

# Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der Oberplatte großer Subduktionssysteme

Pia Victor<sup>1</sup>, Matthias Kemter<sup>1</sup>, Oktawian Ewiak<sup>2</sup>, Thomas Ziegenhagen<sup>1</sup>, Onno Oncken<sup>1</sup>, Gabriel Gonzalez<sup>3</sup>

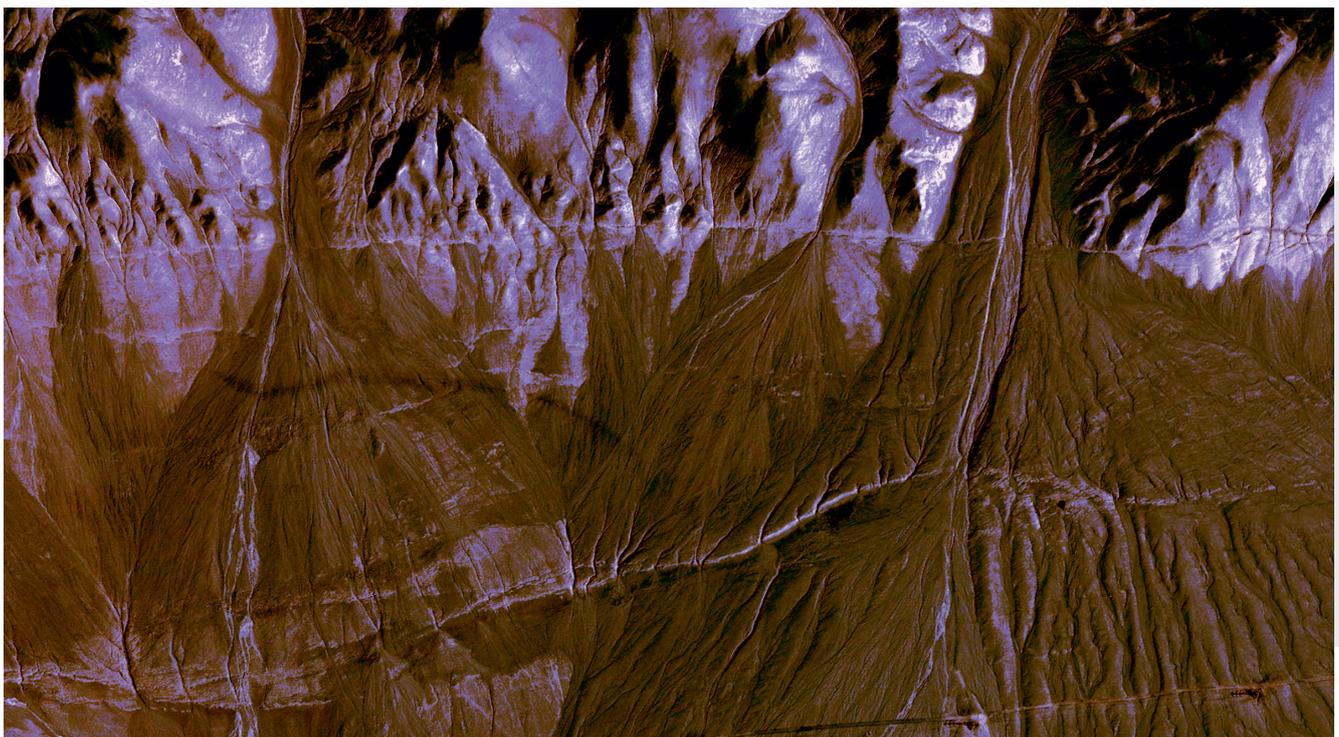
<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Tauw GmbH Dortmund

<sup>3</sup> Universidad Catolica del Norte, Antofagasta, Chile

*The Atacama Fault System (AFS) is an active trench-parallel fault system, located in the forearc of N-Chile directly above the subduction zone interface. Due to its well-exposed position in the hyper arid forearc of N-Chile it is the perfect target to investigate the interaction between the deformation cycle in the overriding forearc and the subduction zone seismic cycle of the underlying megathrust. Although the AFS and large parts of the upper crust are devoid of any noteworthy seismicity or historically documented earthquakes, at least three M=7 earthquakes in the past 10 ky have been documented in the paleoseismological record, demonstrating the potential of large events in the future.*

*We apply a two-fold approach to explore fault activation and reactivation patterns through time and to investigate the triggering potential of upper crustal faults. 1) A new methodology using high-resolution topographic data allows us to investigate the number of past earthquakes for any given segment of the fault system as well as the amount of vertical displacement of the last increment. This provides us with a detailed dataset of past earthquake rupture of upper plate faults which is potentially linked to large subduction zone earthquakes. 2) The IPOC Creepmeter array provides us with high-resolution time series of fault displacement accumulation for eleven stations along the four most active branches of the AFS.*



