

Das Knacken, Knistern und Knirschen beim Verschlucken einer kalten Platte

Das IPOC-Observatorium überwacht seit zehn Jahren die Subduktionszone in Nordchile

Bernd Schurr¹, Heidrun Kopp², Günter Asch¹, Frederik Tilmann¹, Onno Oncken¹

¹Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

²GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

The Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC) in northern Chile has been monitoring the largest seismic gap along the South American subduction zone for 10 years. When IPOC was initiated, it has been 130 years the last great earthquake in the region had occurred. And since then the Iquique gap had been accumulating a slip deficit along a >500 km segment of the plate boundary. Since IPOC's inception two large events, the 2007 M 7.7 Tocopilla and the M 8.1 2014 Iquique earthquakes, have broken parts of the gap. Both events were well recorded by IPOC, produce valuable data and advance our understanding of the subduction megathrust earthquake cycle. Last year, the Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR) has been extending IPOC with the GeoSEA ocean bottom observatory. In this ambitious project deformation will be measured where it cannot be picked up by land-based instruments, i. e. far offshore near the subduction trench. This will open the crucial updip section of the subduction plate boundary to research. IPOC has thus demonstrated the necessity of long-term monitoring to observe slow or rare events, but also that tenacity and patience pay off.



Subduktionszonen mit ihren spektakulären Vulkangürteln, tiefsten Ozeangraben und den stärksten und tiefsten Erdbeben sind eindrucksvolle Belege für die Theorie der Platten-tettonik. An Subduktionszonen sinken kalte und schwere ozeanische Platten in den Erdmantel und treiben so die Konvektionszellen an, die der Motor für die Kontinentverschiebungen sind. Die durch den Subduktionsvulkanismus gebildeten Gesteine sind der wichtigste Beitrag zur Entstehung kontinentaler Kruste. Die hier in den Erdmantel eingetragenen Volatile und seltenen Elemente prägen langfristig dessen Gesamtzusammensetzung und die in Folge der Fluidzirkulation ausgefallten Minerale sind eine wichtige Quelle für Bodenschätze, in Chile insbesondere für die großen Kupferlagerstätten.

So ist es nicht überraschend, dass Subduktionszonen zu den wichtigen Untersuchungsobjekten der Geowissenschaften gehören. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ erforscht seit mehr als 20 Jahren die Subduktionszone entlang der zentralen und südlichen Anden in Südamerika (Oncken, 2016). Dabei hat sich über die Zeit der Fokus von den Anden selbst und den tiefen Prozessen, die zu Vulkanismus und Gebirgsbildung beitragen, zu den flacheren, seewärts gelegenen Bereichen verschoben, wo die stärksten Erdbeben auftreten. Besonders Chile bietet mit seiner sich über tausende von Kilometern erstreckenden und unterschiedliche tektonische und klimatische Zonen überspannenden Küstenlinie ein ideales natürliches Labor, um die Prozesse, die das Auftreten von starken Erdbeben steuern, zu untersuchen. Vor Chile schiebt sich der südamerikanische Kontinent über die ozeanische Nazca-Platte entlang einer Megaüberschiebung. Hierbei verhaken sich zwei Platten in relativ seichten Tiefen, wo die Gesteine noch kalt und spröde sind. Die südamerikanische Megaüberschiebung bricht meist in mehrere hundert Kilometer langen Segmenten und erzeugt so regelmäßig Erdbeben mit Magnitu-

den > 8 (Abb. 1). Allein in den letzten sechs Jahren gab es drei solcher Ereignisse in Chile. Da die ozeanische Platte gleichmäßig mit mehreren Zentimetern pro Jahr in den Erdmantel taucht, können so über Jahrzehnte viele Meter Versatz aufgestaut werden, die sich plötzlich in Erdbeben entladen. Das Aufstauen und Entladen ist ein einigermaßen regelmäßiger Vorgang. Wird er über lange Zeiträume beobachtet, können jene Segmente identifiziert werden, die seit langem nicht gebrochen sind und an denen sich wahrscheinlich eine hohe Spannung zwischen den Platten aufgebaut hat. Diese Bereiche weisen eine hohe Wahrscheinlichkeit für ein großes Erdbeben auf und werden als seismische Lücken bezeichnet. Möchte man die Entstehung eines großen Erdbebens möglichst aus der Nähe beobachten, bieten sich solche Stellen an. Der Norden Chiles wies bis vor kurzem eine der am längsten bestehenden seismischen Lücken auf (Abb. 1). Ein über 500 km langes Stück, das sich von der markanten Mejillones-Halbinsel bis in den Süden Perus erstreckt, zerbrach das letzte Mal 1877 in einem Erdbeben mit einer wahrscheinlichen Magnitude von etwa 9. Der durch das Beben ausgelöste Tsunami verwüstete weite Teile der Küste.

