

Die vielfältigen Anwendungsfelder der Seismologie

Frederik Tilmann

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Seismology is often associated with the investigation of earthquake processes and indeed this is a very important target of the science. However, seismology is also the primary means by which we can obtain images of the internal structure of the Earth on all scales, ranging from the deep interior, i.e. the Earth's core and lower mantle over the mantle lithosphere and crust, the scale at which plate tectonics 'happens' all the way to the unconsolidated material in the near-surface. Seismology uses earthquakes and artificial sources as signal generators but also the ambient background wavefield, previously considered to be merely noise. Methodological and instrumental innovations have allowed ever more detailed investigations of the earthquake process and the seismic structure, and opened up new targets such as as the monitoring of geomorphological events and investigations of the time-dependency of seismic structure. Finally seismology is not restricted to waveform analysis and the instrumental period but draws on historical data and, in the field of paleoseismology, geological markers to constrain seismic activity in the pre-instrumental past. Direct societal benefits from seismology accrue for example from improved seismic hazard estimates and early-warning technologies in the area of natural hazards, from improved recovery and usage of natural resources, including geothermal energy as a sustainable energy source and much more, e.g. the possibility to monitor and thus enforce compliance with the nuclear test ban treaty.



Die Seismologie, also die Lehre von Erdbeben und der Ausbreitung elastischer Wellen, wurde im 19. Jahrhundert als quantitative Wissenschaft etabliert. Pionierarbeit hierzu leistete der irische Ingenieur Robert Mallet, der auch das Wort „Seismologie“ prägte. Nach der Entwicklung eines ersten Seismographen in 1875 zeigte die erste Aufnahme eines Fernbebens in 1889 die globalen Anwendungsmöglichkeiten der jungen Wissenschaft: der Astronom Ernst von Rebeur-Paschwitz (Abb. 1) hatte mit seinen Instrumenten in Wilhelmshaven und in Potsdam auf dem heutigen Gelände des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ ein Erdbeben aus Japan aufgenommen und ermittelte eine erste Abschätzung der Geschwindigkeit von Oberflächenwellen. Ausgehend von dieser Beobachtung propagierte Rebeur-Paschwitz die Idee eines weltweit operierenden Stationsnetzes, das seit Beginn des 20. Jahrhunderts quantitative Analysen von Großbeben ermöglichte. Ein weiterer wichtiger Schritt war der Aufbau des standardisierten Worldwide Seismic Networks in den 1960er Jahren, das grundlegende Beobachtungsdaten von global verteilten Erdbeben moderater Stärke lieferte und damit der Theorie der Plattentektonik den Weg bereitet hat. Die Digitalisierung in den 1980er Jahren ermöglichte die Prozessierung größerer Datenmengen. In den letzten zwei Jahrzehnten kam es zu einem explosionsartigen Anstieg der Zahl von permanent operierenden seismischen Sensoren. Das GEOFON-Netz des GFZ trägt mit 78 Stationen weltweit zu diesem globalen Instrument bei, das aus hunderten von Stationen besteht (Abb. 2); ergänzt durch die Daten der GFZ-Erdsystemobservatorien an Plattengrenzen (PBO) und temporäre Experimente kann so eine hohe Auflösung für fokussierte Studien erreicht werden (z. B. *Victor et al., 2011*).

Obwohl sich das Funktionsprinzip seismologischer Instrumente seit 100 Jahren nicht grundlegend geändert hat (*Haberland et al., 2016*), ergibt sich durch die Miniaturisierung der Instrumente die Möglichkeit, groß angelegte Feldexperimente mit Hilfe Hunderter mobiler Sensoren durchzuführen, oder sogar die Sensoren in Bohrlöcher einzubringen und damit näher an die Erdbebenquellen heranzukommen (*Bohnhoff et al., 2014*). Ziel der Untersuchungen kann entweder die Verteilung und Bruchprozesse der Erdbeben an sich sein, oder die Abbildung der Untergrundstruktur, wobei mit denselben Daten meist