An der Westküste Südamerikas befindet sich eine der tektonisch aktivsten Zonen unseres Planeten. Dort, wo sich die ozeanische Nazca-Platte unter den südamerikanischen Kontinent schiebt, befindet sich die Subduktionszone. An dieser Grenzfläche kommt es durch die kontinuierliche Konvergenz der beiden Platten (6,7 cm/Jahr) immer wieder zu großen Überschiebungserdbeben. Die Wiederkehrrate solcher Ereignisse in Nordchile liegt bei etwa 120 Jahren, und neben dem instrumentell gut dokumentierten Iquique-Erdbeben 2014 (Mw 8,1; Schurr et al., 2014) sind vier weitere Erdbeben mit Magnituden > 8 historisch gut belegt.

Aber was spielt sich oberhalb dieser Plattengrenze in der südamerikanischen Kontinentalplatte ab? Typischerweise entwickelt sich in diesem Bereich eine plattenrandparallele Störungszone, die eine zusätzliche Grenzfläche in der kontinentalen Oberplatte bildet. Zwar sind diese Störungen oft bekannt, ihr seismisches Potenzial wird jedoch in den meisten Fällen unterschätzt. Wie beispielsweise im Fall des Hanshin-Erdbebens, welches sich genau an solch einem Störungssystem in Japan ereignete und die Stadt Kobe 1995 völlig unerwartet traf. Das gebrochene Segment der Nojima-Störung wurde zuvor aufgrund fehlender historischer und instrumenteller Erdbeben als inaktiv eingestuft.

Heute ist bekannt, dass diese Störungen Wiederkehrzeiten von mehreren tausend Jahren haben, so dass instrumentelle und historische Kataloge nicht ausreichen, um Aussagen über eine potenzielle Gefährdung zu treffen. Eine Störung kann jederzeit reaktiviert werden, auch wenn sie mehrere tausend Jahre im „Schlafmodus“ verweilt. Oft sind es deshalb diese unterschätzten Störungen die, falls sie aktiv werden, Beben mit verheerenden Folgen für die lokale Bevölkerung und die Infrastruktur auslösen können.

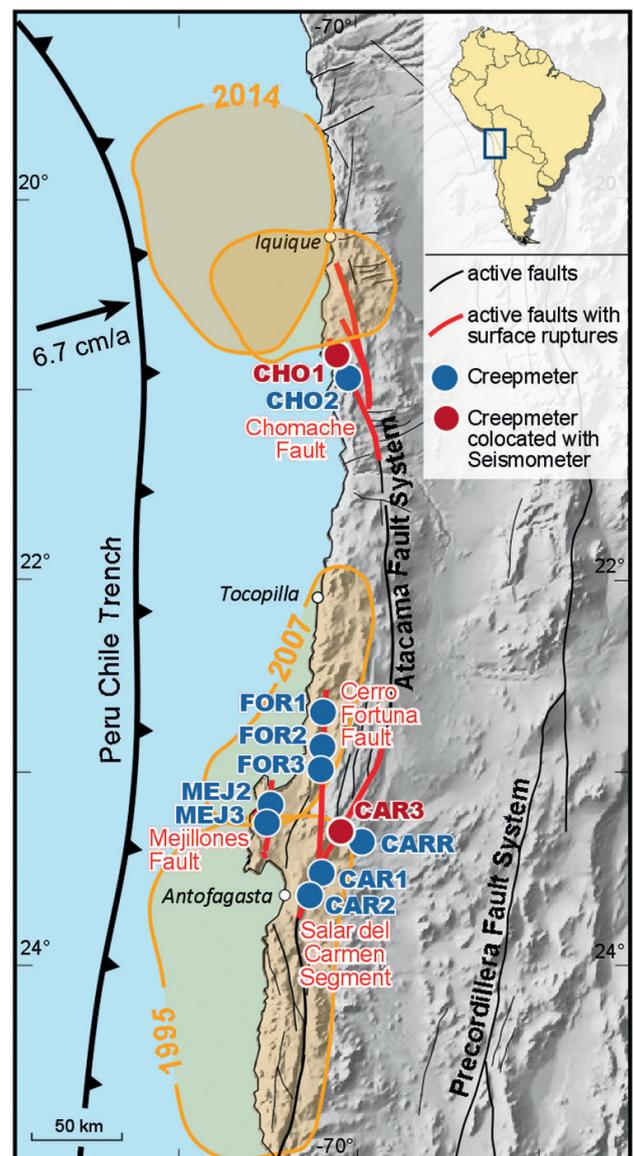


Abb. 1: Der Verlauf der Atacama-Störungszone in der chilenischen Küstenkordillere. Störungssegmente mit eindeutig durch Erdbeben erzeugten Oberflächenbrüchen sind rot markiert. Diese Segmente werden mit mindestens zwei Creepmetern überwacht. Die großen Subduktionsbeben der vergangenen Jahre sind als gelbe Ellipsen dargestellt.

