

Schlussbericht

SO212 – TACO

Das Magnitude M=8.8 Chile Erdbeben vom 27 Februar 2010 – Seismologische Beobachtungen VOR und NACH dem Ereignis im Bereich des sub-marinen Schüttergebiets

1. Aufgabenstellung

Große Erdbeben mit Magnituden von $M_w=8+$ mit Bruchflächen von einigen hundert Quadratkilometern bedingen nach dem Hauptbeben zahllose kleinere Nachbeben (i. allg. $M_w<7$). Die möglichst genaue und umfassende Abbildung der Verteilung der Nachbeben und zeitliche Änderungen in der Nachbebenverteilung sind das Hauptziel der geplanten Untersuchungen. Diese Nachbeben spiegeln Spannungsänderungen im Bereich der Bruchfläche wieder. Generell zeichnen die Nachbeben die Bruchfläche nach. Desweiteren bedingen Bereiche großer Verschiebung Spannungsänderungen an den Rändern dieser Zonen, sodass Nachbeben bevorzugt in Bereichen der Bruchfläche auftreten, wo die Verschiebung während des Hauptbebens relativ gering war. Eine genaue Abbildung der Nachbebenverteilung und ihre Entwicklung durch „Raum und Zeit“ spiegeln somit wichtige Informationen über die Bruchdynamik und Spannungsverteilung sowie Änderungen im Spannungszustand in der Bruchfläche wieder.

Wie nach dem großen $M_w=9.1$ Sumatra Beben vom 26. Dezember 2004 und den folgenden Sumatra Beben vom 28. März 2005 ($M_w=8.6$) und 12. September 2007 ($M_w=8.4$) sind mehrere Arbeitsgruppen aus Europa und Nordamerika mit ihren „*Task Forces*“ dabei, die Nachbebenaktivität in Raum und Zeit zu registrieren. Im Fall von Sumatra konnten zahlreiche vorgelagerte Inseln (sog. Fore-Arc Inseln) dafür genutzt werden, die auftretenden Nachbeben mit Landstationen in ihrer räumlichen Verteilung zufrieden stellend genau zu registrieren. Eine zufriedenstellende Bestimmung der Herdtiefe der Nachbeben benötigte jedoch zwingend die Auslage von Ozean-Boden-Seismometern (OBS) am Meeresgrund. Im Falle des Bebens in Chile von Samstag den 27. Februar 2010 lag das Epizentrum etwa im Zentrum des Schüttergebiets bei $35.85^\circ\text{S} / 72.72^\circ\text{W}$, ca. 100 km nördlich von Concepcion (Abbildung 1), in einer Tiefe von ca. 30 km. Das Epizentrum lag dabei nahezu exakt unter der Küstenlinie und der Bruch breitete sich seewärts aus. Die nun primär geplante Aufstellung von seismischen Stationen an Land (u.a. Task Force GFZ Potsdam) findet somit landwärts der Region statt, welche durch das Beben besonders betroffen war. Die Verteilung der global aufgezeichneten Nachbeben stützt diese These, da ca. drei Viertel der Ereignisse seewärts der Küstenlinie lokalisiert wurden (Abbildung 2). Um die Lage der Nachbeben zu bestimmen, sowie um auch kleine und kleinste Nachbeben zu registrieren, ist es notwendig, seismische Stationen oberhalb der Bruchfläche auszulegen. Die einzige Möglichkeit in diese Region vorzudringen ist die Auslage von Ozean-Boden-Seismometern. Die Registrierung am Meeresboden über der Bruchfläche bringt zudem den entscheidenden Vorteil mit sich, dass

die Relokalisierung der Bebenherde aus allen, also auch den landgestützten verfügbaren Daten mit viel höherer Präzision erfolgen kann.

2.) Voraussetzungen

Die für das Vorhaben notwendigen seismologischen Daten wurden während der Reisen SO209b und SO212 gewonnen, wobei ein Netzwerk von Ozean-Boden-Seismometern (OBS) zur Überwachung der lokalen Erdbebenaktivität auf der Fahrt SO209b ausgelegt und auf SO212 aufgenommen wurden.

3.) Planung und Ablauf

Die Arbeiten des Vorhabens TACO begannen mit der Auslage eines seismischen Netzwerks von 30 Langzeit-OBS auf der Reise SO209b. Auf der Reise SO212 wurden diese erfolgreich geborgen. Zusätzlich wurden stets bathymetrische Messungen durchgeführt.

