

Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile

IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk

*Pia Victor, Bernd Schurr, Dirk Brändlein, Jürgen Klotz, Oliver Ritter, Günter Asch, Thomas R. Walter, Monika Sobiesiak, Onno Oncken
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

The Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC) is an international network of institutions and scientists organizing and operating a distributed system of instruments and projects dedicated to the study of earthquakes, deformation and other subduction processes at the continental margin of Chile.

This megathrust plate boundary between the South American plate and the oceanic Nazca plate exhibits some of the largest earthquakes on Earth. Earthquakes, volcanoes and other active margin processes are driven by ongoing convergence between the two tectonic plates. Our goal is to improve the understanding of both the physical mechanisms underlying these processes and the natural hazards induced by them. We therefore integrate modern ground- and space-based technologies to observe and interpret active deformation related to the megathrust seismic cycle.

The northern part of the Chilean margin offers an exceptional opportunity for such studies: the more than 400 km long plate boundary segment between Antofagasta and Arica, capable of a giant M9+ earthquake, has not been broken for more than 100 years. This is the longest time period between large earthquakes along the Peru-Chile coastal margin, putting this segment presumably in the terminal stage of a seismic cycle. The neighboring segments to the south and north have been broken in 1995 and 2007 and 2001 respectively, enhancing the stress in between.



Südamerikas Plattenrand: ein ausgeprägter geodynamischer Typvertreter

Eine der bedeutendsten Erkenntnisse der letzten Jahre in der Geodynamik war, dass die Krustendeformation an konvergenten Plattenrändern, an denen die ozeanische Erdkruste unter die Kontinente abtaucht, in höchstem Maß un stetig ist. Die Deformationen weisen hier ein kontinuierliches Frequenzspektrum von schnellen seismischen Ereignissen, fluidgesteuerten Transientenereignissen, langsamen „stillen Erdbeben“ bis hin zu säkularen Bewegungen und nicht-vulkanischen Tremoren auf. Einige dieser Phänomene sind erst kürzlich entdeckt und noch nicht entsprechend systematisch und gekoppelt analysiert worden. Insbesondere ihr Zusammenhang mit dem seismischen Zyklus und der Gefährungsverteilung sind unklar.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam forscht seit längerem an dem geodynamisch sehr aktiven Plattenrand zwischen Südamerika und der pazifischen Platte. Dieser konvergente Plattenrand ist ein herausragender Vertreter seines Typs, er hat allein im 20. Jahrhundert etwa 25 % der globalen seismischen Aktivität auf sich vereinigt und steht nach unserem Kenntnisstand im Norden Chiles unmittelbar vor einem großen seismischen Ereignis ($M > 8$). In der Vergangenheit haben hier etwa alle 110 Jahre solche starken Beben stattgefunden. Das letzte ereignete sich 1877 (Abb. 1). Die jüngsten Beben von Antofagasta (1995), Tocopilla (2007), und Südperu (2001) machen deutlich, dass diese Region ein global nahezu einzigartiges Objekt ist, um mit einem Plattenrandversagen assoziierte Prozesse zu untersuchen und durch deren Verständnis die Auswirkungen von Katastrophen wie z. B. Erdbeben zu minimieren. Die Gefährdung und Vulnerabilität der Region wird vor dem Hintergrund deutlich, dass der Norden Chiles etwa 30 % der Weltkupferproduktion stellt (neben anderen wichtigen Rohstoffen, wie z. B. Lithium) und sämtliche Lifelines, d. h. wichtige „Lebensadern“, deren Funktion im Katastrophenfall unbedingt erforderlich ist, sich in dieser Zone befinden. Weiterhin konzentriert sich die dynamische Bevölkerungsentwicklung in den besonders gefährdeten Küstenstädten.