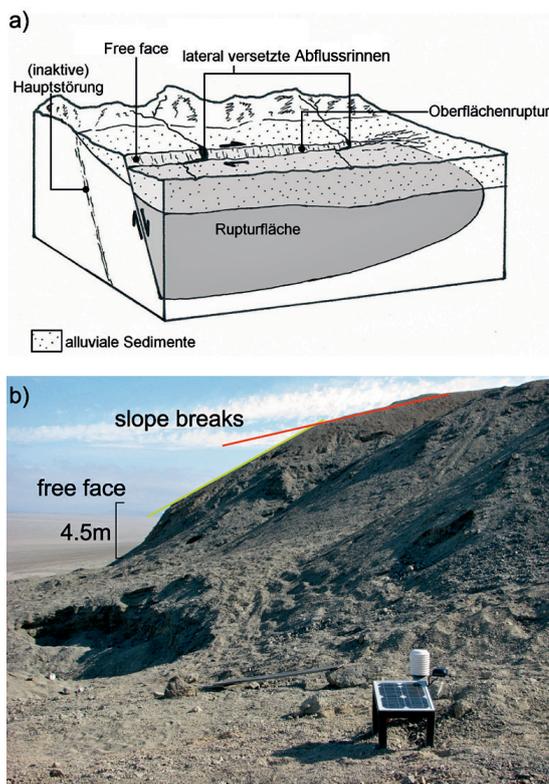
Links: Komplexes Muster von Oberflächenbrüchen der Atacama-Störungszone, die durch prähistorische Erdbeben erzeugt wurden. Mindestens zwei Bruchzonen sind auf diesem Ausschnitt zu erkennen, die im ariden Klima der Atacamawüste perfekt konserviert worden sind. Spezielle Bildbearbeitungstechniken auf der Grundlage eines Google Earth-Satellitenbilds machen auch kleinere Strukturen sichtbar (Ausschnitt etwa 5 km).

Left: Complex pattern of surface ruptures along the Atacama Fault System that originates from pre-historic earthquakes. At least two separate ruptures can be identified from this section, which have been preserved perfectly in the arid climate of the Atacama desert. Image processing techniques allow the visualisation of small-scale structures (image covers about 5 km).

Fig. 1: Map of the Atacama fault system (AFS) outcropping in the Coastal Cordillera of Northern Chile. Segments of the AFS marked in red are characterized by surface ruptures and identified as active. These fault segments are equipped with at least two creepmeter stations to monitor the current displacement. Large subduction zone earthquakes in the recent past are marked with yellow ellipses.



Kontakt: P. Victor  
(pia.victor@gfz-potsdam.de)



Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen Geo-Forschungszentrum GFZ nutzen den westlichen Plattenrand Südamerikas in Nordchile als natürliches Laboratorium, um die Prozesse an einer plattenrandparallelen Störung zu erforschen. Zwischen den Städten Iquique im Norden und Paposo im Süden ist die Atacama-Störungszone (AFS für Atacama fault system) über 460 km entlang der chilenischen Küstenkordillere sehr gut aufgeschlossen (Abb. 1). Dieses Störungssystem wurde bereits in der frühen Kreidezeit (vor rund 100 bis 140 Mio. Jahre) angelegt und kompensiert die schiefe Komponente der Plattenkonvergenz. Seit ihrer Entstehung wurde die AFS mehrfach reaktiviert und bildet heute ein komplexes Störungssystem, welches sich aus zahlreichen Segmenten zusammensetzt. Trotz eindeutiger Spuren großer Erdbebenbrüche an der AFS gibt es keine historisch dokumentierten Erdbeben entlang dieser Störungszone seit der spanischen Besiedlung vor etwa 500 Jahren und kaum instrumentell gemessene Seismizität in der gesamten Oberplatte. Deshalb ist die Untersuchung prähistorischer Erdbeben mit Hilfe morphologischer und geologischer Archive ein fundamentaler Schlüssel, um Hinweise über die Magnituden, die Verteilung und die Wiederholraten großer Erdbeben in dieser Region zu erhalten. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ erforschen gemeinsam mit chilenischen Kolleginnen und Kollegen die vergangenen und aktuellen Prozesse an der AFS und nutzen dabei einen zeitskalenübergreifenden Ansatz: Sie untersuchen die prähistorischen Oberflächenbrüche mit hochaufgelösten topographischen Datensätzen in Kombination mit geologischen Archiven und leiten daraus das Reaktivierungspotenzial sowie Aussagen über Anzahl und Magnituden vergangener Erdbeben ab. Außerdem wird das AFS mit einem Netzwerk von Sensoren, sogenannten Creepmetern, überwacht, um die Kopplung der AFS mit der Subduktionszone zu untersuchen.