4.) Wissenschaftlich-technischer Stand

Der wissenschaftlich-technische Stand wurde im Antrag zu dem Vorhaben ausführlich beschrieben.

5.) Zusammenarbeit

Während der Laufzeit des Projekts gab es eine stetige und fruchtbare Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Universität Santiago de Chile. Diese stellte auch für beide Fahrtabschnitte Personal zur Verfügung. Die Zusammenarbeit war hervorragend und wird auch über die Projektlaufzeit hinaus fortgesetzt.

6. Wissenschaftliche-technische Ergebnisse

Eine erste Analyse hat ergeben, dass ca. 2500 Erdbeben registriert wurden (Abbildung 1). Die weitere Auswertung wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert, hier wurde zusammen mit Kollegen, die zeitgleich Landmessungen durchgeführt haben, ein Bündelantrag eingereicht und zum Sommer 2011 bewilligt.

Danksagung

Wir danken Kapitän Lutz Mallon und der Mannschaft des FS *Sonne* für die exzellente Zusammenarbeit auf See und das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung für die Finanzierung unserer Arbeiten.

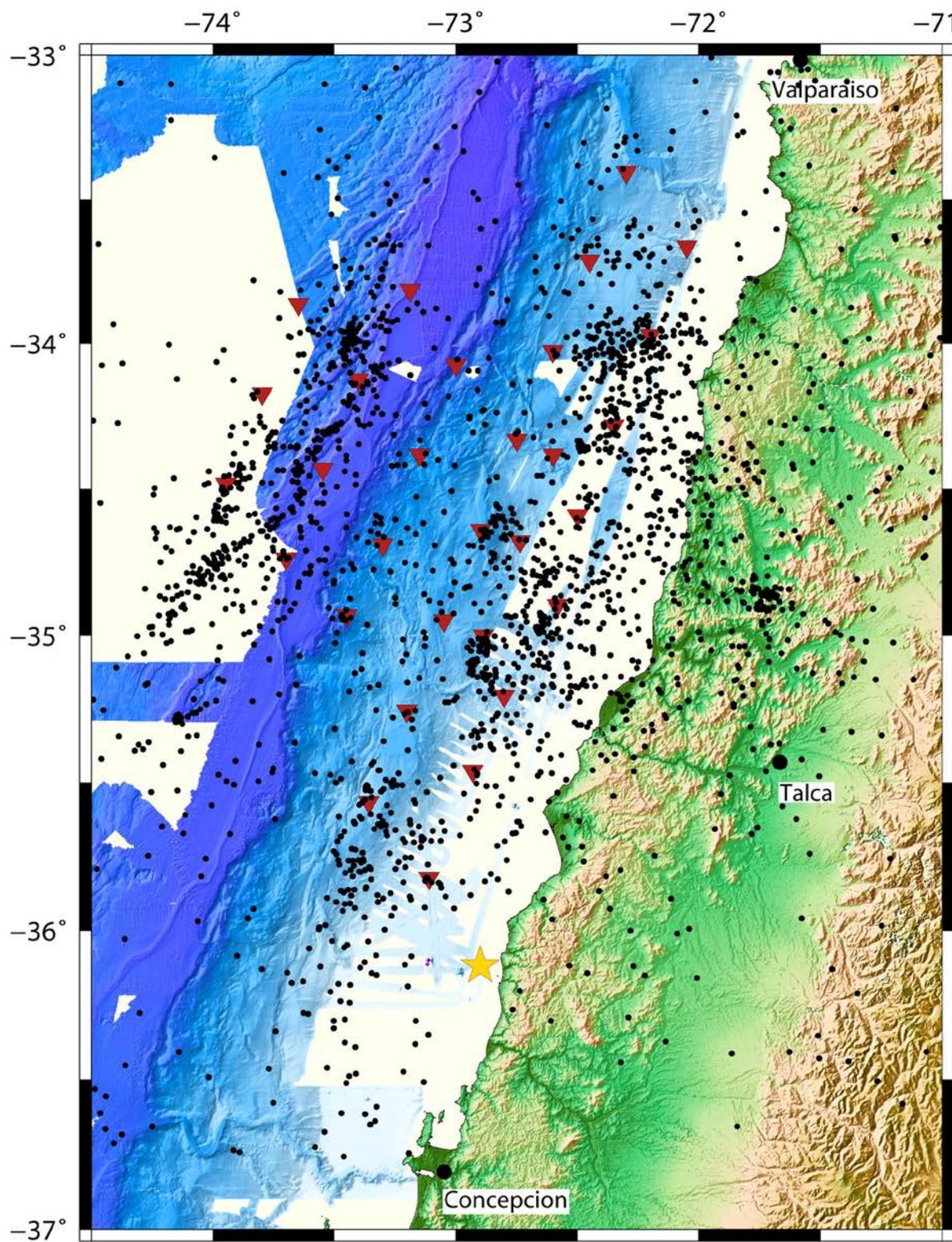


Abbildung 1

Anlage 6.1, Abstract für das Sonne Statusseminar 2011

Nachbebenaktivität des M8.8 Chile Seebebens vom 27 Februar 2010 abgeleitet aus Ozean-Boden-Seismometer-Daten: Datenqualität und erste Ergebnisse der SONNE-Reisen SO209/2 und SO212

Ingo Grevemeyer¹, Ernst R. Flueh¹, Anke Dannowski¹, Marten Lefeldt¹, Wiebke Leuchters¹, Stefan Möller¹, Jan H. Behrmann¹, Sergio Barrientos², Diana Comte², Eduardo Contreras², Emilio Vera²