In Erwartung des nächsten großen Erdbebens wurde 2006 mit dem Aufbau des *Integrated Plate Boundary Observatory Chile* (IPOC) begonnen (Victor et al., 2011). IPOC besteht heute unter anderem aus 20 Multiparameterstationen, die in deutsch-französisch-chilenischer Zusammenarbeit betrieben werden (Abb. 1). Die als erste aufgebauten neun Stationen liefern seit mehr als zehn Jahren kontinuierlich hochwertige Daten. An den Multiparameterstationen werden schnelle (durch Seismometer) und langsame (durch kontinuierliches GPS) Bodenbewegungen, die Leitfähigkeit im Untergrund (durch elektrische Sonden und ein Magnetometer) und klimatische Parameter (durch eine Wetterstation) gemessen (Victor et al., 2011). Solche langfristigen Beobachtungen sind wichtig, um z. B. das extrem langsame elastische Zusammenstauchen der Oberplatte zu beobachten, das großen Erdbeben vorangeht (Moreno et al., 2016). Geduld und Ausdauer sind auch notwendig, um eines der seltenen großen Erdbeben zu erfassen, und hört man den Geräuschen im Erdinnern lange genug zu, tauchen auch jene Strukturen in den seismischen Daten auf, an denen nur relativ selten Erdbeben auftreten. Im Rahmen von IPOC werden zudem krustale Verwerfungen mit Extensometern (Victor et al., 2016) und Vulkane mit speziellen Observatorien überwacht.

Links: Eingang zur Erde. IPOC-Multiparameterstation PB17 in Chile. Die hochsensiblen Seismometer stehen hinter der Eisentür in einer in den Fels gesprengten Höhle. Im Hintergrund der Vulkan Ollagüe (Foto: B. Schurr, GFZ)

Left: Entrance to Earth. IPOC multi-parameter station PB17 in Chile. Behind the iron door, in a cave blasted into the rock, highly sensitive seismometers record the slightest ground movements. Ollagüe volcano in the background



Kontakt: B. Schurr
(schurr@gfz-potsdam.de)

Wo es hakt – die seismische Koppelzone

Die Installation von IPOC geschah zur rechten Zeit: In den ersten acht Jahren sind bereits die zwei größten Erdbeben in der fast 140jährigen Geschichte der seismischen Lücke aufgezeichnet worden – 2007 das Tocopilla-Beben (M 7,7; Schurr et al., 2012) und 2014 das Iquique-Erdbeben (M 8,1; Abb. 1;

