

Am Puls der Erde

Natürliche Vibrationen und deren Analyse mit der seismischen Interferometrie

Christoph Sens-Schönfelder¹ und Tom Richter^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin

Mathematical developments summarized as seismic interferometry provide the basis for a multitude of methods to analyze ambient vibrations in seismology. Usually called seismic noise these vibrations are seismic waves excited by wave motion in the oceans, wind, and anthropogenic activity. An intriguing benefit of ambient noise as seismological signal is its permanent availability that allows for a continuous monitoring of wave propagation. Here we present two applications to different environments that investigate dynamic processes in the subsurface. The first application uses the simplicity of a rather exotic environment – the Moon – to relate variations of the seismic velocity in the lunar crust to material change caused by the strong temperature differences between day and night. On Earth the situation is more complex as atmospheric effects and active tectonics also affect the material as demonstrated in the investigation in northern Chile. Here, co-seismic velocity reductions are superimposed on environmental changes of annual periodicity.



Seit Beginn der Registrierung von Erdbeben mit Seismometern war die natürliche Bodenunruhe ein unerwünschter Effekt, der die Detektion und Lokalisierung von Erdbeben erschwerte und Strukturuntersuchungen beeinträchtigte. Diese Sichtweise hat sich in den vergangenen zehn Jahren grundlegend verändert. Die Bodenunruhe wird durch elastische Wellen verursacht, die sich genau wie die von Erdbeben oder künstlichen seismischen Quellen angeregten Wellen im Untergrund ausbreiten. Erst die theoretischen Entwicklungen der seismischen Interferometrie haben dazu geführt, dass Informationen über das Ausbreitungsmedium nicht nur aus Wellenfeldern mit klar identifizierbaren impulsiven Quellen gewonnen werden können, sondern auch aus der Bodenunruhe, deren zahlreiche Quellen sich zeitlich überlagern und räumlich verändern.

Diese Möglichkeit hat zu einer starken Verbesserung Oberflächenwellen-basierter tomographischer Untersuchungen geführt. Sie hat aber durch die permanente Verfügbarkeit des seismischen Umgebungsrauschens auch zu einer vollständig neuen Beobachtungsmethode geführt, die es erlaubt, zeitlich hochaufgelöst geringfügige Veränderungen im Untergrund zu detektieren.

Seismische Interferometrie

Grundlage vieler seismischer Methoden ist die Greensche Funktion der elastischen Wellengleichung für das Untersuchungsmedium. Sie stellt die Impulsantwort $G(\mathbf{A}, \mathbf{B})$, also das Signal dar, das ein Sensor an der Position \mathbf{A} nach einer impulsiven punktförmigen Anregung am Ort \mathbf{B} aufzeichnen würde. Traditionell ist dieses Signal nur durch eine direkte Messung zugänglich, was eine Quelle und einen Empfänger erfordert. Mithilfe der seismischen Interferometrie lässt sich $G(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ aber durch die geeignete Kombination von Signalen beliebiger Quellen an verschiedenen Orten rekonstruieren beziehungsweise mathematisch repräsentieren, wenn diese an den beiden Orten \mathbf{A} und \mathbf{B} aufgezeichnet wurden. Die Geometrie dieser Konfiguration ist in Abb. 1 dargestellt.

Vereinfacht lautet das Repräsentationstheorem für diesen Fall:

$$G(\mathbf{A}, \mathbf{B}) + \hat{G}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \approx \sum_i G(\mathbf{A}, \mathbf{x}_i) \otimes G(\mathbf{B}, \mathbf{x}_i).$$

(Wapenaar et al., 2010). \otimes steht dabei für die mathematisch einfache Operation der Korrelation. $\hat{G}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ stellt das zeitlich am Nullpunkt gespiegelte Signal dar. Praktisch müssen also nur die Korrelationen der Registrierungen vieler Quellen an \mathbf{A} und \mathbf{B} summiert werden, um das gewünschte Signal zu erhalten. Der Vorteil, das Signal $G(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ durch eine Kombination vieler anderer Signale auszudrücken, besteht nun darin, dass an die seismischen Quellen nahezu keine Anforderungen gestellt werden müssen. Sie können sich in beliebiger Distanz und Richtung befinden und sich sogar zeitlich überlagern, ihre Signale müssen nur an den beiden Lokationen \mathbf{A} und \mathbf{B} registriert werden. Die natürliche Bodenunruhe ist für diesen Zweck ideal geeignet.