Das Integrierte Plattenrandobservatorium Chile (IPOC) verfolgt daher mit einem integrierten methodischen Ansatz das Ziel, diesen Plattenrand vor, während und nach großen seismischen Ereignissen systematisch zu beobachten. Gemeinsam mit internationalen Partnern baute das GFZ bisher 17 Multi-parameter-Observatorien auf (Abb. 2), deren Daten zum Teil in Echtzeit nach Potsdam übertragen werden. Die kontinuierlichen Messungen werden durch die Auswertung von InSAR-Daten, sowie gezielte feldgestützte neotektonische Studien

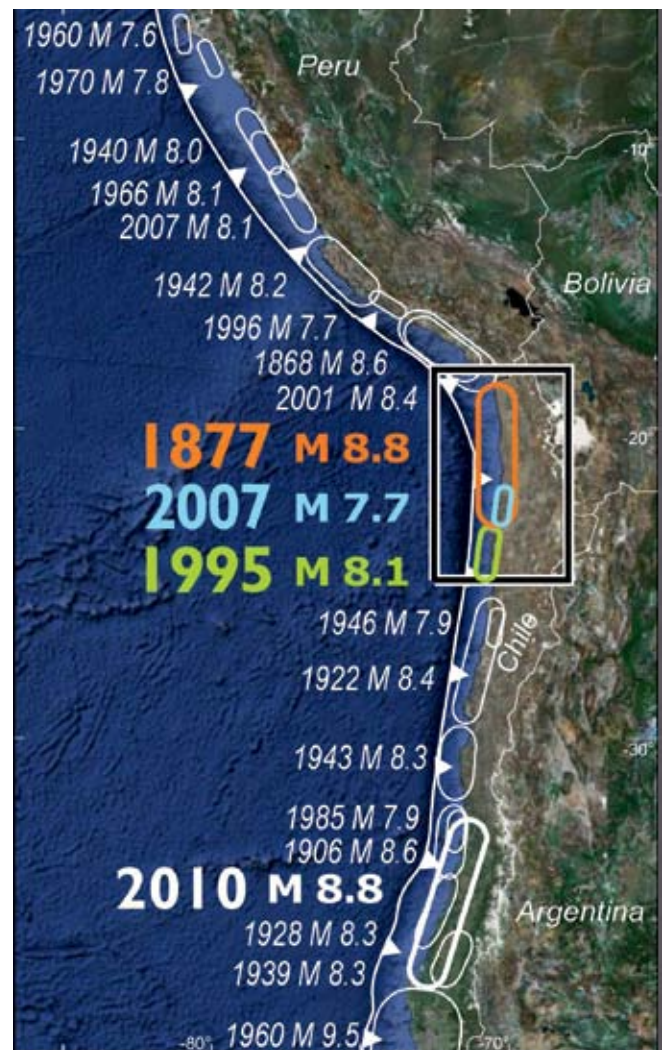


Abb. 1: Historische Erdbeben entlang des südamerikanischen Plattenrands. Im Untersuchungsgebiet (Kasten) ist das Hauptsegment letztmalig 1877 gebrochen.

Fig. 1: Historical earthquakes along the South American plate margin. The main segment in our target region (box) broke the last time in 1877 in a giant earthquake.



Kontakt: Pia Victor
(pvictor@gfz-potsdam.de)