### Die Morphologie der Störungen – Schlüssel zu prähistorischen Erdbeben in einem extrem trockenen Wüstengebiet

Die meisten oberflächennahen Erdbeben hinterlassen charakteristische Spuren an der Erdoberfläche. Diese typischen Landschaftsformen werden in der tektonischen Geomorphologie als sogenannte morphologische Indikatoren verwendet, um Aufschluss über tektonische Prozesse in der Vergangenheit zu erhalten. Verschieben sich die durch eine Störungszone getrennten Krustenblöcke bei einem Erdbeben vertikal zueinander, entsteht eine Bruchstufe, die von wenigen Zentimetern bis über 10 m hoch sein kann (Abb. 2).

Schieben sich die Blöcke hingegen seitwärts aneinander vorbei, ist dies häufig durch das Verbiegen oder sogar durch das Abschneiden von Bach- und Flussläufen in der Landschaft dokumentiert. Die extreme Trockenheit der Atacamawüste in Nordchile bietet bei der Suche und Erforschung solcher Spuren nahezu perfekte Bedingungen, denn die teilweise in Bruchteilen von Sekunden entstandenen morphologischen Indikatoren bleiben über hunderttausend Jahre lang erhalten. Dies ermöglicht eine nahezu vollständige Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte der AFS.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ haben eine Methode entwickelt, mit der Segmente mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit für eine Reaktivierung ermittelt werden können. Zunächst werden die Oberflächenrupturen entlang der gesamten Störung kartiert und dann deren vertikale Versatzbeträge ermittelt (Abb. 3). Zudem werden Segment-Endpunkte (*tip points*) von Oberflächenrupturen kartiert, da diese die Bruchlänge großer Erdbeben kontrollieren können (Wesnousky, 2006). Empirische Untersuchungen zeigen einen direkten

Abb. 2: a) Typische Landschaftsformen einer durch Erdbeben gebildeten Störung. Die in der Tiefe entstandene Bruchfläche erzeugt an der Oberfläche eine Bruchstufe. Eine seitliche Verschiebung führt zu versetzten Abflussrinnen; b) Bruchstufe an der Mejillones-Störung. Das free face repräsentiert den Vertikalversatz des letzten Erdbebens, wohingegen die slope breaks die vorangegangenen Erdbeben dokumentieren; c) Beispiel einer nur 25 cm hohen Bruchstufe, die sich im Zusammenhang mit dem Antofagasta-Subduktionsbeben 1995 (Mw 8,1) bildete (Fotos: P. Victor, GFZ)

Fig. 2: a) Typical morphological markers for earthquake related ruptures. The rupture plane at depth causes a fault scarp with a free face at the surface in case of vertical displacement. In case of strike-slip motion streams and gullies are offset; b) Normal fault scarp at the Mejillones fault. The free face represents the vertical displacement from the last earthquake rupture, whereas the slope breaks document the penultimate events; c) Example of a 25 cm rupture generated during the 1995 Mw=8.1 Antofagasta earthquake.

Zusammenhang zwischen der Bruchfläche – also der Bruchlänge und dem Versatz – und der Erdbebenmagnitude (Wells und Coppersmith, 1994), der direkt für die Magnitudenabschätzung genutzt werden kann. Vereinfacht heißt das: je länger die kartierte Oberflächenruptur ohne geometrische Komplikationen verläuft und je höher der vertikale Versatz ist, desto größer ist das Potenzial für Erdbeben mit hohen Magnituden. Mit einem quantitativen Ansatz ist es den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am GFZ erstmalig gelungen, die Anzahl von Erdbeben entlang eines mehrfach reaktivierten Störungssegments allein aus topographischen Daten zu ermitteln (Ewiak et al., 2015). Im Zuge dieser Studie gelang es ebenfalls, einen Algorithmus zu entwickeln, der ausschließlich den vertikalen Versatz des letzten Erdbebens automatisch aus topographischen Profilschnitten abtastet und quantifiziert. Daraus kann eine deutlich verbesserte Magnitudenbestimmung erfolgen, als durch die bisher verwendete, kumulative Versatzhöhe (Abb. 3).