Anschaulich lässt sich die seismische Interferometrie als Filter erklären. Die Bodenunruhe stellt eine vielfältige Mischung aus Wellen dar, welche in allen möglichen Richtungen durch das Medium laufen. Die seismische Interferometrie filtert diejenigen Anteile heraus, die nacheinander beide Empfänger passieren. Die zwei Terme auf der linken Seite des obigen Repräsentationstheorems stammen bei dieser Interpretation von Anteilen des Wellenfelds, die entweder erst von Seismometer \mathbf{A} und anschließend von Seismometer \mathbf{B} aufgezeichnet werden oder erst von \mathbf{B} und dann von \mathbf{A} . Im folgenden wird der Begriff Korrelationsfunktionen für die Zusammensetzung der rekonstruierten Greenschen Funktion und deren zeitlich gespiegelter Version verwendet.

Da sich auf diese Weise mit zwei Empfängern ein Signal erzeugen lässt, für dessen direkte Messung man eine geeignete Quelle benötigen würde, kann man mithilfe der Interferometrie virtuelle Quellen erzeugen. In der Seismologie ist das von entscheidender Bedeutung, denn die Installation von seismischen Stationen ist erprobte Grundlage eines jeden seismologischen Experiments, Erdbeben als Quellen entziehen sich dagegen jeder Kontrolle. Durch dieses neue Anwendungsgebiet hat sich die Nutzung seismischer Daten stark erweitert. Zugleich werden auch neue Anforderungen an die Rechenleistung gestellt, denn die Volumina der Datenströme bewegen sich jenseits der Terabyte-Linie. Zwar werden – algorithmisch sehr einfach – die Daten korreliert, aber der Vorteil, die Datenmenge durch die Korrelation zu verringern, löst sich durch die paarweise Operation schnell wieder auf, da die Anzahl der Korrelationssignale mit dem Quadrat der Stationsanzahl ansteigt.

Links: Installation einer Creepmeter-Messstation im Integrated Plate boundary Observatory Chile (IPOC) (Foto: T. Richter, GFZ)

Left: Installation of a creep-meter measurement device within the Integrated Plate boundary Observatory Chile (IPOC)



Kontakt: Ch. Sens-Schönfelder
(sens-schoenfelder@gfz-potsdam.de)

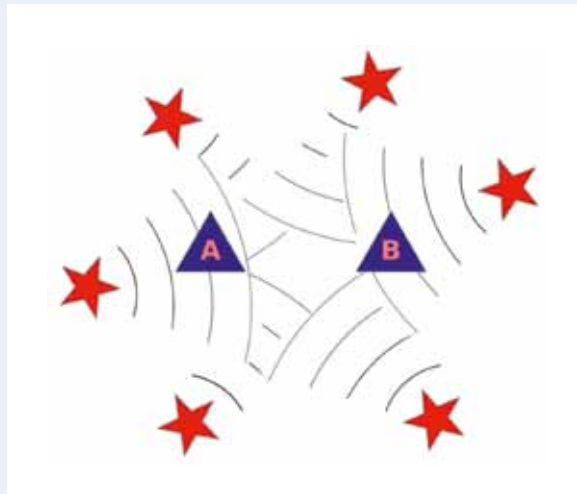


Abb. 1: Illustration der konventionellen (links) und der interferometrischen (rechts) Konfiguration für die Messung des Signals, das eine am Ort B befindliche Quelle am Ort A erzeugt. In der konventionellen Konfiguration ist eine seismische Quelle (Stern) am Ort B und ein Seismometer (Dreieck) am Ort A erforderlich. Die Konfiguration für die interferometrische Messung dagegen erfordert die Installation von Seismometern an beiden Orten A und B und seismische Quellen, die beliebig im Umfeld des Messgebiets verteilt sein können.

Fig. 1: Illustration of the conventional (left) and interferometric (right) configuration for the measurement of the signal recorded at A from an excitation by a source at B. The conventional configuration requires a source (star) at location B and a seismometer (triangle) at location A. Instead the interferometric measurements require the installation of two sensors at both locations A and B together with seismic sources distributed arbitrarily in the surroundings.

Monitoring

Die Möglichkeit, das durch natürliche Quellen kontinuierlich angeregte seismische Rauschen für seismologische Untersuchungen zu nutzen, hat der Seismologie eine neue Dimension eröffnet: die Zeit.