¹ Leibniz Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, Kiel

² DGF, Universidad de Chile, Santiago, Chile

Am 27. Februar 2010 ereignete sich in Central Chile das zweitgrößte Erdbeben des 21. Jahrhunderts. Mit einer Magnitude von $M_w=8.8$ ist es das fünftgrößte jemals instrumentell aufgezeichnete Erdbeben (USGS Katalog) und hat 50 Jahre nach dem größten jemals aufgezeichneten Beben weltweit die Region unmittelbar nördlich des Chile Bebens von 1960 getroffen. Die Zone der durch global verteilte seismologische Stationen aufgezeichneten Nachbeben umfasst dabei eine Länge von ca. 600 km und reicht von $38^{\circ}30'S$ bis $33^{\circ}S$. Das Schüttergebiet liegt damit in der in Chile am dichtesten besiedelten Region und hat vor allem die zweitgrößte chilenische Stadt Concepcion zu großen Teilen zerstört. Selbst die am nordöstlichen Ende der Schütterfläche gelegene Hauptstadt Santiago de Chile wurde betroffen, sodass der Flughafen der Hauptstadt für ca. 1 Woche geschlossen werden musste. Die Region zwischen der Hafen Stadt Talcahuano ($36.71^{\circ}S / 73.11^{\circ}W$) und dem Küstenort Pichilemu ($34.38^{\circ}S / 72.01^{\circ}W$) wurde dabei durch einen Tsunami mit Wellenhöhen zwischen 4 m und 2 m zerstört. Das letzte vergleichbare Erdbeben in dieser Region fand im Jahre 1835 statt. Generell ist entlang des chilenischen Kontinentalrand bei einer Konvergenzrate von ca. 6 cm/Jahr mit entsprechend große Erdbeben entlang eines bestimmten Segments in Abständen von 70-150 Jahren zu rechnen.