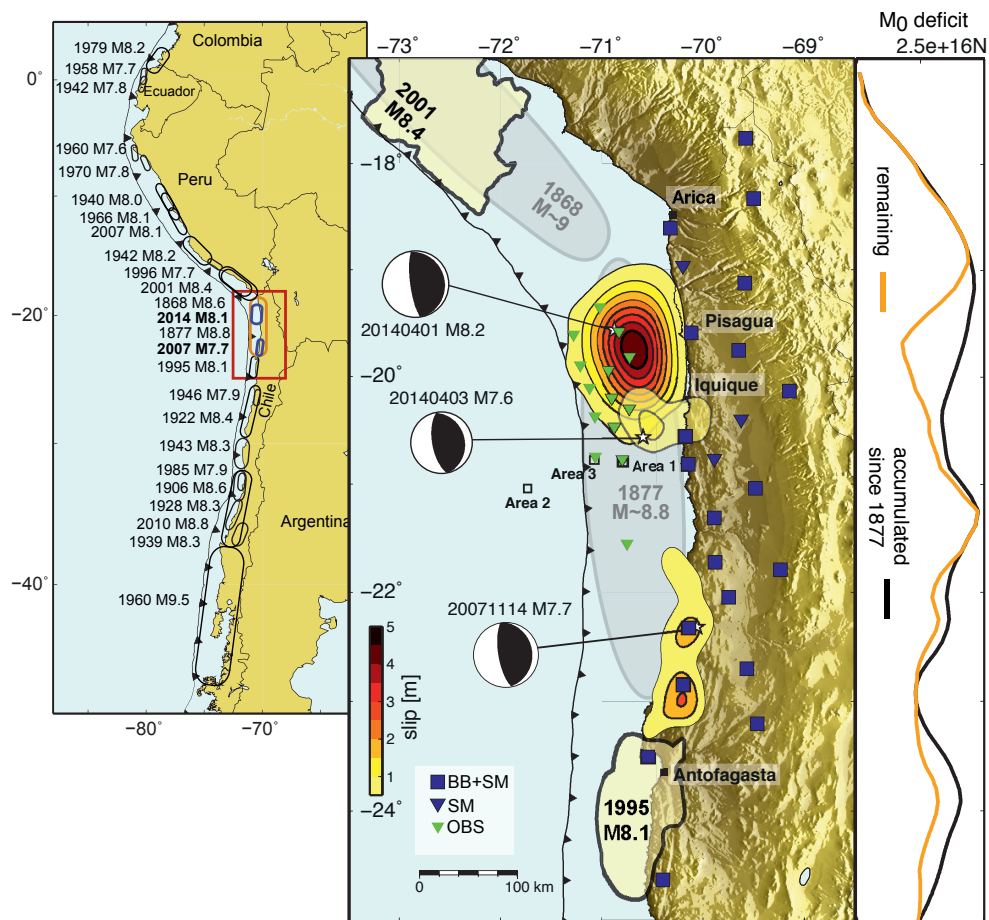


Abb. 1: Links: Große Erdbeben entlang der südamerikanischen Subduktionszone in den letzten 150 Jahren. Mitte: Karte des Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC); blaue Symbole markieren die Lage der Seismometer (BB= Broad Band, SM = Strong Motion). Ebenfalls dargestellt sind die Verteilungen des Versatzes der Erdbeben 1995, 2001, 2007 und 2014 (farbige Flächen), sowie die geschätzten Bruchdimensionen der großen Erdbeben aus dem vorletzten Jahrhundert (graue Flächen). Grüne Dreiecke markieren die Ozeanbodenseismometer (OBS; siehe Abb. 5). Rechts: Geschätztes Defizit des seismischen Moments vor und nach dem Iquique-Beben 2014 (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 1: Left: Large earthquakes along the South American subduction zone in the last 150 years. Centre: Map of the IPOC stations (blue symbols). Slip distributions of large earthquakes from 1995, 2001, 2007, and 2014 are also plotted (colored regions). Rupture zones of the 1886 and 1877 events are estimated (grey regions). Inverted green triangles mark OBS locations (see Fig. 5 for detail). Right: Estimated seismic moment deficit before and after the 2014 event

Schurr et al., 2014, Tilmann et al., 2016). Diese haben zu wichtigen Erkenntnissen über Subduktionserdbeben in Chile und auch allgemein geführt. In Subduktionszonen treten die größten Erdbeben entlang der seismischen Koppelzone, oder auch seismogenen Zone, auf. Das ist der Bereich, in dem sich die Platten beim Übereinanderschleiben verhaken und in Erdbeben wieder lösen. Ob die Platten haften oder gleiten, hängt von den Reibungseigenschaften der Kontaktflächen ab.

Das empirische Standardmodell der Subduktionsüberschiebung geht davon aus, dass die Platten in den obersten ungefähr zehn Kilometern aseismisch aneinander vorbeigleiten. Dies geschieht wahrscheinlich, weil durch das Auspressen des in den verschluckten Sedimenten enthaltenen Wassers sehr

hohe Drücke in der Verwerfungszone herrschen. Zudem fördern die bei niedrigen Temperaturen vorhandenen Tonminerale stabiles Gleiten. In etwas größeren Tiefen, wenn der größte Teil des ungebundenen Wassers entwichen ist und die Tonminerale bei höheren Drücken und Temperaturen umgewandelt wurden, beginnen die Platten zu haften, bevor sie in 40 bis 50 km Tiefe wieder gleiten. Der tiefere Übergang von Haften zu Gleiten, so das Modell, ist entweder temperaturbedingt, wenn bei etwa 350 °C Quarzminerale beginnen sich duktil zu verformen, oder aber setzt dann ein, wenn die ozeanische Platte mit dem Erdmantel in Kontakt tritt. Das Tohoku-Erdbeben 2011 in Japan (M₉) zeigte allerdings deutliche Abweichungen von diesem Modell. Hier trat der größte Versatz unweit des Tiefseegrabens in Tiefen auf, wo die Platte eigentlich hätte gleiten sollen.

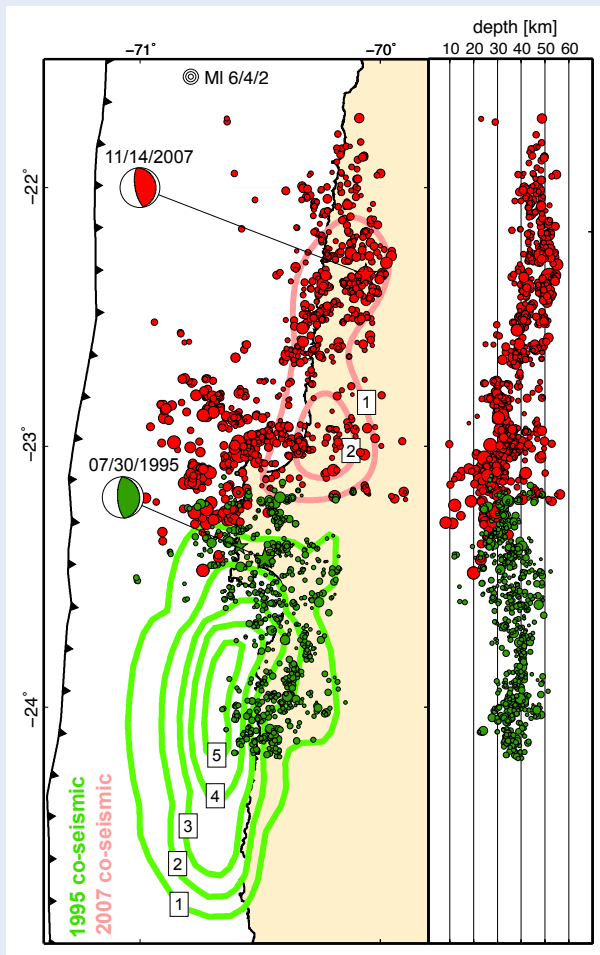


Abb. 2: Versatzkonturen (in Meter) und Nachbeben der Erdbeben von Antofagasta 1995 (grün) und Tocopilla 2007 (rot). Rechts: Tiefensektion entlang der geografischen Breite. Beide Nachbebenserien sind spiegelsymmetrisch relativ zur Mejillones-Halbinsel, obwohl sich der Versatz der Hauptbeben stark unterscheidet. (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 2: Slip contours (in metre) and aftershocks (filled circles) of the M 8.1 1995 Antofagasta (green) and M 7.7 2007 Tocopilla earthquakes (red). On the right, a latitudinal cross section through the seismicity is shown. Both aftershock sequences show surprising symmetry across the centre of the Mejillones Peninsula, despite having different slip patterns.