Konventionelle seismologische Untersuchungen des Untergrunds, die auf aktiven Quellen beruhen, erfordern entweder einen hohen finanziellen und logistischen Aufwand, wenn es sich um künstliche Quellen wie Sprengungen handelt, oder sie erfordern in der passiven Seismologie einen langen Untersuchungszeitraum, wenn sie Erdbebensignale nutzen, da letztere unkontrolliert auftreten und das Experiment solange eingerichtet bleiben muss, bis geeignete Ereignisse auftreten. In beiden Fällen handelt es sich jedoch um eine zeitliche Punktmessung; eine Untersuchung von zeitlichen Veränderungen des Untergrunds ist schwierig, weil aktive Wiederholungsmessungen den hohen Aufwand nur in Ausnahmefällen – zum Beispiel zur Reservoirüberwachung – rechtfertigen, und die Nutzung von Erdbeben mit langen Untersuchungszeiten nur eine sehr eingeschränkte zeitliche Auflösung zulässt.

Das seismische Rauschen als Signalquelle erlaubt dagegen eine kontinuierliche Messung mit hoher zeitlicher Auflösung ohne jegliche Kosten für aktive Quellen. Damit erschließt sich der Seismologie die Möglichkeit, zusätzlich zur Struktur des Untergrunds auch dessen Dynamik zu untersuchen und Prozesse zu studieren, die das Ausbreitungsverhalten seismischer Wellen beeinflussen. Wie auch bei Strukturuntersuchungen ist die Geschwindigkeit der seismischen Wellen dabei der wichtigste Parameter. Da die Geschwindigkeitsverteilung des Untergrunds verhältnismäßig stabil ist, wird die Untersuchung zeitlicher Veränderungen besonders dann effektiv, wenn die hohe und kontinuierliche zeitliche Auflösung mit einer hohen Präzision kombiniert wird. Die mit direkten Wellen erreichbare Genauigkeit im Bereich von wenigen Prozent reicht dafür nicht aus. Es ist aber seit den Neunzigerjahren bekannt, dass gestreute seismische Wellen, die längere Zeit durch den Untergrund laufen, eine sehr viel höhere Sensitivität gegenüber geringfügigen Veränderungen haben. Solche Wellen treten im Anhang der auf direktem Weg laufenden P- und S-Phasen auf und werden als seismische Coda registriert. Durch die längere Laufzeit der Codawellen steigern sich geringe Geschwindigkeitsänderungen zu deutlichen Laufzeitänderungen die es

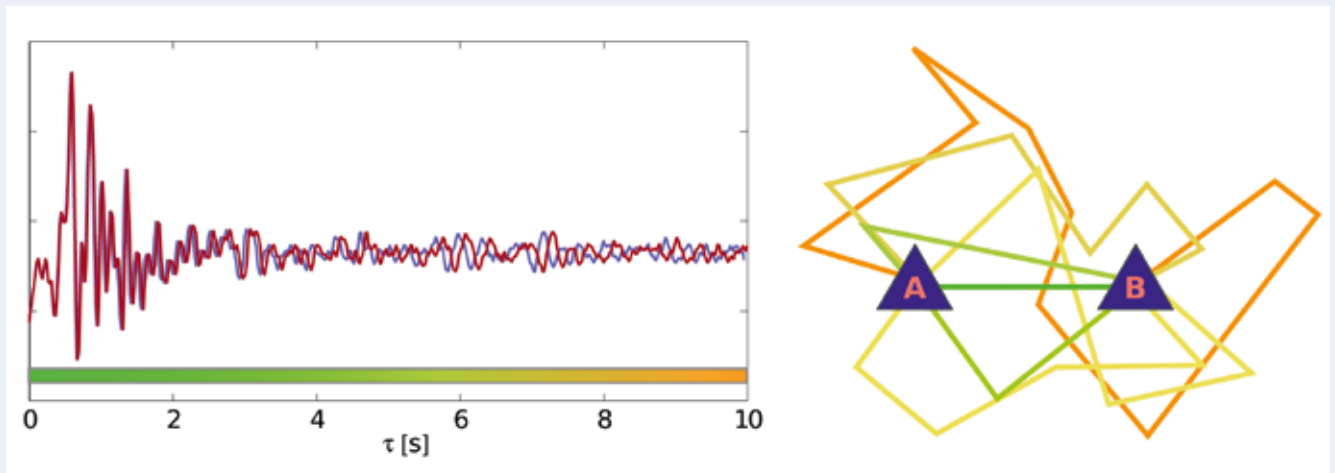


Abb. 2: Codawellen-Interferometrie: Wellenformen der Korrelationsfunktion eines Stationspaars sind für zwei verschiedene Untergrundgeschwindigkeiten (rote und blaue Kurve) im linken Teil mit farbcodierter Zeitachse dargestellt. Die Farbe der im rechten Teil angedeuteten Laufwege entspricht der Laufzeit dieser Wellen. Die Differenz der Wellengeschwindigkeiten führt in der Korrelationsfunktion zu einer zunehmenden Phasenverschiebung der beiden Signale zu größeren Laufzeiten und damit zu einer größeren Genauigkeit bei der Messung der Geschwindigkeitsdifferenz.