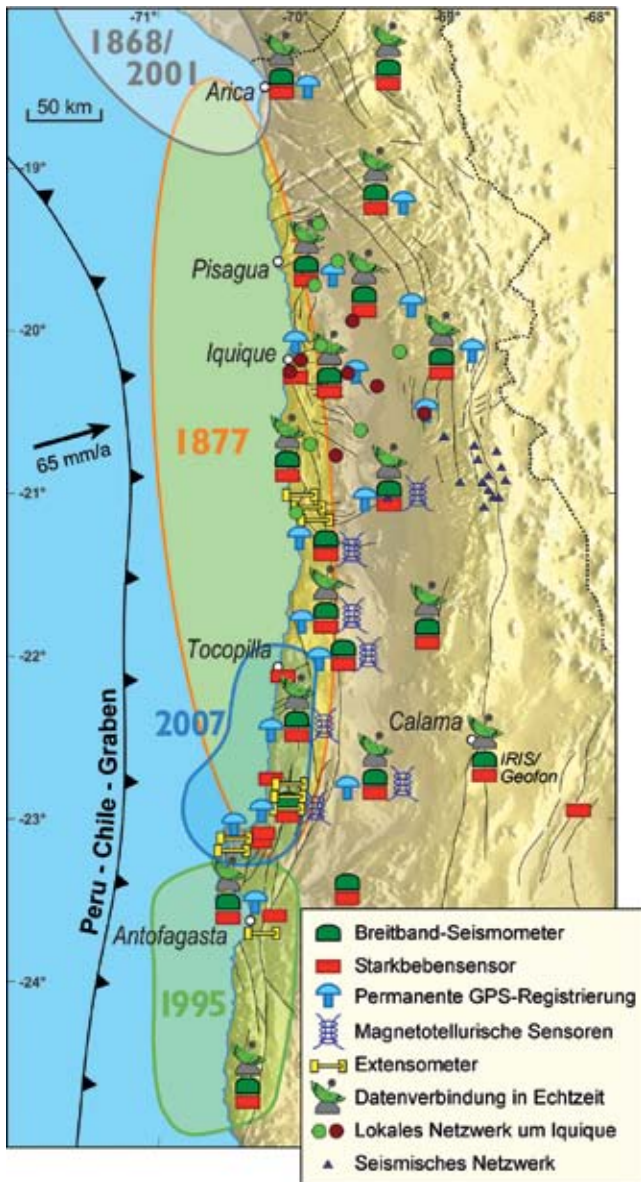


Abb. 2: Karte der unterschiedlichen Komponenten des IPOC. Farbige Flächen zeigen die ungefähre Ausdehnung junger und historischer Erdbebenbrüche.

Fig. 2: Map of the different components of the IPOC. Colored areas show the approximate extent of recent and historical earthquakes.

ergänzt. Ziel ist es, zunächst ein hoch aufgelöstes Bild der ablaufenden Prozesse zu gewinnen, um daraus Strategien für die Einschätzung der Gefährdungsverteilung und die weitere Überwachung abzuleiten. Neben dem wissenschaftlichen Verständnis der Bruchprozesse stehen die Entwicklung robuster, kostengünstiger Überwachungstechnologien und von Verfahren zur zeitabhängigen Gefährdungseinschätzung im Mittelpunkt.

Komponenten des Observatoriums

Um das gesamte Spektrum der Deformationsprozesse abzubilden, betreiben wir ein Netzwerk verschiedener Observationstechnologien. Die Vernetzung der Einzelkomponenten ermöglicht eine multidisziplinäre Interpretation und sichert Synergien beim Observatorienbetrieb. Folgende Komponenten liefern kontinuierliche Datensätze:

Seismologie

Das Rückgrat der seismologischen Messungen bildet ein Netz von zurzeit 17 Breitband-Seismometern. Sie wurden in an abgelegenen Orten in das Grundgestein gesprengten Höhlen installiert. Breitband-Seismometer registrieren Bodenbewegungen in einem Periodenbereich von 0,02 Sekunden bis zu mehreren Stunden mit einer Genauigkeit von 10⁻⁹ m. Da Breitband-Seismometer nicht dazu geeignet sind, auf kurze Entfernung sehr große Erdbeben aufzuzeichnen, wurde jede der Stationen sowie weitere kritische Punkte der zivilen Infrastruktur zusätzlich mit je einem Akzelerometer bestückt, die ihre Daten in Echtzeit an das GFZ nach Potsdam übertragen. Die von diesen Geräten erfassten Beschleunigungsmessungen sind notwendig, um die Auswirkungen von Erdbeben auf Bauwerke zu untersuchen. Dieses Netz wird im zentralen Bereich der seismischen Lücke, in der Umgebung der Küstenstadt Iquique, zurzeit mit 20 mittel- und kurzperiodischen Seismometern verdichtet.