Auch das Verhalten im tieferen Bereich der seismogenen Zone ist vielseitiger und komplexer als im einfachen Modell. Als Schurr et al. (2012) die Nachbeben des Tocopilla-Erdbebens (2007) mit denen des benachbarten Antofagasta-Erdbebens (1995) verglichen, ergab sich eine überraschende Symmetrie. Bei beiden traten die Nachbeben entlang eines schmalen Streifens im tiefsten Bereich der Koppelzone auf, obwohl sich die Hauptbrüche der beiden Erdbeben deutlich unterschieden (Abb. 2). Das Antofagasta-Beben zeigte den größten Versatz unterseisch, was für große Subduktionserdbeben in Südamerika typisch ist, während das Tocopilla-Erdbeben auf das untere Ende der Koppelzone, das in Chile unter Land liegt, begrenzt war. Die Autoren schlossen daraus, dass sich die Reibungseigenschaften des flacheren, marinen Bereichs von

der tieferen Zone unter Land unterscheiden und der tiefere Bereich besondere Voraussetzungen für das Auftreten von kleineren und mittleren Erdbeben bietet. Jener tiefere Bereich strahlt auch während des Hauptbebenbruchs die meiste hochfrequente seismische Energie ab (Tilmann et al., 2016). Dies hängt wahrscheinlich mit kleinräumig variierenden Reibungseigenschaften zusammen, die auch das Auftreten der Nachbeben förderten. Diese tiefe Zone mit ihren besonderen Eigenschaften ist inzwischen auch an sehr vielen anderen Subduktionszonen beobachtet worden. Dass in Südamerika diese Zone unter Land ist und die Hauptkoppelzone, die die größten Erdbeben erzeugt, unter See und beide also durch die Küstenlinie getrennt sind, ist wohl kein Zufall: Viel mehr ist es wahrscheinlich so, dass die unterschiedlichen Reibungseigenschaften entlang der Kontaktfläche langfristig die Verformung der Oberplatte beeinflussen und so zur Hebung der Küste führen.

So war es auch keine Überraschung, dass das große Iquique-Erdbeben (M 8,1) auf der Seeseite der Koppelzone auftrat (Abb. 1). Ungewöhnlich war allerdings, dass es sich zwei Wochen lang mit einer Vorbebenserie ankündigte (Schurr et al., 2014; Bedford et al., 2016). Mit der IPOC-Instrumentierung konnten der langfristige Spannungsaufbau, die Vorbebenserie und der Bruch des Hauptbebens lückenlos gemessen und analysiert werden (Schurr et al., 2014; Bedford et al., 2016; Cesca et al., 2016). Da nahezu alle IPOC-Daten offen zugänglich sind und der geowissenschaftlichen Community frei zur Verfügung gestellt werden, wurde aus dem Iquique-Erdbeben eines der am besten untersuchten Subduktionsbeben überhaupt.

GeoSEA – ein Observatorium am Meeresboden

Die meisten großen Subduktionsbeben treten unterseisch auf und so erfolgt auch der Spannungsaufbau an der Plattengrenzfläche unterhalb des Meeresbodens. Die Platten haften dabei nicht gleichmäßig, sondern nur in bestimmten Bereichen unterschiedlicher Größe (sogenannte *Asperities*) aneinander. Asperities zu lokalisieren und deren mechanische Ursachen zu verstehen ist eine wichtige Aufgabe der Geowissenschaften, weil sie Ort und Größe von Erdbeben festlegen. In Subduktionszonen können Asperities lokalisiert werden, indem das durch das Haften der Platten hervorgerufene Zusammenstauchen der Oberplatte z. B. durch GPS gemessen und dann modelliert wird (Moreno et al., 2016). Dies gelingt umso besser, je näher die Messungen an der Verformung vorgenommen werden. Die Methode stößt aber in Subduktionszonen an Grenzen, weil dort die Messungen auf die Landseite begrenzt sind. Die Annahme, dass der seichteste Bereich der Subduktionszone gleich hinter dem Tiefseegraben keine Spannungen aufbauen kann, beruht auch darauf, dass diese so weit seawärts vom Land aus bisher nicht gemessen werden konnten. Es ist daher, trotz aller damit einhergehenden Schwierigkeiten, von größter Bedeutung, die Messungen auf den Ozeanboden