Fig. 2: Coda wave interferometry: Correlation functions of one station pair are shown for two different subsurface velocities (red and blue curves) in the left part with a color coded time axis. Right part illustrates possible wave paths colored according to their travel time. The difference in the wave speed leads to an increasing phase shift in the correlation functions that allows for high precision measurements of velocity variations.

erlauben, relative Änderungen mit einer Genauigkeit von unter 0,1 % zu messen (Abb. 2).

Dieser Ansatz, die gestreuten Wellen in den durch Korrelation des seismischen Rauschens erzeugten Signalen zur Untersuchung von zeitlichen Veränderungen der seismischen Geschwindigkeiten zu nutzen, hat zu einer Fülle von Untersuchungen in ganz verschiedenen Regionen geführt (Sens-Schönfelder und Wegler, 2011). Im folgenden werden zwei Beispiele dargestellt, die in sehr unterschiedlichen Situationen einen Beitrag zum Verständnis dynamischer Prozesse im Untergrund liefern.

Geschwindigkeitsänderungen an der Mondoberfläche

Eine Untersuchung, die den Erkenntnisgewinn der methodischen Entwicklungen im Bereich des Monitorings mit seismischer Interferometrie verdeutlicht, ist die Analyse der fast 40 Jahre alten seismischen Aufzeichnungen vom Mond.

Im Zuge der Apollo 17-Mission wurden auf dem Mond Seismometer für aktive Experimente mit Explosionsquellen zur Erkundung des flachen Untergrunds installiert. Nach Abschluss der aktiven Experimente wurden über einen Zeitraum von acht Monaten Dauerregistrierungen vorgenommen. Die Konfiguration des Experiments ist in Abb. 3 dargestellt.

Mittels interferometrischer Prozessierung wurden aus den Daten der Bodenerdbeben die Greenschen Funktionen für die Laufwege zwischen den einzelnen Seismometern rekonstruiert (Abb. 3). Deutlich zu erkennen sind darin die energiereichen Oberflächenwellen, die paarweise mit positiven und negativen Laufzeiten auftreten. Durch die kontinuierliche Bodenerdbeben, die auf dem Mond durch thermische Spannungen verursacht wird, können diese Signale zur Messung von Geschwindigkeitsvariationen verwendet werden. In Abb. 4 sind die Korrelationsfunktionen dargestellt, die aus jeweils 24 Stunden seismischen Rauschens an den Stationen G3 und G4 erstellt wurden. Zusätzlich zu der bereits in Abb. 3 erkennbaren Struktur lassen sich nun zeitliche Veränderungen beobachten.

Obwohl die deutlichsten Veränderungen der Korrelationsfunktionen im Zusammenhang mit den Anregungsprozessen des Rauschens stehen, bringt eine genaue Analyse der Wellenformen mittels Codawellen-Interferometrie Veränderungen der seismischen Geschwindigkeiten zutage, die einem im folgenden beschriebenen Prozess an der Mondoberfläche zuzuordnen sind. Abb. 4 stellt diese Veränderungen über den Verlauf der acht Mondphasen dar. Es zeigt sich ein charakteristischer Verlauf mit sinkender seismischer Geschwindigkeit während des Mondtags, minimaler Geschwindigkeit zum Sonnenuntergang und ansteigender Geschwindigkeit im Verlauf der Mondnacht. Diese Charakteristik legt einen Zusammenhang mit der Temperatur der Mondoberfläche nahe. Mit den Materialparametern, die durch die thermischen Experimenten der Apollo-Mission gewonnen wurden, lässt sich aus der Sonneneinstrahlung der Tagesgang der Geschwindigkeitsvariationen modellieren (Sens-Schönfelder und Larose, 2010). Ein weiterer Hinweis auf die Temperatur als Ursache der seismischen Geschwindigkeitsänderungen stammt von deren Maxima. Diese zeigen im Verlauf der acht Mondphasen eine gleichmäßige Veränderung mit größten Amplituden im Januar, die in ihrer Phasenlage mit den Schwankungen des Abstands zwischen Sonne und Mond und den sich daraus ergebenden Änderungen der Sonneneinstrahlung übereinstimmen (Abb. 4).