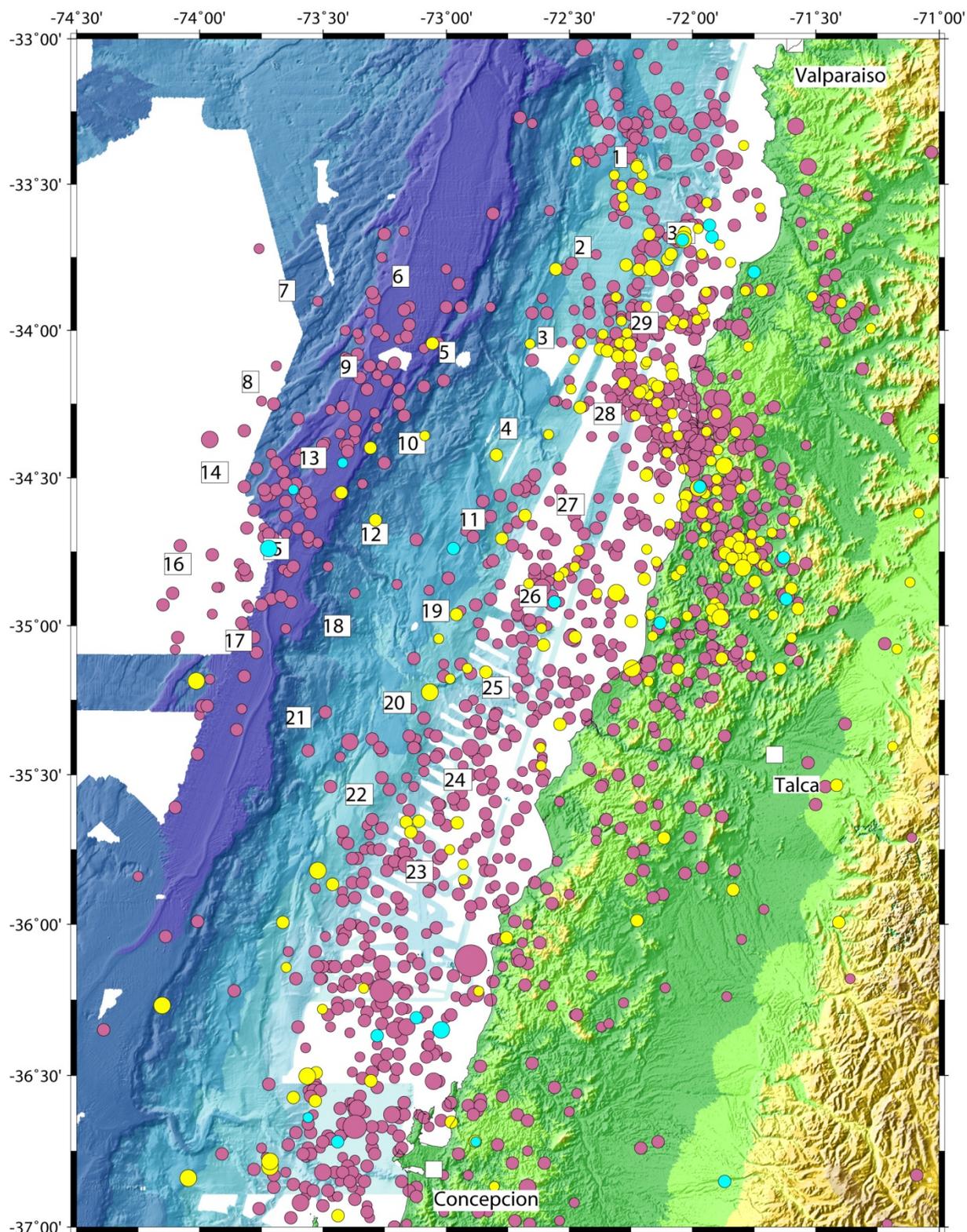


Abbildung: Karte der Nachbebenaktivität in Chile nach dem $M_w=8.8$ Beben vom 27. Februar 2010 (violett: Nachbeben USGS 27/02/2010-31/03/2010; hell-bau: USGS 20/09/2010-11/11/2010; gelb: DGF/Chilenischer Seismologischer Dienst Nachbeben 20/09/2010-11/11/2010; Rechtecktecke mit Zahlen: OBS-Netzwerk – Einsatz Zeit: 20/09/2010 bis 25/12/2010)

Große Erdbeben mit Magnituden von $M_w=8+$ mit Bruchflächen von einigen hundert Quadratkilometern bedingen nach dem Hauptbeben zahllose kleinere Nachbeben (i. allg. $M_w<7$). Generell zeichnen die Nachbeben die Bruchfläche nach. Desweiteren bedingen Bereiche großer Verschiebung Spannungsänderungen an den Rändern dieser Zonen, sodass Nachbeben bevorzugt in Bereichen der Bruchfläche auftreten, wo die Verschiebung während des Hauptbebens relativ gering war. Eine genaue Abbildung der Nachbebenverteilung und ihre Entwicklung durch „Raum und Zeit“ spiegeln somit wichtige Informationen über die Bruchdynamik und Spannungsverteilung sowie Änderungen im Spannungszustand in der Bruchfläche wieder. Die möglichst genaue und umfassende Abbildung der Verteilung der Nachbeben und zeitliche Änderungen in der Nachbebenverteilung waren das Hauptziel des Vorhabens TACO. Zu diesem Ziel wurden auf der Reise SO209/2 im September 2010 ein Netzwerk von 30 Ozean-Boden-Seismometern (OBS) in der Region zwischen 36°S und $33^\circ30'\text{S}$ ausgelegt. Die Instrumente wurden während der Reise SO212 über Weihnachten 2010 nach ca. 3 Monaten kontinuierlicher Datenakquisition geborgen.