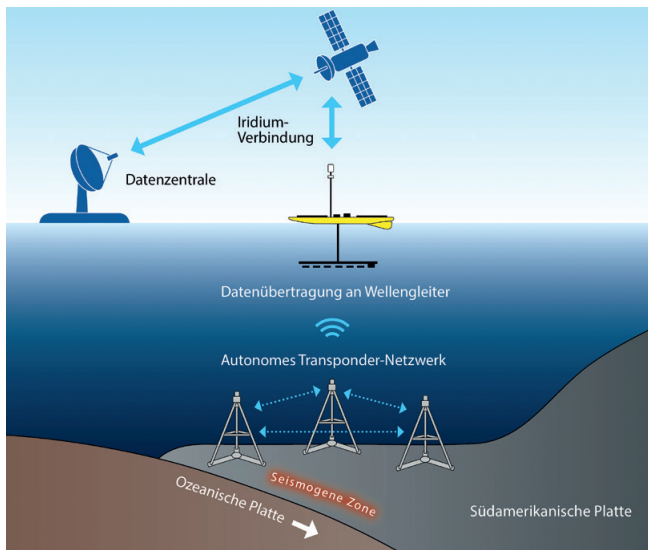


Abb. 3: Schematische Darstellung des Netzwerkaufbaus des GeoSEA-Arrays auf der südamerikanischen Platte vor Nordchile (Grafik: C. Kerstens, GEOMAR)

Fig. 3: Sketch of the network set-up for the GeoSEA arrays on the South American plate offshore North Chile

auszuweiten. Hierzu werden seit einiger Zeit Ozeanbodenseismometer genutzt, die beispielsweise auch nach dem Iquique-Erdbeben 2014 in den Pazifik ausgebracht wurden, um Nachbeben besser lokalisieren zu können.

Eine neue Möglichkeit, Krustendeformationen am Meeresboden zu erfassen, quasi das Analogon zu der an Land genutzten satellitengestützten GPS-Technologie, bietet die Meeresbodengeodäsie. Am GEOMAR wurde in den letzten Jahren ein Netzwerk an Meeresbodenstationen entwickelt, die mittels akustischer Signale miteinander kommunizieren. Aus der Laufzeit der Signale lässt sich die Distanz zwischen den einzelnen Stationen ermitteln (Abb. 3).

Gleichzeitig erfassen die Messstationen des GeoSEA-Netzwerks (Geodetic Earthquake Observatory on the SEAFloor) neben dem Wasserdruck auch Neigungsänderungen, so dass sowohl horizontale als auch vertikale Bewegungen ermittelt werden können. Die Stationen verbleiben für einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren autonom im Wasser. Eine weitere Komponente des Netzwerks ist ein Wellengleiter, der sowohl die Funktionalität des Netzwerks in der Tiefe überprüft, als auch dabei hilft, die Daten zur Oberfläche zu transferieren (Abb. 4).

Als Vorbereitung für die Installation des GeoSEA-Arrays vor Nordchile war eine hochauflösende Meeresbodenkartierung des Kontinentalhangs eine Voraussetzung, um geeignete Orte für das Ausbringen der Messgeräte zu finden. Hierzu diente

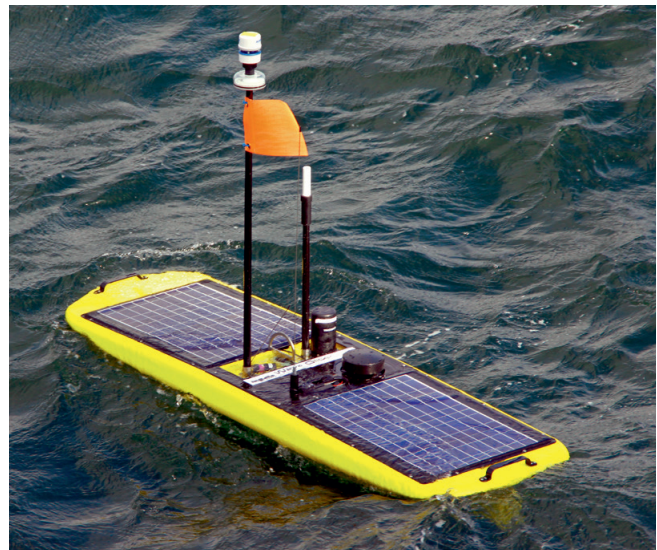


Abb. 4: Der Wellengleiter dient als Schnittschnelle zwischen dem Meeresboden und der Wasseroberfläche. (Foto: D. Lange, GEOMAR)

Fig. 4: The waveglider serves as communication interface between the ocean floor and the sea surface.

maßgeblich der erste Fahrtabschnitt der Ausfahrt SO244 des neuen Forschungsschiffs SONNE. Im Rahmen dieser Expedition erfolgten im November 2015 Tauchgänge eines autonomen Unterwasserfahrzeugs sowie die flächenhafte Kartierung des Untersuchungsgebiets mittels eines Fächerecholots. In den dadurch ausgesuchten Zielgebieten wurden drei Sub-Netzwerke des GeoSEA-Arrays im zweiten Fahrtabschnitt im Dezember 2015 installiert.

Das GeoSEA-Netzwerk in Nordchile besteht aus insgesamt 23 autonomen Meeresboden-Transpondern, die auf etwa 4 m hohen Stahltripoden auf den Meeresboden abgefiert werden.