Erdbeben-initiierte und saisonale Geschwindigkeitsänderungen in Chile

Aktive Tektonik und klimatische Einwirkungen beeinflussen die Geschwindigkeit seismischer Wellen auf der Erde in sehr viel komplexerer Weise, als das auf dem Mond der Fall ist. In Nordchile, einer der aktivsten Erdbebenregionen der Welt, betreibt das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ zusammen mit dem Institut de Physique du Globe Paris (IPGP) und mehreren chilenischen Partneruniversitäten das Integrated Plate boundary Observatory Chile (IPOC). Nach dem Starkbeben bei Concepción am 27. Februar 2010 befindet sich dieses geophysikalische Observatorium in der letzten verbliebenen seismischen Lücke der chilenischen Subduktionszone. Das letzte Starkbeben fand hier vor über 130 Jahren statt und es wird erwartet, dass in den nächsten Jahren ein starkes Erdbeben die seitdem aufgestauten Spannungen entlädt. Der seismologische Teil des IPOC-Netzwerks besteht momentan aus 20 Breitband-Seismografen, die teilweise seit 2006 ununterbrochen betrieben werden. Das Medium in der Umgebung der einzelnen Stationen wurde mithilfe von täglich konstruierten Autokorrelationsfunktionen auf Geschwindigkeitsänderungen analysiert. Die Autokorrelation bildet in obigem Repräsentationstheorem den Sonderfall mit identischen Orten **A** und **B**. Die Auswertung zeigt, dass die Geschwindigkeit im Medium aufgrund lokaler Erdbeben sprunghaft sinkt und im Lauf der

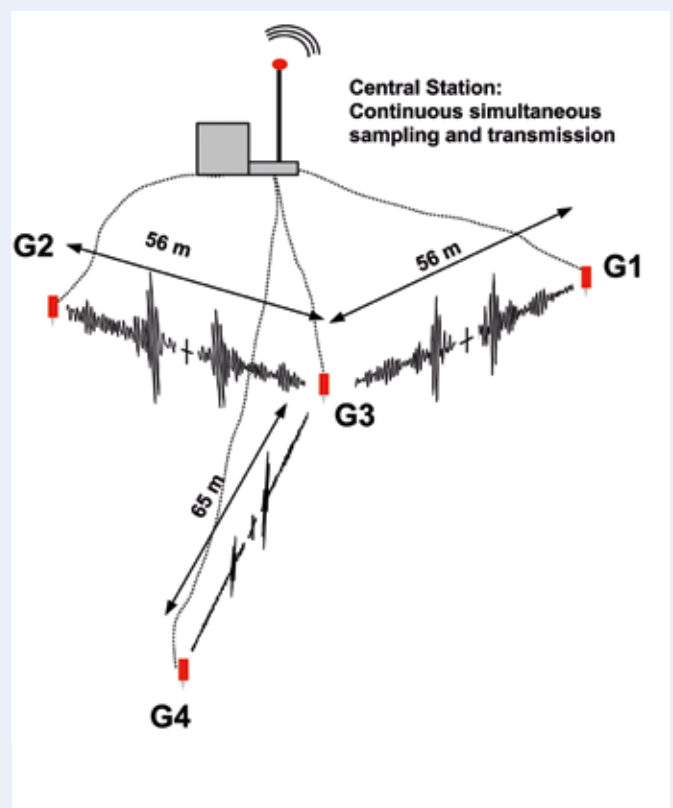


Abb. 3: Stationskonfiguration des Apollo 17 Lunar Seismic Profiling-Experiments (LSPE), für das von August 1976 bis April 1977 kontinuierliche Daten des seismischen Rauschens vorliegen. G1 bis G4 bezeichnen die Seismometer. Zwischen den Seismometern sind die gemittelten Korrelationsfunktionen dargestellt.

Fig. 3: Station configuration of the Apollo 17 Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE) that acquired continuous data of seismic noise from August 1976 through April 1977. G1 through G4 indicate seismometers. Averaged correlation functions are drawn between the seismometers.

nächsten Tage wieder langsam auf das Ursprungsniveau zurückkehrt. Abb. 5 zeigt die Amplitude dieses Effekts an den verschiedenen Stationen für das Erdbeben bei Tocopilla am 14. November 2007 in zwei Frequenzbereichen.