Anlage 6.2, Abstract fuer die EUG Tagung Wien 2011

Rupture zone of the Mw=8.8 2010 Maule earthquake constrained by aftershock seismicity and teleseismic moment tensor inversion of large aftershocks

Grevenmeyer, I. (1), E.R. Flueh (1), I. Arroyo (1), A. Dannowski (1), and TACO cruises participants

(1) Leibniz Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, Wischhofstrasse 1-3, 24148 Kiel, Germany;
Email: igrevenmeyer@ifm-geomar.de

On 27 February 2010, a Mw=8.8 earthquake occurred in south central Chile to the north of the Great Mw=9.5 Valdivia earthquake of 1960, hitting the Chilean Maule and Bio-Bio districts, including the towns of Concepción and Constitución. Rupture spread bilaterally, affecting a 500-600 km long portion of the Chilean margin between the Arauco Peninsula and Valparaíso and hence spread into the nucleation area of the Valdivia earthquake and re-ruptured the Talca segment that broke last in 1928. Here we use constraints from aftershocks to survey the rupture area of the Maule earthquake, including first results from a 3 month deployment of 30 ocean-bottom-seismometers recording local aftershocks offshore of the Maule district between 20 September 2010 and 25 December 2011. Seaward co-seismic rupture, approximated by the aftershock distribution, stopped about 20-40 km landward of the trench in an area characterised by water-rich sediments and temperatures of 100°-150°C and hence velocity strengthening aseismic behaviour. Teleseismic waveform inversion of body-waves from large aftershocks was used to provide additional constraint on the geometry of the rupture zone. Large events (Mw>5.8) with thrust mechanisms associated with the rupture zone occurred under the shelf break at 20 km depth, near the epicentre of the mainshock at a depth of 27 km, and near the down-dip limit of the seismogenic zone at 49 km depth. The two largest aftershocks of Mw=6.9 and 7.0, however, occurred near the town of Pichilemu in the upper plate. Mechanisms and aftershock distribution indicates a major tensional upper plate fault system, striking at ~145°-155°. The fact that the clustered activity occurred above a major slip patch of the mainshock may suggest that aftershocks were triggered by static stress changes caused by the mainshock. Shallow normal faulting activity occurred seaward of the trench, indicating that unlocking of the seismogenic zone transferred stresses into the trench-outer rise.

Anlage 6.3 Poster auf der DGG Tagung 2012

Hypocenter determination of aftershocks of the Maule earthquake (Mw=8.8) on 27 February 2010 with automatically picked P waves on OBSs

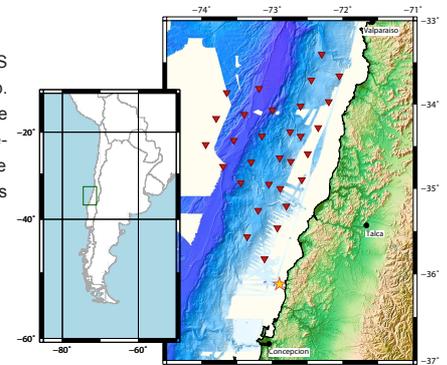
Kathrin Lieser, Ingo Grevenmeyer, Ernst Flüh

Introduction

The Chilean subduction zone is among the seismic most active fault zones in the world where most coastal ranges suffered from a magnitude 8 or larger earthquake in the last 150 years. The Constitución-Concepción segment in central Chile between ~35.5°S and 37°S was considered to be a mature seismic gap, rupturing last in 1835 and being seismically quiet without any magnitude 4.5 or larger earthquakes reported in global catalogues. It is located to the north of the nucleation area of the 1960 magnitude 9.5 Valdivia earthquake and to the south of the 1928 magnitude 8 Talca earthquake. On 27 February 2010 this segment ruptured in a Mw=8.8 earthquake, nucleating near 36°S and

affecting a 500-600 km long segment of the margin between 34°S and 38.5°S that is roughly three times larger than the seismic gap. Aftershocks occurred along a roughly 600 km long portion of the central Chilean margin, most of them appearing offshore. Therefore, a network of 30 ocean-bottom-seismometers for a three month period was deployed recording local offshore aftershocks between 20 September 2010 and 25 December 2010 (Fig. 1).