Diese neuen Ergebnisse ermöglichen es, zukünftig Aussagen über die prähistorische Erdbebenaktivität an langen und komplexen Störungszonen treffen zu können, die vorher nur durch aufwendige Untersuchungen und lokal begrenzt möglich waren.

## Die Atacama-Störung ruckelt im $\mu\text{m}$ -Maßstab

Zusätzlich zu den Untersuchungen prähistorischer Erdbeben werden die derzeitigen Verschiebungen an der AFS im Rahmen des Integrated Plate Boundary Observatories (IPOC; Victor et al., 2011) mit einem einzigartigen Netzwerk aus Creepmetern überwacht (Abb. 1). Da es Hinweise von anderen Plattenrändern gibt, dass Störungen in der Oberplatte von großen Subduktionsbeben getriggert werden können (Toda und Tatsumi, 2013), wird in diesem Projekt untersucht, wie die verschiedenen Segmente der AFS auf kleine und große Erdbeben reagieren und ob das Phänomen des Triggerns auch in Chile beobachtet werden kann.

Seit November 2008 zeichnen die IPOC-Creepmeter kontinuierlich die Aktivität an vier ausgewählten Störungssegmenten (Abb. 1) auf. Creepmeter funktionieren nach einem simplen

Prinzip: Eine Metallstange ist auf einer Seite der Störung befestigt und kann sich auf der anderen Seite reibungslos bewegen. Dort wird die Bewegung mittels magnetischer Induktion hochpräzise gemessen. Die Messungen erfolgen alle 30 s bei einer Auflösung von etwa 1  $\mu\text{m}$ . Der Aufbau sowie die Technik zur Datenaufnahme, -verarbeitung und Datenübertragung wurde am GFZ speziell für das IPOC-Creepmeter-Netzwerk entwickelt. Die mittlerweile elf Creepmeter arbeiten solar-betrieben, ohne Unterbrechung und nahezu störungsfrei. Ihre Daten werden regelmäßig via Satellit an das GFZ gesendet. Die Creepmeter werden in etwa 50 bis 70 cm Tiefe vergraben, um äußere Einflüsse zu minimieren. Mit Hilfe einer abseits der Störungszone installierten Referenzstation kann festgestellt werden, welche Anteile der Signale tatsächlich mit der Störungsaktivität zusammenhängen und welche auf äußere Einflüsse oder das Instrument selbst zurückzuführen sind. Die Referenzdaten belegen, dass die kurz- und langfristigen Aktivitäten, die mit den IPOC-Creepmetern gemessen werden, in direktem Zusammenhang mit den Störungen stehen.

Die Daten der Stationen zeigen über den bisherigen Beobachtungszeitraum keinen eindeutigen langfristigen Trend, der unmittelbar Hinweise auf eine kontinuierliche Relativbewegung entlang der Störung geben würde (Abb. 4). Solch ein Signal würde bedeuten, dass ein Großteil der Spannung auf der Störung kontinuierlich abgebaut würde, d. h. die Störung kriecht. Die erfassten Signale zeigen stattdessen, dass die AFS verhakt ist und sich dadurch permanent Spannung aufbaut. Dies kann zu elastischen Verformungen in der Oberplatte führen. Die AFS scheint allerdings einen anderen Modus gefunden zu haben, Spannung – zumindest teilweise – abzubauen. Die Zeitreihen zeigen, dass sich auf den beobachteten Störungen plötzliche Sprünge ereignen (*sudden displacement events*). Mit Größen zwischen 1 und 100  $\mu\text{m}$  sind sie zu klein, um einen sichtbaren Versatz an der Oberfläche zu erzeugen. Dank der extrem feinen Auflösung der Instrumente können diese Ereignisse aufgezeichnet und analysiert werden (Abb. 4, 5). Die genaue Untersuchung dieser Ereignisse ergab, dass sie quasi zeitgleich mit oder ein wenig nach einem Subduktionsbeben stattfinden. Erstaunlich ist, dass selbst weit entfernte Erdbeben wie das Maule-Erdbeben 2010, das Tohoku-Erdbeben 2011 und das Ecuador-Erdbeben 2016 plötzliche Versätze an den Störungen auslösen. Dies bedeutet, dass die Atacama-Störung getriggert werden kann, wenn auch über den Beobachtungszeitraum hinweg nur in kleinem Maße. Allerdings zeigen diese weltweit in dieser Präzision erstmalig gemachten Beobachtungen, dass es anscheinend unterschiedliche Trigger-Mechanismen gibt. Dabei spielt die Magnitude und Entfernung des auslösenden Erdbebens höchstwahrscheinlich eine Schlüsselrolle. Erste Korrelationen der Creepmeter-Daten mit den Seismogrammen der auslösenden Erdbeben zeigen, dass z. B. für weit entfernte Beben die sogenannte Oberflächenwelle den Versatz an der AFS auslöst (Abb. 5). Dies deutet auf einen dynamischen Prozess hin.