Für die Installationen wurden drei Gebiete am mittleren und unteren Kontinentalhang sowie seewärts des Tiefseegrabens identifiziert (Abb. 5). Das Netzwerk in Gebiet 1 auf dem mittleren Hang besteht aus acht Transponderstationen, die paarweise auf vier topographischen Rücken stehen, die den Verlauf von Verwerfungen markieren. In Gebiet 2 auf der ozeanischen Platte seewärts des Tiefseegrabens messen fünf Transponder die Öffnung von Extensionsbrüchen. Das dritte Messgebiet befindet sich in Wassertiefen von über 5000 m auf dem unteren Kontinentalhang, wo insgesamt zehn Stationen den diffusen tektonischen Spannungsaufbau verfolgen. Die ersten Testdatensätze, die nach einigen Tagen mit Hilfe des Wellengleiters gesichert wurden, zeigten eine Präzision von ± 2 mm über eine Entfernung von bis zu 2500 m. Zudem wurden Datensätze der Messungen des Drucks, der Schallgeschwindigkeit, der Salini-

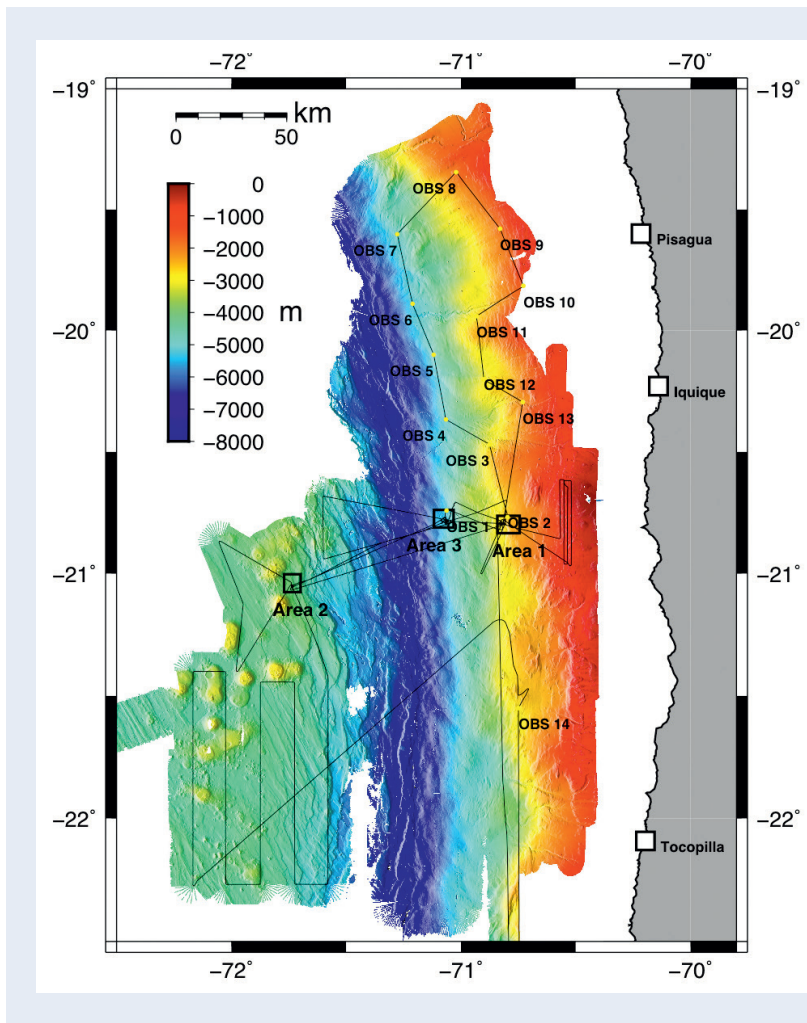


Abb. 5: Fahrtroute des FS SONNE während der Ausfahrt SO244-II (schwarze Linie). Gezeigt sind die drei Einsatzgebiete des GeoSEA-Netzwerks (schwarze Boxen) sowie die Lokationen der Ozeanbodenseismometer. Der chilenische Tiefseeegraben ist dunkelblau markiert; westlich davon ist die ozeanische Platte (grün) zu erkennen, die sich unter den Kontinentalhang (östlich des Tiefseeegrabens und gelb/rot markiert) schiebt. (Abb.: GEOMAR)

Fig. 5: Route of the RV SONNE during the cruise SO244-II (black line). Plotted are also the areas of the GeoSEA arrays (black boxes) and ocean bottom seismometer locations. The Chilean trench is marked in dark blue, in the west in green is the oceanic plate, as it slides under the continental shelf (yellow and red).

tät und der Temperatur gesichert, anhand derer die Funktionalität der Netzwerke verifiziert werden konnte.

Im Anschluss an die Installation des geodätischen Netzwerks wurden 14 Ozeanbodenseismometer am Meeresboden ausgebracht, um die seismische Aktivität aufzuzeichnen (Abb. 1 und 5). Diese Geräte wurden im Herbst 2016 durch das U.S.-amerikanische Forschungsschiff LANGSETH geborgen.