Figure 1: Map of the 30 ocean-bottom-seismometers offshore Talca (red triangles). The yellow star marks the NEIC-hypocentre of the main shock on February 27th, 2010.



Automated Picking with the MPX picking engine

To automatically detect P wave onsets the MPX Picking System by F. Aldersons was used (Fig.2). MPX is mainly used for repicking known events and therefore requires an initial pick (e.g. a routine pick or predicted pick). In order to get this initial pick the events were triggered a second time after triggering the events themselves with REFTRIG. This has the advantage of being independent on an unknown velocity model but due to spikes and noise in the seismograms there are some wrong triggered signals which have to be eliminated

before localising the events. MPX is also able to automatically determine the quality of a picked onset with the help of waveform characteristics (signal-to-noise ratio etc). Therefore the system is calibrated by a hand-picked reference data set with 1137 P wave onsets on vertical and hydrophone components (Fig.3) of earthquakes with hypocenters inside as well as outside the network since the system also has to work properly later for the stations on land. The best weighting scheme had the following error asses-

ments: quality 1 = 0.07 s, 2 = 0.12 s, 3 = 0.25 s.

With a second reference data set consisting only of earthquakes inside the network differences between automated locations and manually picked events were calculated and lead to the following standard deviations: ~5 km in depth and longitude and ~3 km in latitude.

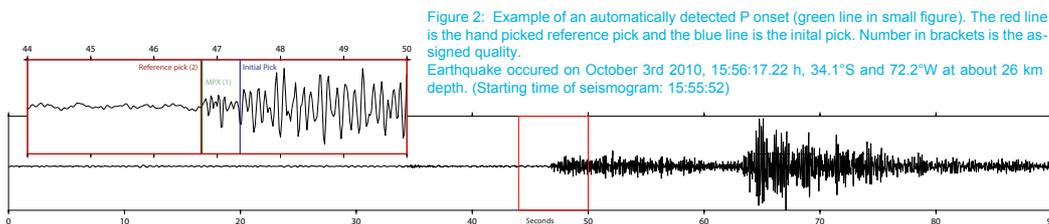


Figure 2: Example of an automatically detected P onset (green line in small figure). The red line is the hand picked reference pick and the blue line is the initial pick. Number in brackets is the assigned quality. Earthquake occurred on October 3rd 2010, 15:56:17.22 h, 34.1°S and 72.2°W at about 26 km depth. (Starting time of seismogram: 15:55:52)

		MPX				Total	
		1	2	3	4		
"True Weight"	1	Number	500	143	39	27	709
	% in "True Weight" of Total	70.5%	20.2%	5.5%	3.8%	100.0%	
2	Number	40	114	44	39	237	
	% in "True Weight" of Total	16.9%	48.1%	18.6%	16.5%	100.0%	
3	Number	18	41	50	31	140	
	% in "True Weight" of Total	12.9%	29.3%	35.7%	22.1%	100.0%	
4	Number	6	6	8	29	51	
	% in "True Weight" of Total	11.8%	15.7%	15.7%	56.9%	100.0%	
Total	Number	564	306	141	128	1137	
	% in "True Weight" of Total	49.6%	26.9%	12.4%	11.1%	100.0%	

Figure 3: Cross-classified table of quality classes assigned by MPX and of reference data set. "True Weight" consists of the hand picked quality and the deviation of the MPX pick to the reference pick. 100 % in the diagonal fields (yellow) would be optimal.

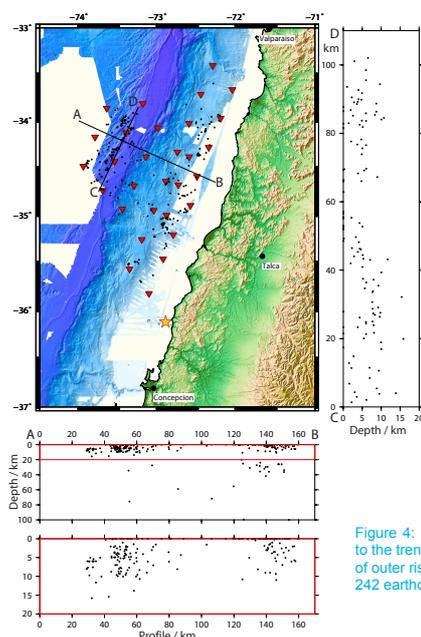


Figure 4: Profiles perpendicular and parallel to the trench. The parallel profile consists only of outer rise earthquakes. 242 earthquakes are plotted.