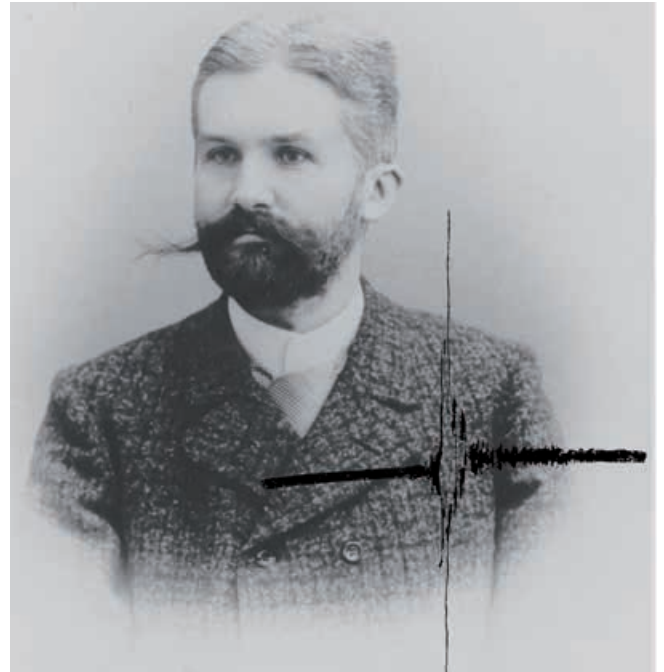


Abb. 1: Ernst von Rebeur-Paschwitz, dem 1889 in Potsdam die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens gelang

Fig. 1: Ernst von Rebeur-Paschwitz, who successfully completed the world's first remote recording of an earthquake in 1889 in Potsdam

beide Aspekte betrachtet werden. Bei Strukturuntersuchungen werden sowohl natürliche (kleinere Erdbeben oder Wellen von weltweit auftretenden Beben) als auch künstliche Quellen (z. B. kontrollierte Explosionen oder Hammerschläge) ausgewertet. Hierbei bedient man sich zweier Grundprinzipien: Zum einen kann man die Zeiten messen, zu denen verschiedene Wellentypen an den Stationen ankommen und daraus bei geeigneter Verteilung der Quellen und Stationen die Variationen der Geschwindigkeiten im Untergrund rekonstruieren. Diese seismische Tomographie (Abb. 3C) ähnelt dem Prinzip der Röntgentomographie in der Medizin. Zum anderen werden seismische Wellen reflektiert, oder von Kompressions- in Scherwellen (Transversalwellen) oder umgekehrt konvertiert, wenn sie im Untergrund auf eine Schichtgrenze stoßen, an der sich die elastischen Eigenschaften des Gesteins ändern. Aufzeichnungen der reflektierten oder konvertierten Wellen können benutzt werden, um ein Bild der Struktur des Untergrunds zu erzeugen (Abb. 3B), vergleichbar mit dem Einsatz von Ultraschall in der medizinischen Diagnostik. Meist werden beide Ansätze in Kombination verwendet.

In der Auflösung von Krusten- oder Sedimentstrukturen kommt meist Seismik, d. h. Seismologie mit künstlichen Quellen zum Einsatz (*Bauer et al., 2016*). Die aufgelösten Strukturen geben Aufschluss über die Lage von Verwerfungen oder die Stratigraphie, während die aus der Tomographie

Links: Installation einer seismischen Station des AlpArray-Experiments in einem Tunnel in Österreich (Foto: T. Zieke, GFZ)

Left: A station of the AlpArray experiment is installed in a tunnel in Austria



Kontakt: F. Tilmann
(frederik.tilmann@gfz-potsdam.de)