Extensometer

Die Relativbewegung zwischen zwei Blöcken einer aktiven Störung kann durch kontinuierliches Kriechen erfolgen oder durch plötzliche Deformationsereignisse, die durch Erdbeben ausgelöst werden können. Mit den im Rahmen des IPOC installierten Extensometern messen wir den Verschiebungsbetrag kontinuierlich mit einer Genauigkeit von 1 µm. Durch die synchronisierte Uhr kann der genaue Zusammenhang zwischen Erdbeben und Deformationsereignissen in der Oberplatte hergestellt werden. Dadurch erfassen wir die Häufigkeit und Magnitude seismisch getriggelter Deformationsereignisse relativ zum kontinuierlichen Kriechen der Störung in Abhängigkeit von der Zeit. Aktuell werden vier aktive Störungssegmente mit insgesamt elf Instrumenten überwacht.

Geodätische Beobachtungen

Ein wesentlicher Bestandteil des IPOC ist die Beobachtung der gegenwärtigen Deformation der Erdoberfläche mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Dazu wurden in Nordchile vom GFZ und von internationalen Kooperationspartnern permanent registrierende GPS-Stationen eingerichtet. Diese liefern ein detailliertes Bild der Deformation während des gesamten Erdbebenzyklus. Vor allem interseismische Kompression und eventuell stattfindende langsame Erdbeben stehen im Fokus der permanenten GPS-Beobachtungen. Während bisher die

Deformation aus der Veränderung der täglich berechneten Koordinaten abgeleitet wurde, wird im Rahmen von IPOC die Punktbewegung sekundlich neu berechnet. Dies ergänzt den Frequenzbereich der seismischen Messungen. Werden die GPS-Daten in Echtzeit übertragen und ausgewertet, kann die Herdfläche eines zukünftigen großen Erdbebens sehr schnell und zuverlässig berechnet werden.

InSAR

Deformationsprozesse der Erdoberfläche können mit Hilfe der differentiellen Radarinterferometrie (InSAR) mit hoher räumlicher Auflösung aufgeklärt werden. Im Rahmen des IPOC werden damit Deformationszeitreihen entlang aktiver Störungszonen erstellt. Durch die Prozessierung von mindestens zwei Bildern eines bestimmten Ausschnitts können wir Relativbewegungen im Zentimeterbereich für die Gesamtfläche des Observatoriums bestimmen. Neben der Reaktivierung von Störungssystemen während und nach den Antofagasta- (1995) und Tocopilla-Beben (2007) wird auch untersucht, ob die Beben zu einer Aktivierung von Vulkanen beitragen (vgl. dazu den Beitrag von Walter et al. in diesem Heft).

Magnetotellurik

Die Magnetotellurik (MT) ist ein Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Erdinneren. Dafür werden natürlich vorkommende Variationen elektromagnetischer Felder an der Erdoberfläche mit Magnetometern und Potentialelektroden gemessen. Aus dem Verhältnis der gemessenen elektrischen und magnetischen Felder kann die Leitfähigkeitsstruktur des Untergrundes bis in Tiefen von mehreren Zehnerkilometern bestimmt werden. Im Rahmen des IPOC wird das Verfahren im Dauerversuch verwendet, um temporäre Änderungen der elektrischen Leitfähigkeitsstruktur zu beobachten und gegebenenfalls mit Subduktionsprozessen zu korrelieren. Insgesamt werden an acht IPOC-Stationen die Signale des elektromagnetischen Feldes kontinuierlich erfasst.

Das Tocopilla-Erdbeben

Der systematische Ansatz des IPOC wurde im November 2007 bestätigt, als der südlichste Teil der von uns observierten seismischen Lücke in einem Erdbeben der Magnitude 7,7 brach. Die Messstationen konnten sowohl das Hauptbeben, als auch die Nachbeben tätigkeit erfassen (Abb. 3). Der meterweite Versatz der beiden Platten in der Tiefe induziert ein charakteristisches Deformationsmuster an der Oberfläche, das sich flächig in Radarinterferogrammen messen lässt (Abb. 4). Motagh et al. (2010) berechneten auf dieser Basis eine detaillierte Verteilung der Verschiebungen zwischen den Platten (Abb. 4). Hieraus ergibt sich, dass sich der Bruch von der Küstenstadt Tocopilla bis zur Mejillones-Halbinsel am südlichen Ende der seismischen Lücke erstreckte. Aus GPS-Messungen ist bekannt, dass der seewärts gelegene Teil der Plattengrenze