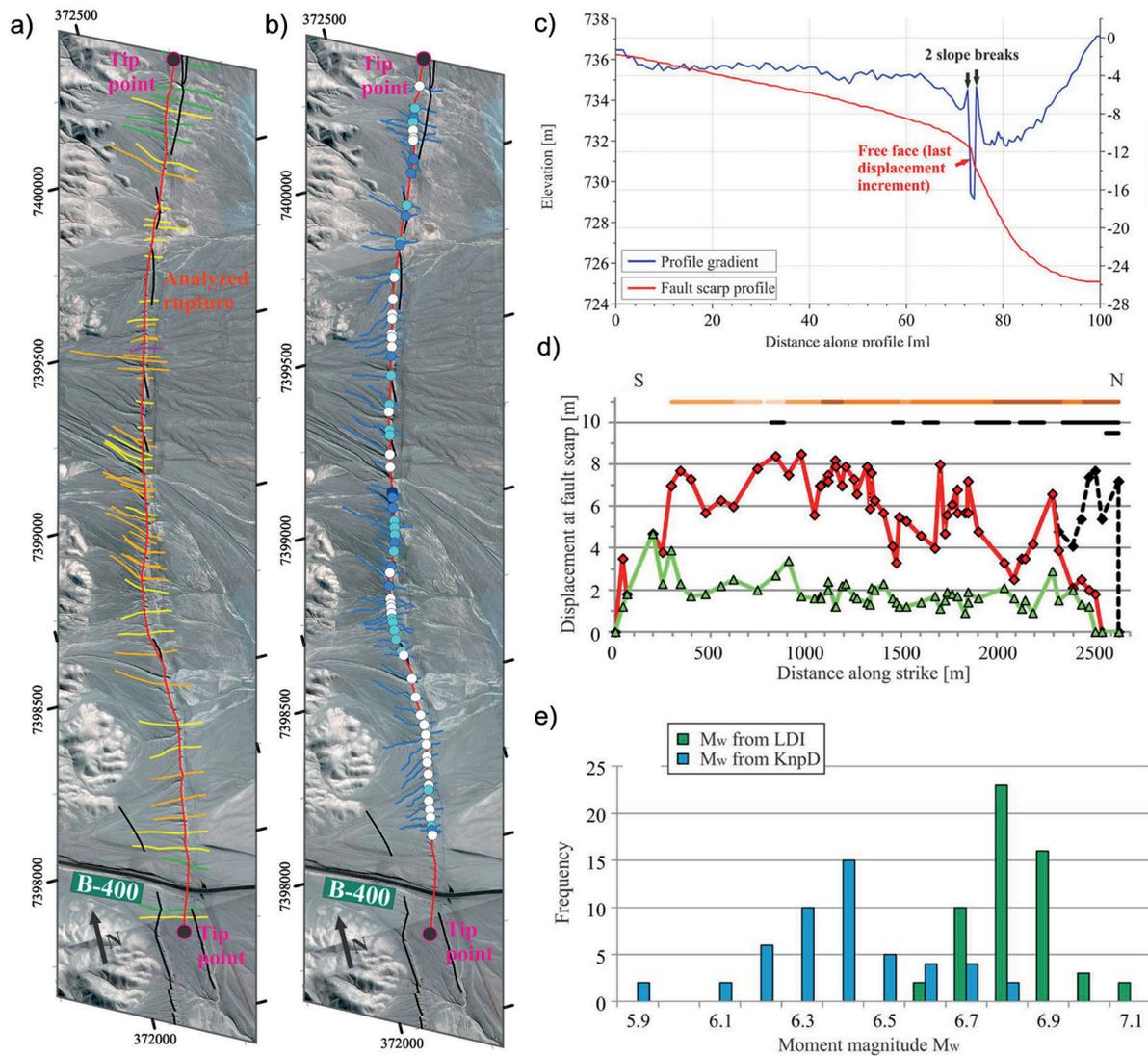


Abb. 3: Auswertung der Bruchstufenmorphologie an der Salar del Carmen-Störung. a) Verlauf des analysierten Bruchs mit hochauflösend vermessenen Querprofilen; b) Analyse der Steilstufen in Erosionsrinnen als Proxy für die Anzahl von Paläoerdbeben; c) automatisiertes Analyseverfahren der Steigungsänderung von topographischen Querprofilen; d) Darstellung des vertikalen Gesamtversatzes (rot) und des Versatzes während des letzten Bebens (grün); e) die Abschätzung der Paläomagnitudo des letzten Erdbebens für diesen Oberflächenbruch liegt zwischen 6,4 und 6,8.