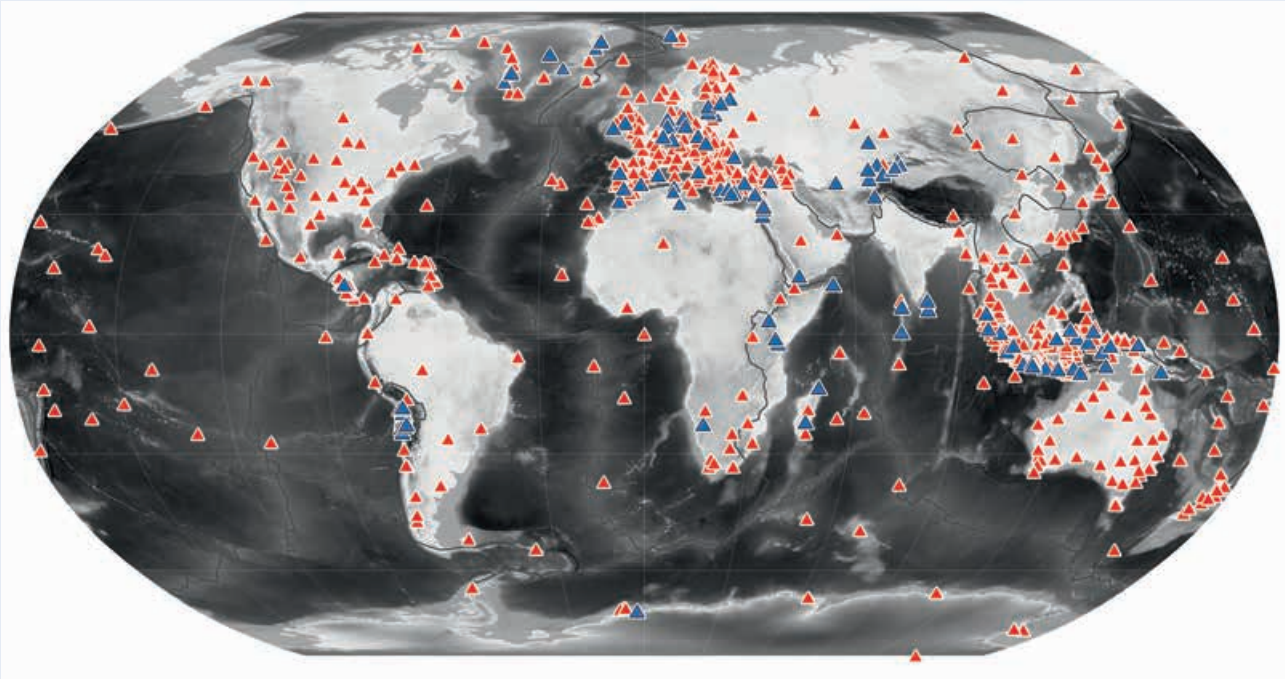


Abb. 2: Karte der Stationen, die zum GEOFON-Monitoring beitragen (blaue Dreiecke: Stationen, die das GFZ mit seinen Partnern betreibt (GEOFON-Stationen und PBO-Stationen; rote Dreiecke: Netze anderer Institutionen). Die Zahl der Stationen mit offen zugänglichen Daten ist noch erheblich größer als hier gezeigt.

Fig. 2: Distribution of stations contributing to GEOFON earthquake monitoring (blue triangles: GEOFON and GFZ PBO stations; red triangles: networks from other institutions). The total number of openly accessible stations is still much larger than shown here.

gewonnenen Geschwindigkeitsinformationen Rückschlüsse auf Gesteinstypen, Temperaturen oder das Vorhandensein von Fluiden zulassen. Diese Methoden sind auch essentiell für die Rohstoff-Exploration, wobei mit modernen Methoden das ganze Wellenfeld abgetastet wird und Modelle von solcher Auflösung erstellt werden, dass begrabene fossile Landschaften rekonstruiert und Lagerstätten identifiziert werden können. Wenn die Mantellithosphäre untersucht oder die Position der kontinentalen Mohorovičić-Diskontinuität flächig kartiert werden sollen, werden aufgrund ihrer höheren Energie und daher Eindringtiefe Erdbebenaufzeichnungen analysiert. Hiermit lassen sich z. B. die geodynamischen Vorgänge bei der kontinentalen Kollision von Indien und Eurasien rekonstruieren (Kind et al., 2012; Schurr et al., 2013). Dieser Prozess ist der letztendliche Auslöser für viele Erdbebenkatastrophen, wie das katastrophale Kaschmir-Beben von 2005 und das Nepal-Beben von 2015. Noch größere Beben in dieser diffusen Kollisionszone bedrohen die dicht besiedelten Regionen in der Ganges-Ebene. Die beschriebenen Abbildungsverfahren kommen darüber hinaus auch in der Vulkaneismologie zum Einsatz (Dahm et al., 2016).