Eine besondere Rolle fällt der Station bei Patache (PATCX) zu: Aufgrund der lokalen Geologie reagiert diese Station besonders sensibel (Abb. 6). Dabei überlagern sich drei verschiedene Effekte. Erstens bestand eine sprunghafte Geschwindigkeitsabnahme mit dem Tocopilla-Erdbeben, die erst

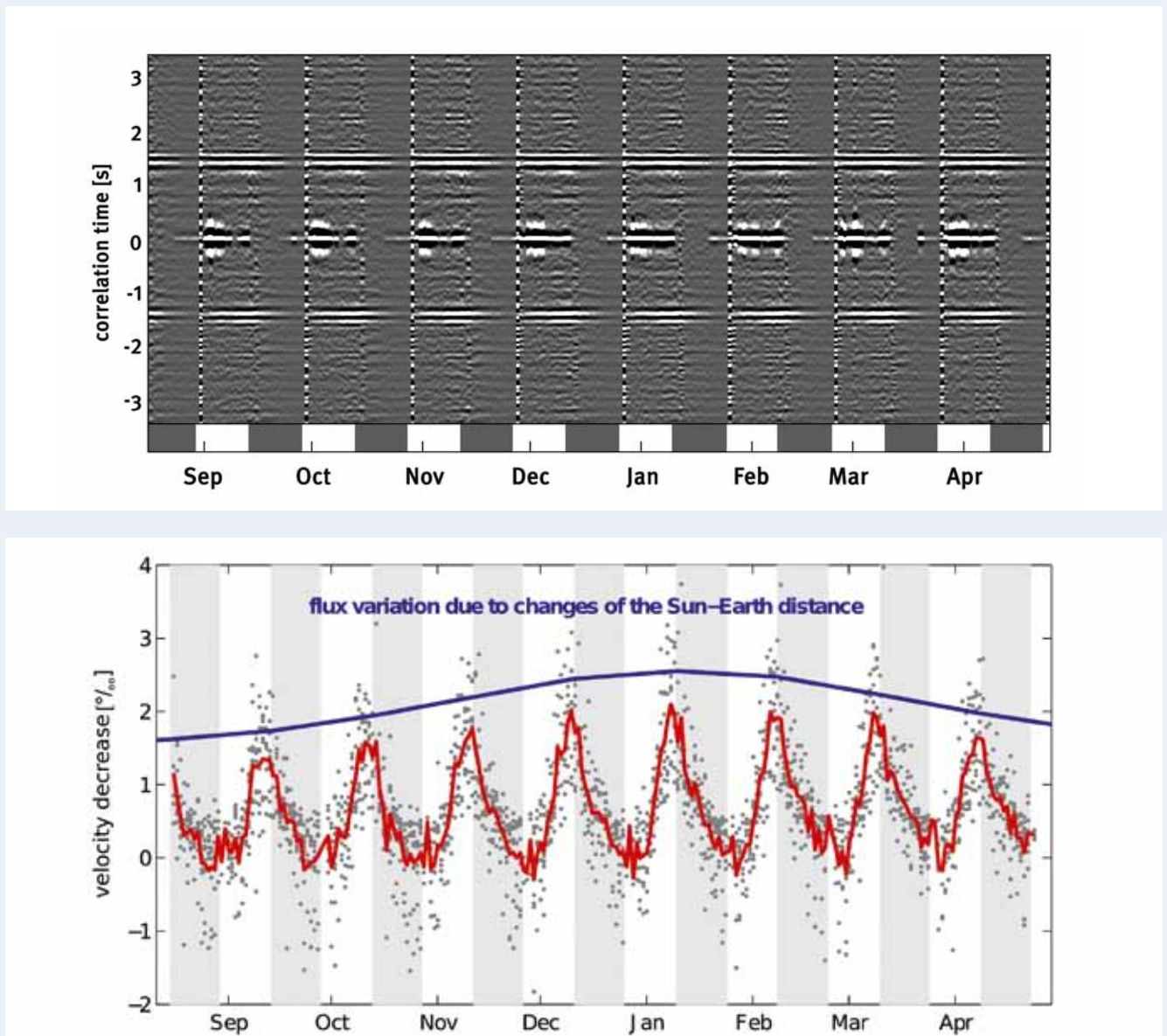


Abb. 4: Korrelationsfunktionen des Seismometerpaars G₃–G₄ für je 24 h seismisches Rauschen (oben) und gemessene Geschwindigkeitsänderungen (unten). Grau hinterlegt sind Zeiten ohne Sonneneinstrahlung. Deutlich zu erkennen sind im oberen Bild die kohärenten Oberflächenwellen bei $\pm 1,5$ s. In der unteren Abbildung stellen graue Punkte Messungen an verschiedenen Seismometerkombinationen und die rote Kurve deren Mittelwert dar. Die blaue Kurve gibt die Variationen der solaren Strahlungsleistung aufgrund der Abstandsänderung zwischen Sonne und Mond an.