Wo es zerrt – die intermediären Intraplattenbeben

Die Erdbeben entlang der Koppelzone sind zwar die größten, aber bei weitem nicht die häufigsten seismischen Ereignisse in der chilenischen Subduktionszone. Ein Blick auf die langjährige Seismizitätskarte des IPOC-Untersuchungsgebiets zeigt das dichteste Auftreten von Beben in einem Streifen weit landeinwärts, nahe dem Vulkanbogen (Abb. 6). Die Färbung der Punkte weist den Beben Tiefen um die 100 km zu, und im Querschnitt wird ein geneigtes seismisches Band deutlich, die

sogenannte Wadati-Benioff-Zone, ein Markenzeichen fast aller Subduktionszonen. Diese Erdbeben treten im Innern der in den Erdmantel sinkenden ozeanischen Lithosphärenplatte auf. Ihr typischer Herdmechanismus zeugt von Zugspannung entlang der Platte und unterscheidet sich daher deutlich von den Beben in der Kopplungszone. In Erdmanteltiefe (> 60 km) brechen Gesteine normalerweise nicht spröde, sondern verformen sich unter Spannung duktil, also aseismisch. Tiefherdbeben sind daher nicht leicht zu erklären. Einen Hinweis auf ihre Ursache gibt uns die Tatsache, dass sie, bis auf wenige Ausnahmen (Schurr et al., 2013), nur in ozeanischen Subduktionszonen vorkommen. Es ist wahrscheinlich, dass die ozeanische Lithosphäre in Mineralen gebundenes Meerwasser mit in die Tiefe trägt. Diese hydratisierten Minerale werden bei höheren Temperaturen und größerem Druck instabil und das Wasser wird freigesetzt, was kurzzeitig zu einer Reduzierung des Umgebungsdrucks führt und so Sprödrbrüche zulässt – soweit die Theorie. Der Querschnitt in Abb. 6 zeigt, dass die Wadati-Benioff-Zone tatsächlich aus mindestens zwei Bändern besteht. Die sogenannte doppelte seismische Zone ist ebenfalls

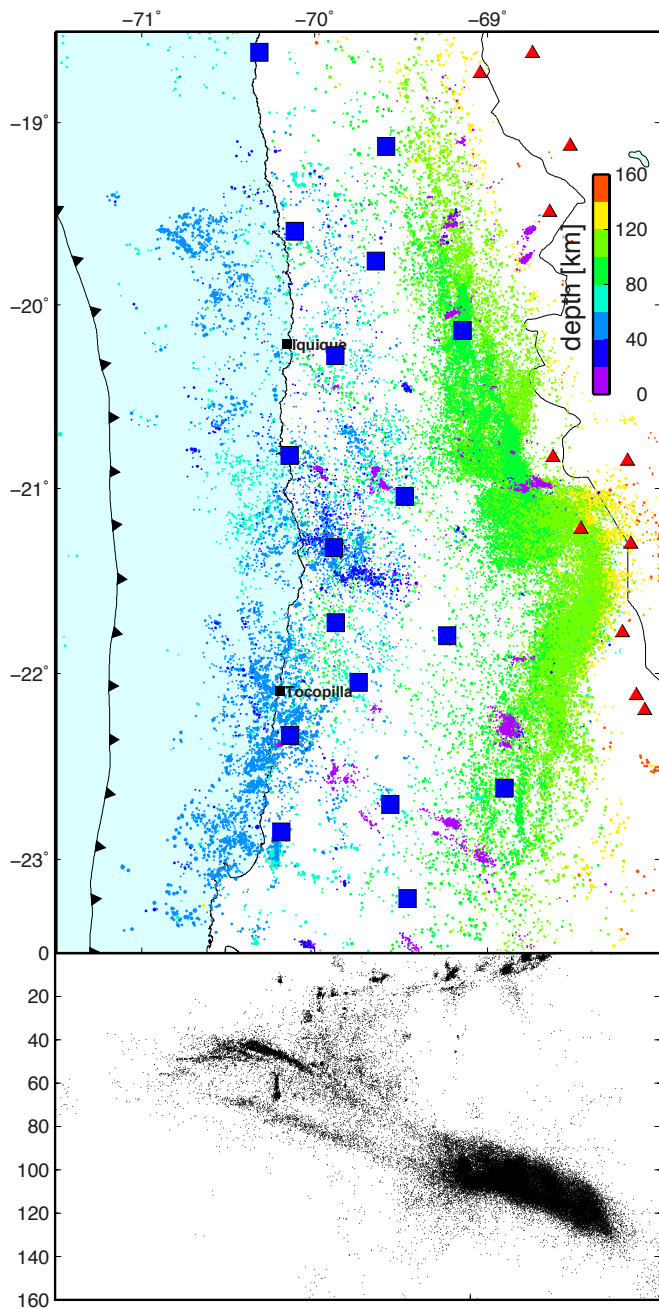


Abb. 6: Erdbebenverteilung im IPOC-Untersuchungsgebiet. Die Einfärbung der Erdbeben gibt Auskunft über ihre Tiefe. Unten: Querschnitt in West-Ost-Richtung. Am häufigsten treten Erdbeben in intermediären Tiefen zwischen 80 bis 120 km auf. Blaue Quadrate sind IPOC-Stationen, rote Dreiecke markieren Vulkane. (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 6: Seismicity map of the IPOC study region. Earthquakes are colored according to depth. Lower panels show cross section in west-east direction. Most events occur at intermediate depths between 80 and 120 km. Blue squares are IPOC stations, red triangles are volcanoes.

ein typisches Merkmal von Subduktionszonen und entsteht wahrscheinlich dadurch, dass die hydratisierten Krusten- und Mantelgesteine entlang unterschiedlicher Isothermen/-baren entwässern. Die Theorie löst auch noch ein anderes Rätsel: Vulkanismus tritt dort auf, wo eine kalte Platte verschluckt wird. Tatsächlich weisen Subduktionsvorseiten die kältesten Geothermen überhaupt auf, weil die permanent nachgeschobene kalte ozeanische Lithosphäre auch die Umgebungsgesteine kühlt. Jedoch dringt das aus der subduzierten Platte freigesetzte Wasser in den Mantelkeil ein und senkt dort dessen Schmelztemperatur. Und tatsächlich konnte tomografisch abgebildet werden, dass Magmen, die zu Vulkanen aufsteigen, ihren Ursprung an den Erdbebennestern in ungefähr 100 km Tiefe haben (Schurr et al., 2003).