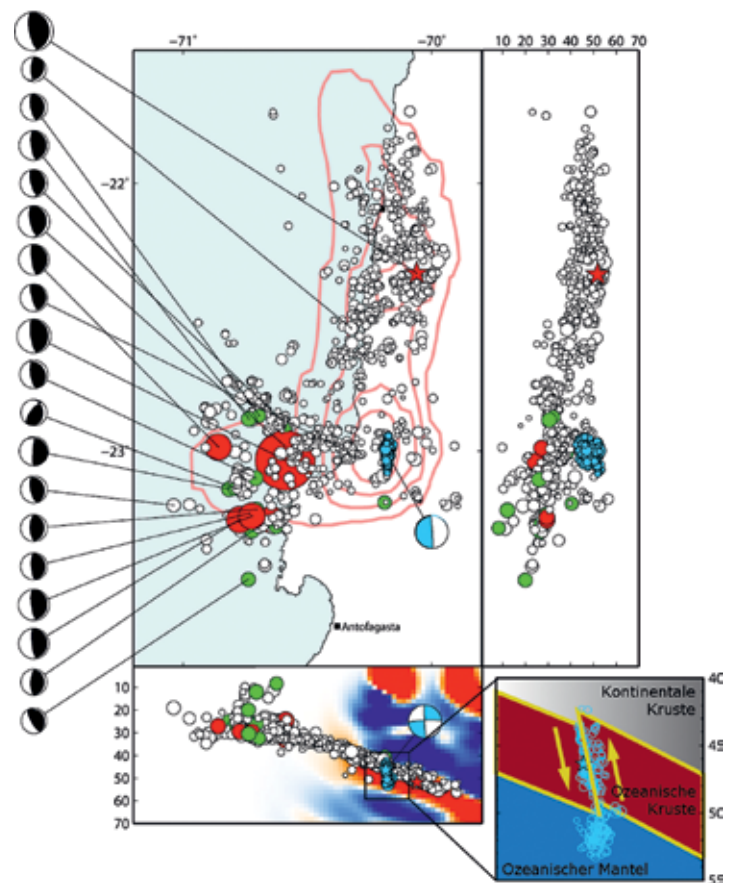


Abb. 3: Karte und Tiefenschnitte des Tocopilla-Erdbebens. Rote Iso­linien zeigen den Verschiebungsbetrag zwischen den Platten in 0,5 m Abstand. Kreise sind Nachbeben. Im Hintergrund des Ost-West Schnittes ist die subduzierte Platte durch Receiverfunktionen abgebildet (Sodoudi, persönliche Kommunikation 2010). Das Nachbeben vom 16.12.2007 hat die gesamte ozeanische Kruste durchbrochen (blaue Kreise).

Fig. 3: Map and vertical profiles for the 2007 Tocopilla earthquake. Red isolines depict the slip of the mainshock on the plate interface at 0.5 m steps. Circles are aftershocks. The east-west profile shows a receiver function image of the subducted slab (Sodoudi personal communication 2010). The 12/16/2007 aftershock broke the entire oceanic crust (blue circles).