Fig. 3: Investigation of fault scarp morphology of the Salar del Carmen Fault. a) Distribution of surveyed topographic profiles along strike of the rupture; b) Analysis of the number of knickpoints in gullies as proxy for number of paleoearthquakes; c) Automated method to detect gradient changes in topographic fault scarp profiles; d) Plot of the cumulative displacement (red) and the displacement of the last increment (green); e) Estimation of paleomagnitude of the last earthquake along the analyzed rupture ranging from 6.4 to 6.8.

## Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen an der AFS zeigen, dass die Störungen in der Oberplatte extrem aktiv sind. Die hier vorgestellten Beobachtungen an den prähistorischen Oberflächenbrüchen weisen darauf hin, dass diese in den vergangenen 10 000 Jahren mehrfach durch Erdbeben mit einer Magnitude bis zu 7 erschüttert wurden und daher die Wahrscheinlichkeit für eine Reaktivierung nicht unterschätzt werden darf. Die Untersuchung verschiedener Segmente ergab dabei auch, dass es Bereiche gibt, die momentan in einem Schlafmodus

verweilen. Die fundamentale Frage, ob die fehlende Aktivität direkt mit der Segmentierung der Subduktionszone zusammenhängt, soll durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse der direkten Überwachung der Störungen mit dem Creepmeter-Netzwerk des IPOC zeigen eindeutig, dass es eine enge Kopplung zwischen Subduktionsbeben und Versätzen an der AFS gibt. Welche Parameterkonstellationen dabei eventuell für das Auslösen großer Erdbeben in der Oberplatte verantwortlich sein können, wird in Zukunft am GFZ im Fokus dieses zeitskalenübergreifenden Forschungsansatzes stehen.

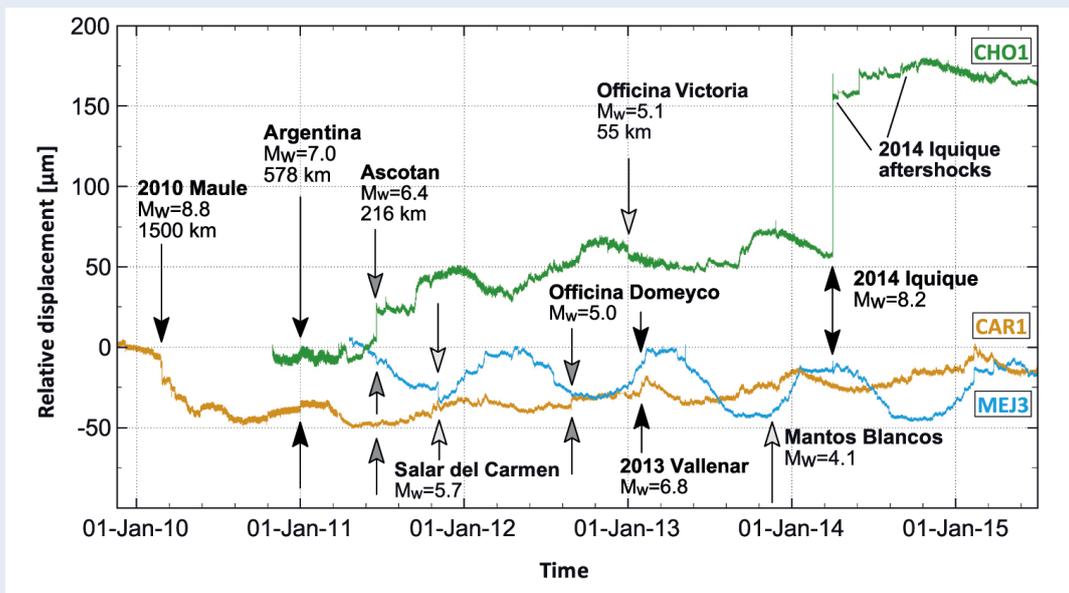


Abb. 4: Zeitreihen von Creepmeter-Messdaten über den Beobachtungszeitraum von fünf Jahren an drei verschiedenen Störungssegmenten. Diese zeigen kleine Versatzereignisse, die durch Subduktionsbeben ausgelöst wurden. Besonders auffällig sind die Versätze, die durch große Erdbeben, wie das Iquique-Erdbeben 2014 oder das Maule-Erdbeben 2010 ausgelöst wurden.