Fazit und Ausblick

IPOC hat die ersten zehn Jahre der Überwachung der seismischen Lücke in Nordchile erfolgreich absolviert. Das Konzept von IPOC, den Apex eines seismischen Zyklus mit einer Vielzahl moderner Sensorik zu beobachten, um daraus Grundsätzliches über Subduktions- und Erdbebenprozesse zu lernen, hat sich bewährt. Bisher wurden die zwei größten Erdbeben seit fast 140 Jahren aus nächster Nähe beobachtet und haben überraschende und neue Einsichten z. B. in den Spannungsaufbau und -abbau gewährt. Das letzte große Erdbeben von 2014 hat trotz seiner Magnitude (> 8) nur einen relativ kleinen Teil der seismischen Lücke gebrochen. In den zurückbleibenden Bereichen wurden die Spannungen noch weiter erhöht und sind immer noch ausreichend für ein oder zwei weitere Megaerdbeben (Schurr et al., 2014). IPOC hat auch gezeigt, dass lange Beobachtungszeitreihen notwendig sind, um langsam ablaufende Prozesse oder seltene Ereignisse zu erfassen und dass sich die Ausdauer und Beharrlichkeit lohnt. IPOC wurde über die Jahre kontinuierlich weiterentwickelt und ausgebaut. Der nächste Schritt war die Ausweitung der Beobachtung auf die Seeseite der Subduktion durch das GEOMAR. Die Vielzahl der entwickelten Technologien und gewonnenen Daten werden dazu beitragen, Megaerdbeben an Subduktionszonen in Zukunft besser zu verstehen.

Literatur

- Bedford, J., Moreno, M., Schurr, B., Bartsch, M., Oncken, O. (2015): Investigating the final seismic swarm before the Iquique-Pisagua 2014 Mw 8.1 by comparison of continuous GPS and seismic foreshock data. - *Geophysical Research Letters*, 42, 10, pp. 3820-3828.
- Cesca, S., Grigoli, F., Heimann, S., Dahm, T., Kriegerowski, M., Sobiesiak, M., Tassara, C., Olcay, M. (2016): The Mw 8.1 2014 Iquique, Chile, seismic sequence: a tale of foreshocks and aftershocks. - *Geophysical Journal International*, 204, 3, pp. 1766-1780.
- Moreno, M., Metzger, S., Bedford, J., Hoffmann, F., Li, S., Deng, Z., Klotz, J., Oncken, O. (2016): Satellitengeodäsie und Erdbebendeformation in der nordchilenischen seismischen Lücke. – *System Erde*, 6, 2, pp. 36-41.
- Oncken, O. (2016): Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für den Start der Gebirgsbildung verantwortlich? – *System Erde*, 6, 2, pp. 16-21.
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., Wang, R., Moreno, M., Bartsch, M., Zhang, Y., Oncken, O., Tilmann, F., Dahm, T., Victor, P., Barrientos, S., Vilotte, J.-P. (2014): Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. - *Nature*, 512, pp. 299-302.
- Schurr, B., Asch, G., Rietbrock, A., Trumbull, R., Haberland, C. (2003): Complex patterns of fluid and melt transport in the central Andean subduction zone revealed by attenuation tomography. - *Earth and Planetary Science Letters*, 215, 1-2, pp. 105-119.
- Schurr, B., Mechie, J., Yuan, X., Schneider, F. M., Sippl, C. (2013): Können Kontinente untertauchen? Kontinentkollision und -subduktion – Tektonik, Tiefenstruktur und geodynamische Prozesse unter dem Pamir, Tien Shan und Hindukusch. - *System Erde*, 3, 2, pp. 6-11.
- Tilmann, F., Schurr, B., Cesca, S., Dahm, T., Saul, J., Palo, M., Moreno, M., Bedford, J., Oncken, O., Wang, R., Zhang, Y. (2016): Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben: Kombination innovativer Analyseverfahren erlaubt Rekonstruktion von Bruchverläufen. - *System Erde*, 6, 1, pp. 24-31.
- Victor, P., Kemter, M., Ewiak, O., Ziegenhagen, T., Oncken, O., Gonzalez, G. (2016): Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der Oberplatte großer Subduktionssysteme. – *System Erde*, 6, 2, pp. 30-35.
- Victor, P., Schurr, B., Brändlein, D., Klotz, J., Ritter, O., Asch, G., Walter, T. R., Sobiesiak, M., Oncken, O. (2011): Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile: IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk. - *System Erde*, 1, 1, pp. 24-29.