Fig. 4: Correlation functions of the sensor pair G₃–G₄ for 24 h segments of seismic noise (top) and estimated velocity variations (bottom). Gray background indicates times without sunlight on the instruments. The coherent surface waves at ± 1.5 s are clearly visible. In the lower figure gray dots indicate individual measurements of different sensor combinations and the red curve indicates the average. The blue curve shows the variation of the solar irradiation due to changes of the distance between the Sun and Moon.

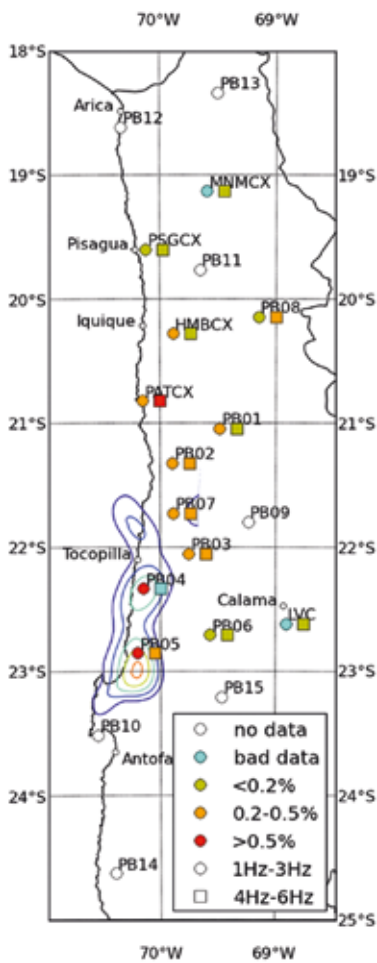


Abb. 5: Seismologischer Teil des IPOC-Netzwerks mit farblich codierter relativer Geschwindigkeitsreduktion in zwei verschiedenen Frequenzbändern aufgrund des Erdbebens bei Tocopilla (links). Isolinien markieren die Verschiebung auf der Bruchfläche von 0,5 m bis 3 m nach Schurr et al. (2012). Eine Abnahme der seismischen Geschwindigkeit von über 0,5 % ist an den zwei unmittelbar in der Bruchzone liegenden Stationen sowie an der sensitiven Station bei Patache zu beobachten. Rechts: Seismische Station des IPOC-Netzwerks (Foto: T. Richter, GFZ)

Fig. 5: Seismological part of the IPOC-network with color-coded velocity reductions caused by the Tocopilla earthquake from November 14, 2007 in two distinct frequency bands (left). Slip model according to Schurr et al. (2012) is indicated for slip from 0.5 m up to 3 m. A reduction of the seismic velocity above 0.5% is found at the two stations within the rupture area and at the sensitive station Patache. Right: Seismic station of the IPOC-network

innerhalb von zwei Jahren wieder zurückging. Der zweite Effekt ist eine jahreszeitliche Schwankung der Geschwindigkeit, welche diese sprunghafte Geschwindigkeitszunahme überlagert. Dabei sind im chilenischen Sommer hohe Geschwindigkeiten und im Winter niedrige Geschwindigkeiten zu beobachten. Der dritte Effekt besteht aus der schon erwähnten kurzfristigen Geschwindigkeitsabnahme aufgrund lokaler Erdbeben. Die beiden Erdbebeneffekte ergeben für die Station bei Patache eine Geschwindigkeitsabnahme von insgesamt 1,1 %. Mithilfe der Frequenzabhängigkeit kann die jahreszeitliche Änderung

auf einen oberflächennahen Prozess zurückgeführt werden. Dies verstärkt die Vermutung, dass Temperatur- und Spannungsschwankungen in der obersten Schicht des nahen Salar Grande für die beobachteten periodischen Geschwindigkeitsänderungen verantwortlich sind.

