior, es muy poco lo que se ha avanzado en las características geofísicas referidas al origen de los Andes australes. Por esta razón fue llevado a cabo el Proyecto de Investigación de los Andes del Sur ISSA 2000. En este trabajo, se realizó mediante el método de tomografía de sismos locales, un modelo tridimensional (3-D) de la estructura sismológica de velocidades. Al mismo tiempo, la localización de los sismos registrados, provee una detallada idea de la distribución de la sismicidad en el área de estudio.

En marco del experimento ISSA 2000, se instaló una red sismológica de 62 sismógrafos, con el objetivo principal de abarcar la zona de subducción desde la costa hasta el retro-arco entre 36° y 40° Sur. Durante tres meses y medio se registraron un total de 440 sismos locales, los cuales se encuentran en el catalogo de registros de ISSA 2000.

Los tiempos de recorrido de las ondas P- y S- de 150 sismos locales, de buena calidad de localización, fueron invertidos para el modelo de velocidad uni-dimensional (1-D) y el parámetro hipocentral. Los hipocentros de los sismos muestran una zona de Wadati-Benioff con una inclinación de $\sim 30^\circ$ y continuidad sísmica hasta los 120 km de profundidad; a partir de allí puede observarse esporádicamente hasta los 200 km de profundidad. Así mismo, la baja sismicidad general en el área de estudio, la poca (en comparación con los Andes centrales) extensión de la zona de Wadati-Benioff y la concentración de la sismicidad en profundidades medias (60 km), reflejan probablemente efectos relativos a la juventud y estado termal del régimen de subducción de la placa de Nazca. La sismicidad cortical se concentra en el antearco, al Norte y Sur de la península de Arauco, en cercanías al origen de los fallamientos de Bio-Bio y Gastre y con ella en la zona con mayor elevación del antearco. Si bien, las discontinuidades se prolongan desde el interior hasta la Cordillera Principal, su actividad sísmica esta concentrada en el antearco.

La tomografía 3-D de v_p se realizó a partir de una aproximación gradual, es decir, se efectuó

un modelo 2-D como paso intermedio. Estos pasos aseguraron una mejor interpretación de la estructura real a partir de un modelo regional de 2-D en zonas con poca definición. De esta manera se le dio mayor importancia a la interpretación en la calidad de definición. Además de los parámetros estándar como ser DWS, RDE y función *spread*, se realizó un Test sintético adicional. Las interpretaciones combinadas de la calidad de definición dieron como resultado, áreas de buena definición en la Cordillera de la Costa y Valle Longitudinal hasta una profundidad de 100 km. Por debajo de la Cordillera Principal, la definición va disminuyendo y varía de Norte a Sur entre 30–100 km de profundidad. Fue posible también, calcular un modelo 2-D para la relación v_p/v_s .

El modelo tomográfico v_p , muestra por primera vez la estructura de velocidades de los Andes australes (Cordilleras de la Costa y Principal) hasta una profundidad de 100 km, esencialmente enmarcado por anomalías en las velocidades de Este a Oeste. La placa de Nazca está definida por los sismos e identificada por una alta v_p (7,2–8,3 km/s). Las velocidades medias de la corteza continental son relativamente altas para el modelo v_p (5,5–6,5 km/s). La estructura profunda puede ser dividida en tres regiones.

Bajas velocidades v_p entre 30–50 km de profundidad, por debajo de la Cordillera de la Costa y por encima de la placa subductada, podrían indicar una hidratación y serpentización del manto continental. La concentración de sismos a los 60 km de profundidad, derivada de la deshidratación de la litosfera oceánica subductada, puede estar relacionada con las anomalías en las velocidades observadas. Las velocidades del manto no fueron observadas en esta región.

Por debajo del Valle Longitudinal, hay una marcada alta anomalía de velocidad v_p , que se extiende de Norte a Sur. Allí las velocidades del manto se observan a partir de los 40 km de profundidad.

Hacia el este, el espesor cortical aumenta, alcanzando 50–55 km por debajo de la Cordillera Principal y el arco volcánico activo. Velocidades bajas, una alta relación v_p/v_s y una zona de alta atenuación sísmica, determinada a partir de análisis espectral, pueden estar relacionadas con los procesos de fusión parcial y su posible disposición por debajo de la corteza (*magmatic underplating*).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
Resumen	5
1 Einleitung	9
2 Der aktive Kontinentalrand Südamerikas	13
2.1 Einführung	13
2.2 Die Seismizität und das Beben von 1960	19
2.3 Die Entstehung der Anden - ein Überblick	20
2.4 Regionale Geologie des Untersuchungsgebietes	21
2.5 Bisherige geophysikalische Studien in der Region	24
3 Das ISSA 2000-Experiment	31
3.1 Datengewinnung	31
3.2 Datenaufbereitung	33
4 Methode	41
4.1 Theoretische Grundlagen der LET	41
4.2 Der LET Algorithmus SIMULPS	44
4.3 Qualität der Lösung	46
4.4 Das Minimum 1-D Modell	49
5 Seismizität in den südlichen Anden	51
5.1 Das Minimum 1-D Modell der südlichen Anden	51

5.2	Das 1-D Geschwindigkeitsmodell	53
5.3	Seismizität	58
6	Lokale Erdbebentomographie	63
6.1	Inversionsverfahren	63
6.2	Auflösungsvermögen und synthetische Modelle	66
6.3	Ergebnisse	77
7	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	91
7.1	Seismizität	91
7.2	Tomographie-Modell	92
7.3	Vergleich mit den Zentralen Anden	98
7.4	Abschließende Bemerkungen und Ausblick	101
A	Stationsliste	115
B	Erdbebenkatalog	119
C	Teilnehmerliste	129
D	Veröffentlichungen	131
D.1	Papers	131
D.2	Tagungsbeiträge	131