Fig. 4: Time series of creepmeter stations show that subduction zone earthquakes trigger little displacement events. The largest offsets occur remotely triggered by large earthquakes like the 2010 Maule or 2014 Iquique earthquakes.

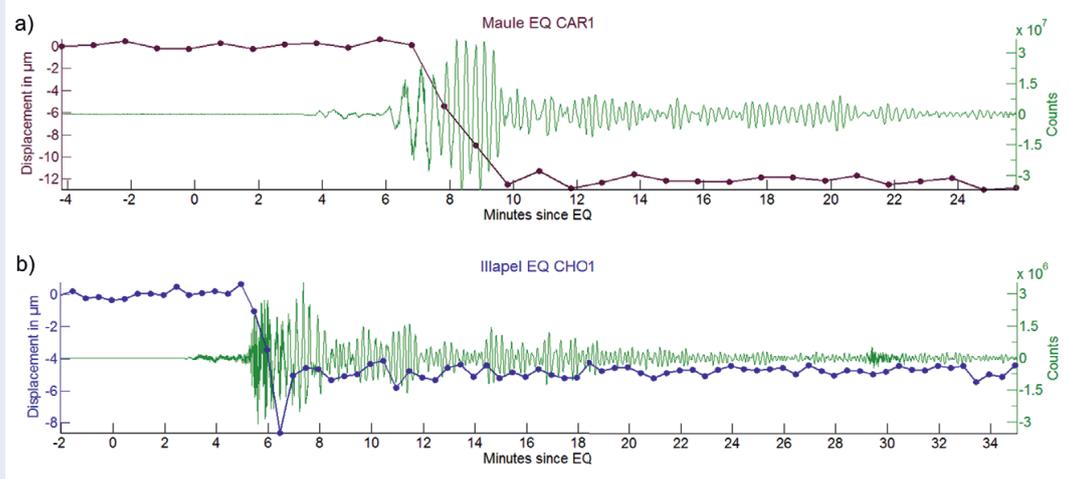


Abb. 5: Beispiele für durch Oberflächenwellen großer Erdbeben ausgelöste Versätze an der AFS, die an den Creepmeter-Stationen aufgezeichnet wurden: a) Das Maule-Erdbeben 2010 ( $M_w$  8,8) in Südchile löste einen kleinen Versatz an der Salar del Carmen-Störung etwa 7 min nach dem Hauptbeben in 1600 km Entfernung aus. Das dazugehörige Seismogramm (grün) zeigt, dass dies zeitgleich mit dem Eintreffen der ersten Oberflächenwellen geschah; b) das Illapel-Erdbeben 2015 ( $M_w$  8,3) löste ebenfalls einen Versatz an der AFS aus. Auch hier ist der Versatz zeitgleich mit dem Eintreffen der Oberflächenwellen des 1100 km entfernten Hauptbebens zu erkennen.

Fig. 5: Examples of remotely triggered fault displacement events recorded on creepmeter stations along the AFS: a) The 2010  $M_w$ =8.8 Maule earthquake in south central Chile triggered fault displacement on every monitored fault during passage of the seismic surface waves. Triggered displacement occurred about 7 min after the mainshock in 1500 km distance; b) The 2015  $M_w$ =8.3 Illapel earthquake likewise triggered surface displacement on the AFS recorded at all creepmeter stations during the passage of the seismic surface wave. Displacement occurred 5 min after the mainshock in 1100 km distance.

## Literatur

- Ewiak, O., Victor, P., Oncken, O. (2015): Investigating multiple fault rupture at the Salar del Carmen segment of the Atacama Fault System (northern Chile): Fault scarp morphology and knickpoint analysis. - *Tectonics*, 34, 2, pp. 187-212.
- 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.
- Toda, S., Tsutsumi, H. (2013): Simultaneous Reactivation of Two, Subparallel, Inland Normal Faults during the Mw 6.6 11 April 2011 Iwaki Earthquake Triggered by the Mw 9.0 Tohoku-oki, Japan, Earthquake. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2B, pp. 1584-1602.
- 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.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994): New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 4, pp. 974-1002.
- Wesnousky, S. G. (2006): Predicting the endpoints of earthquake ruptures. - *Nature*, 444, 7117, pp. 358-360.