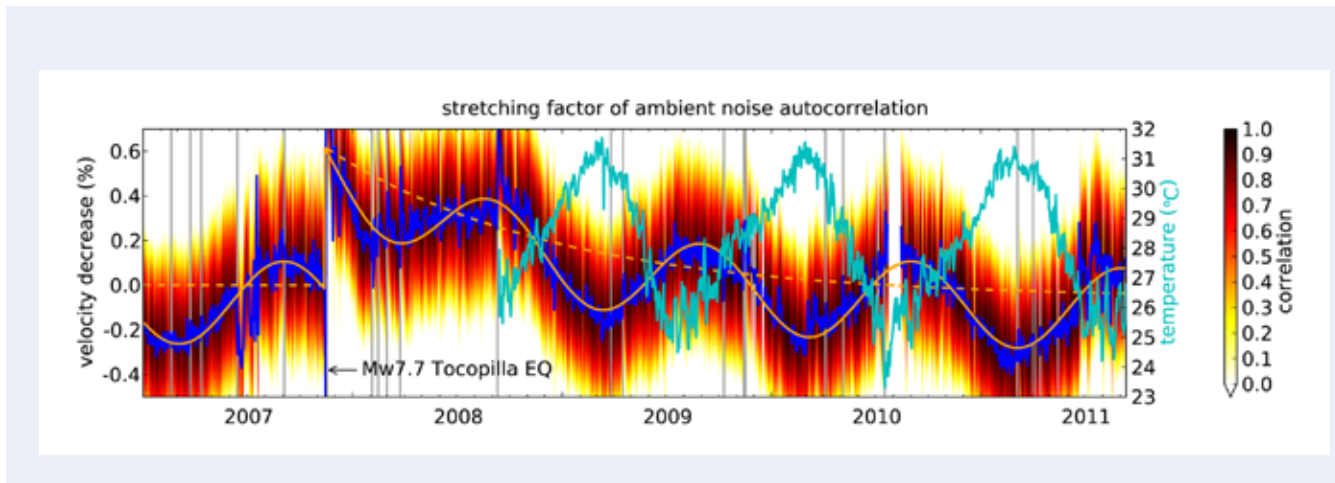


Abb. 6: Beobachtete Geschwindigkeitsänderung für die Station bei Patache (blaue Linie). Tage, in denen lokale Erdbeben mit einer Magnitude größer als 5,5 auftraten, sind mit vertikalen, grauen Linien gekennzeichnet. Zu beobachten sind drei verschiedene Effekte: 1. kurzfristige Geschwindigkeitsabnahmen aufgrund lokaler und regionaler Erdbeben, 2. längerfristige Geschwindigkeitszunahme nach der Geschwindigkeitsreduktion im Zuge des Tocopilla-Erdbebens (gestrichelte, orange Linie), 3. eine periodische Geschwindigkeitsänderung aufgrund des Klimaeinflusses (vergleiche mit eingezeichnetem Temperaturgang).

Fig. 6: Velocity variation observed at the station Patache (blue line). Days with local earthquakes of magnitude above 5.5 are marked by vertical gray lines. Three effects may be observed: 1st: short term velocity reductions after local earthquakes, 2nd: long term velocity increase as recovery after the co-seismic velocity drop of the Tocopilla event, 3rd: periodic velocity variation caused by climatic influences (compare indicated temperature variations).

Ausblick

Die mathematischen Methoden der seismischen Interferometrie zur Analyse des seismischen Rauschens haben die Möglichkeit zur Strukturuntersuchung des Untergrunds verbessert und die zeitliche Überwachung von Prozessen in der Erde ermöglicht. Diese Methoden sind bereits etabliert. Die Entwicklung in der seismischen Interferometrie hält aber an und verspricht für die Zukunft neue Erkenntnisse in der Seismologie.

Literatur

- Schurr, B., Asch, G., Rosenau, M., Wang, R., Oncken, O., Barrientos, S., Salazar, P., Vilotte, J. P. (2012): The 2007 M7.7 Tocopilla northern Chile earthquake sequence: Implications for along-strike and downdip rupture segmentation and megathrust frictional behavior. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B5, 10.1029/2011JB009030.
- Sens-Schönfelder, C., Larose, E. (2010): Lunar noise correlation, imaging and monitoring. - *Earthquake Science*, 23, 5, 519-530, 10.1007/s11589-010-0750-6.
- Sens-Schönfelder, C., Wegler, U. (2011): Passive image interferometry for monitoring crustal changes with ambient seismic noise. - *Comptes Rendus Geoscience*, 343, 8-9, 639-651, 10.1016/j.crte.2011.02.005.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., Verdel, A. (2010): Tutorial on seismic interferometry : Part 1 — Basic principles and applications. - *Geophysics*, 75, 5, 75A195-75A209, 10.1190/1.3457445.