Neben den künstlichen und natürlichen Quellen ist die Nutzung einer dritten Form seismischer Energie in den letzten zehn Jahren zum Arsenal der Seismologie hinzugekommen: das kontinuierliche seismische Hintergrundrauschen, das hauptsächlich durch Meereswellen, aber auch durch atmosphärische Prozesse und nicht zuletzt durch menschliche Quellen wie den Verkehr angeregt wird. Bei der Untersuchung von Erdbebendaten wird dieses Rauschen als Störfaktor wahrgenommen, aber es enthält Informationen über den Aufbau der Erde, die sich mit dem Prozessieren von kontinuierlichen Datenströmen extrahieren lassen. Oft werden bei Strukturuntersuchungen alle Signalquellentypen kombiniert, wobei das Hintergrundrauschen besonders wichtig zur Rekonstruktion der flachen Krustenstruktur ist, also z. B. der Mächtigkeit von Sedimentbecken. Sens-Schönfelder und Snieder (2016) zeigen, dass auch die Anwendung auf die tiefe Erde möglich ist. Dieselbe Methode kann zugleich auf viel kleineren Skalen verwendet werden, um z. B. das Altern von Zement in Bauwerken zu überwachen.

Während in der klassischen Seismologie die Geschwindigkeitsstruktur normalerweise als statisch angesehen wird, ist die Untersuchung des seismischen Hintergrundrauschens