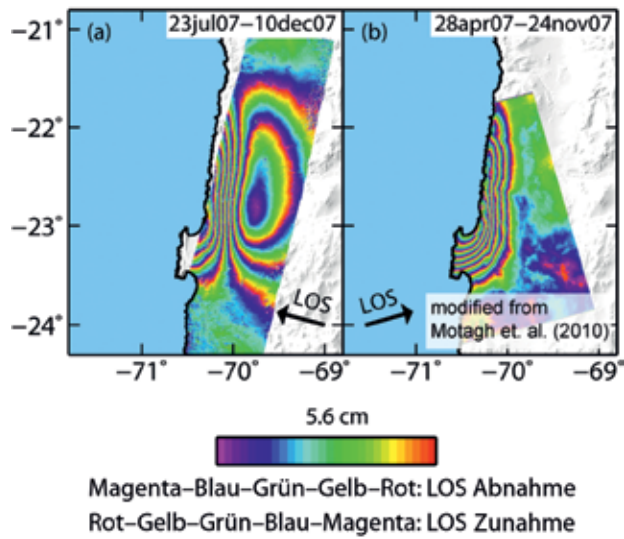


Abb. 4: Die zwei InSAR-Interferogramme zeigen die durch das Tocopilla-Erdbeben ausgelöste Oberflächendeformation. Jeder Interferenzstreifen steht für einen Verschiebungsbetrag von 5,6 cm in Blickrichtung zum Satelliten.

Fig. 4: Two InSAR interferograms depicting the surface deformation due to the Tocopilla earthquake. Each fringe shows surface displacement of 5.6 cm in line of sight of the satellite.

blockiert ist (Khazaradze und Klotz, 2003), woraus sich die Frage ergibt, warum der Bruch an den Barrieren der Mejillones-Halbinsel im Süden und ungefähr an der Küstenlinie im Westen stoppte. Die Nachbeben füllen mit großer Präzision die Bruchfläche aus (Abb. 3) und greifen nur am südlichen Ende seewärts aus, genau dort, wo auch eine Spannungserhöhung durch den Hauptbruch vorhergesagt wird. Eines der größten Nachbeben fand einen Monat nach dem Hauptbeben statt und zeigt einen anderen Mechanismus (Abb. 3). Hochauflösende Erdbebenlokalisierungen zusammen mit der Abbildung der ozeanischen Kruste aus Receiverfunktionen zeigen, dass dieses Ereignis zu einem senkrechten Bruch in der ozeanischen Platte geführt hat.

Seismischer Zyklus von aktiven Störungen in der Oberplatte

Die Atacama-Störung ist eine mehr als 1000 km lange Deformationszone parallel zum Kontinentalrand mit zahlreichen aktiven Segmenten. Mit neotektonischen Geländestudien konnten wir entlang dieser Struktur Segmente quartärer bis rezenter Aktivität identifizieren. Die Störungsflächen sind in diesen Segmenten nicht nur sehr jung, sondern zeigen auch charakteristische Oberflächenbrüche, die auf eine seismogene Entstehung hinweisen (Abb. 5). Die Länge und der Versatz dieser Brüche lassen vermuten, dass sie durch Beben mit Magnituden bis $M=7$ entstanden sind. Ob diese Beben durch große Subduktionsbeben ausgelöst worden sind, oder die