Results

For a first hypocenter determination the NonLinLoc software by A. Lomax was used with a 1D velocity model for the outer rise. 3024 events were triggered in the time of the OBS deployment. 2382 earthquakes could be located of which 644 lay inside the network and had an RMS of residuals smaller than 1 s. In Figure 4 those earthquakes are plotted which also had a confidence ellipsoid semi-axis smaller than 25 km (242 earthquakes).

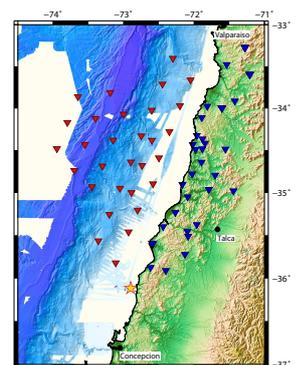
Figure 4 shows two vertical profiles perpendicular and parallel to the trench. The perpendicular profile consists of all earthquakes in the network while on the parallel one only the earthquakes in the outer rise are projected.

Outlook

To get more information on the subducting slab 44 landstations of the GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) are included into the network (Fig. 5).

The S wave onsets and a 2D velocity model valid for the whole network will be determined which will improve the depth resolution.

Figure 5: Map of the 30 ocean-bottom-seismometers offshore Talca (red triangles) and the landstations of the GFZ Potsdam (blue triangles). The yellow star marks the NEIC-hypocentre of the main shock on February 27th, 2010.



Acknowledgements:

The marine efforts were funded by the German Government through the grant 03G0212A. Data analysis is funded by the German Science Foundation (DFG) through the grant GR1964/14-1.

Contact: klieser@geomar.de

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel FS SONNE Fahrtbericht SO212 - Taco	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Ingo Grevemeyer, Ernst R. Flüh & Fahrtteilnehmer	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2011
	6. Veröffentlichungsdatum März 2012
	7. Form der Publikation Fahrtbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel GEOMAR Wischhofstraße 1-3 24148 Kiel Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 03G0212A
	11. Seitenzahl 37
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 38
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 12
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Während der Reise SO212 barg das Deutsche Forschungsschiff <i>Sonne</i> insgesamt 30 Ozeanbodenseismometer vor der chilenischen Küste, die dort über einen Zeitraum von 3.5 Monaten die Seismizität im Bebengebiet des Maule Erdbebens (10.2.2010, Mw=8.8) aufzeichnen sollten. Alle Geräte hatten erfolgreich Daten registriert, lediglich zwei Geräte hatten die Speicherung vorzeitig beendet.. Eine erste Analyse der aufgezeichneten Daten hat ergeben, dass ca. 2500 Ereignisse im Bereich des Netzwerkes mit ausreichender Qualität und Stationserkennung aufgezeichnet werden konnten.	
19. Schlagwörter Ostpazifik, Chile, Maule, Subduktion, Erdbeben.	
20. Verlag GEOMAR	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title FS SONNE Cruise Report SO212 -TACO	
4. author(s) (family name, first name(s)) Ingo Grevemeyer, Ernst R. Flüh & cruise participants	5. end of project december 2011
	6. publication date march 2012
	7. form of publication Cruise Report
8. performing organization(s) (name, address) Helmholtz Center for Ocean Research Kiel GEOMAR Wischhofstraße 1-3 24148 Kiel Germany	9. originator's report no. -
	10. reference no. 03G0212A
	11. no. of pages 37
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 38
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 12
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract During cruise SO212 –Taco the German Research Vessel RV SONNE collected altogether 30 ocean-bottom-seismometers (OBS) along the Chilean coast. These had been recording the natural seismicity in the area of the Maule earthquake (10..2.2010, Mw=8.8) for 3.5 months. All instruments had recorded those earthquakes, only two of them stopped recording before their recovery. A first analysis of the data showed that about 2500 earthquakes within the network were registered with good quality at a sufficient number of stations.	
19. keywords Eastern Pacific, Maule, Chile seamount subduction, earthquakes.	
20. publisher GEOMAR	21. price -