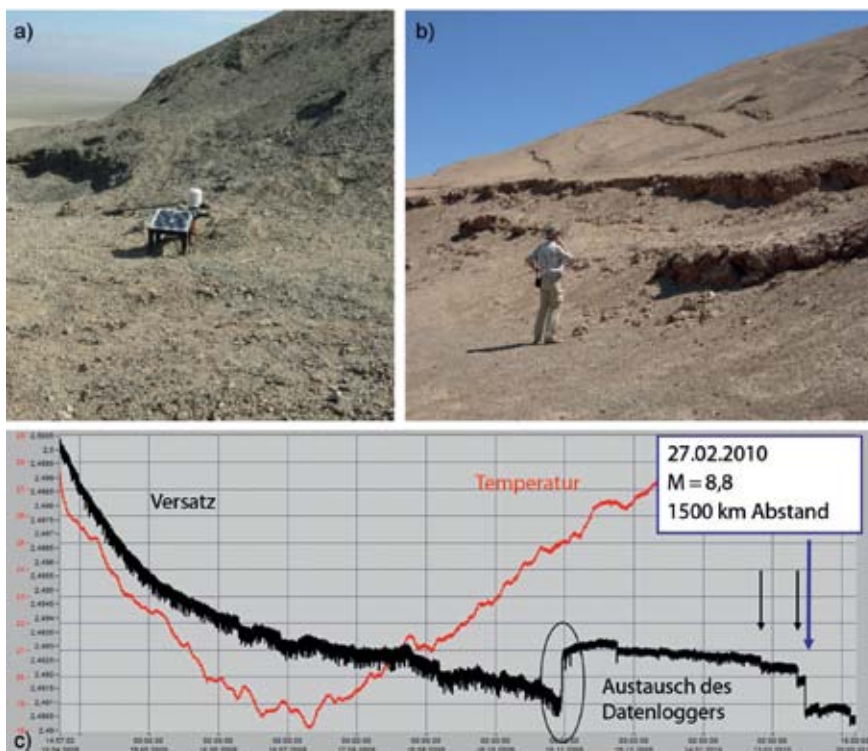


Abb. 5: a) Störungsanschnitt einer aktiven Abschiebung. Versätze in jungen alluvialen Fächern zeigen eine Reaktivierung während des Tocopilla und/oder Antofagasta Erdbebens. Das Solarpaneel im Vordergrund versorgt ein unterirdisch installiertes Extensometer. b) Oberflächenrupturen entlang eines aktiven Segments der Atacama-Störung zeigen deren multiple Reaktivierung. c) Exemplarische Zeitreihe der Extensometerdaten zeigt permanente Deformation ausgelöst durch lokale (schwarze Pfeile) und ferne (blauer Pfeil) Erdbeben.

Fig. 5: a) Fault scarp of an active normal fault on Mejillones Peninsula. Displacement in young alluvial fans indicates reactivation during the Tocopilla and/or Antofagasta earthquake. Solar panel is part of a creepmeter installed underground. b) Surface ruptures along an active segment of the Atacama Fault system indicate its multiple reactivation. c) Example of a time series showing permanent deformation related to local (black arrows) and remote (black arrows) earthquakes.

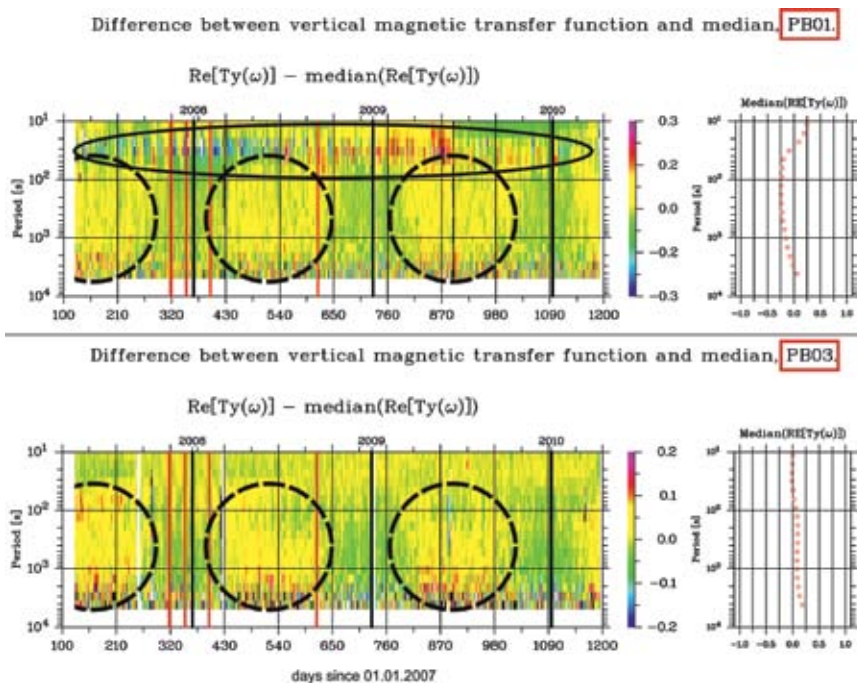


Abb. 6: Zeitreihe der vertikalen magnetischen Übertragungsfunktionen, dargestellt als Differenzen zwischen den Tageswerten und dem langjährigen Median (rechts) für die Stationen PBO1 und PBO3. Die Periodenachse entspricht einer nicht-linearen Tiefenskala. Vertikale rote Linien zeigen bedeutende Erdbeben, vertikale schwarze Linien Jahreswechsel an. Jahreszeitliche Schwankungen sind durch gestrichelte Kreise, lokale Variationen an Station PBO1 mit einer durchgezogenen Ellipse gekennzeichnet.

Fig. 6: Time series of the vertical magnetic transfer functions, represented as differences between daily estimates and the median of the entire time span (right) at sites PBO1 and PBO3. The period scale corresponds to a non-linear depth scale. Vertical red lines indicate major earthquakes, vertical black lines turns of the years. Seasonal variations are visible at both sites (dashed circles) but local variations only at site PBO1.

Atacama-Störung einen unabhängigen seismischen Zyklus aufweist, ist eine der Hauptfragen, die in einem Extensometerprojekt gemeinsam mit Seismologen geklärt werden soll. Erste Beobachtungen aus den Zeitreihen des Experiments weisen darauf hin, dass plötzliche permanente Relativbewegungen zeitgleich mit kleineren Subduktionsbeben entstehen. Der über ein Jahr akkumulierte, hochgenau gemessene Gesamtversatz entspricht in etwa den aus Geländebeobachtungen errechneten Langzeitraten. Dies lässt vermuten, dass ein Beben eine gewisse Magnitude überschreiten muss, um Oberflächenrupturen in den beobachteten Größenordnungen zu erzeugen.

Zeitabhängige Leitfähigkeitsstruktur des Untergrundes aus MT-Messungen

Die Zeitreihen der magnetischen Übertragungsfunktionen (Abb. 6) weisen auf laterale Leitfähigkeitskontraste in Ost-West-Richtung unter der Station hin. Die Erkundungstiefe steigt mit der Periodenlänge an. An allen MT-Stationen des IPOC-Netzwerks ist eine starke jahreszeitliche Variation der T_y -Komponente zu beobachten. Diese Schwankungen werden vermutlich durch saisonal bedingte Änderungen in der Ionosphäre hervorgerufen, welche die Quellregion der in die Erde induzierten Wechselfelder ist. An Station PBO1 ist zusätzlich eine langfristige, nicht-zyklische Variation zu beobachten (schwarze Ellipse). Diese lokale Variation könnte auf eine Änderung der Leitfähigkeitsstruktur des Untergrundes hinweisen, die wiederum mit großräumigen Fluidverlagerungen in der Subduktionszone in Zusammenhang stehen könnte.

Ausblick

Nach einer mehrjährigen Aufbauphase liefert das IPOC nun hochpräzise Datenströme, die eine Langzeitbeobachtung der letzten Phase des seismischen Zyklus eines zu erwartenden Starkbebens erlauben. Das Methodenspektrum deckt dabei einen sehr breiten Zeitbereich (Millisekunden bis Dekaden) von möglichen Deformationsmodi ab, deren gekoppelte Beobachtung neue Erkenntnisse über die zugrunde liegenden Prozesse liefern kann. Die Analyse des Tocopilla-Bebens lässt die hierbei bestehenden Möglichkeiten erahnen und dient als Vorbereitung auf einen nun wahrscheinlicher gewordenen Bruch der restlichen seismischen Lücke.

Nicht nur die Versorgung der größten Kupferminen der Welt, auch die Ausfuhr der Rohstoffe über die Häfen im Norden Chiles wären bei einem starken Erdbeben betroffen. Zudem könnte die Bevölkerung der ständig wachsenden Küstenstädte neben der seismischen Gefährdung auch den zerstörerischen Kräften von durch Erdbeben ausgelösten Tsunami ausgesetzt sein.

Literatur

- Khazaradze, G., Klotz, J. (2003): Short- and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes. – *Journal of Geophysical Research*, 108, B6, 2289, 10.1029/2002JB001879
- Motagh, M., Schurr, B., Anderssohn, J., Cailleau, B., Walter, T. R., Wang, R., Villotte, J. P. (2010): Subduction earthquake deformation associated with 14 November 2007, Mw 7.8 Tocopilla earthquake in Chile: Results from InSAR and aftershocks. – *Tectonophysics*, 490, 1-2, 66-68, 10.1016/j.tecto.2010.04.033