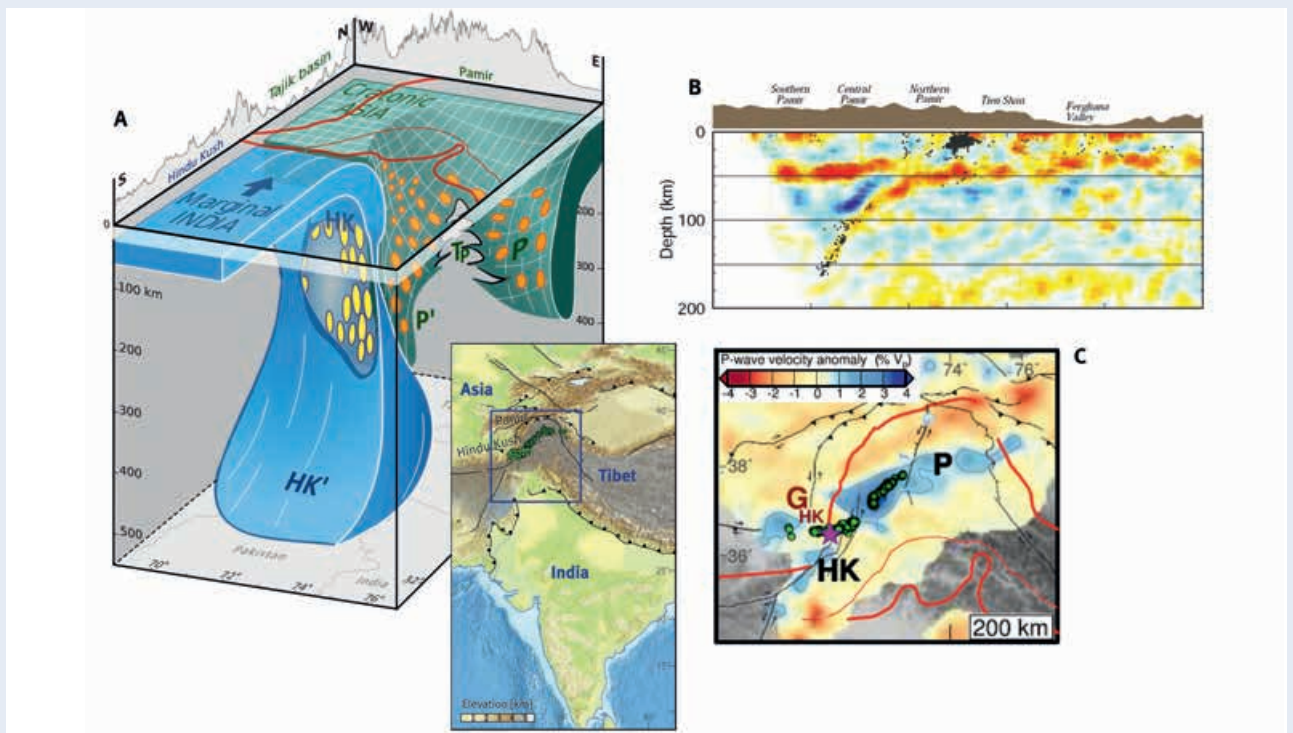


Abb. 3: Beispiel der Kombination verschiedener seismologischer Techniken zu Untersuchungen der Manteltektonik unterhalb der Gebirge des Pamir und Hindukush (HK). (A) Schematisches Bild der nordwärts gerichteten Subduktion von Indien als Ursache der Seismizität unterhalb des Hindukush (gelbe Ellipsen), und südwärts gerichtete Subduktion von Asien als Ursache der Seismizität unter dem Pamir (blaue Ellipsen; blaues Rechteck in kleiner Karte zeigt Untersuchungsgebiet). Die Situation im Hindukush stellt eine geologische Momentaufnahme der Platte während des Auseinanderreißen dar, ein Prozess, der oft postuliert wird, aber nur selten wie hier direkt beobachtet werden konnte. (B) Abbild der Struktur mit Hilfe von konvertierten Wellen. Farben geben die Stärke der konvertierten Wellen an und sind ein Maß für die Stärke des Kontrasts der elastischen Eigenschaften. Die geneigte Zone von Erdbeben (schwarze Punkte) in Tiefen von 100 bis 160 km und die geneigten parallelen blauen und roten Zonen (am deutlichsten in 50-100 km Tiefe) zeigen die Position der subduzierenden kontinentalen Unterkruste an (C) Schnitt durch tomographisches Modell in 200 km Tiefe. Blaue Regionen stellen Zonen höherer seismischer Geschwindigkeit dar und zeigen die Position der subduzierten Platten an, innerhalb derer die Temperatur niedriger ist. Grüne Punkte stellen Erdbeben dar. (Abb. A und C aus Kufner et al., 2016, Abb. B aus Schneider, 2013)

Fig. 3: Different seismological techniques are employed to examine the mantle tectonics below the Pamir and Hindukush (A) Cartoon of plate configuration. The Hindukush slab results from northward-directed subduction of India and the Pamir slab results from southward-directed subduction of Asia. (B) Structural image based on the stacking of converted waves. The dipping layer of earthquakes (black circles) and the dipping parallel blue and red zones indicate the position of the subducted lower crust. (C) Map view of tomographic model at 200 km depth.

nicht abhängig von natürlich auftretenden oder teuren künstlichen Quellen. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten in der Untersuchung der zeitabhängigen Veränderung der Geschwindigkeitsverteilungen. Mit Hilfe von Interferometrie konnten kleinste Veränderungen der Wellengeschwindigkeiten im Zehntel-Prozent-Bereich nachgewiesen werden, wobei sowohl saisonale Einflüsse als auch der Effekt von Erschütterungen durch größere und kleinere Erdbeben (z. B. *Sens-Schönfelder und Richter, 2013*) nachweisbar sind.

Untersuchungen der seismischen Quellen können verwendet werden, um Einsichten in den Erdbebenprozess zu gewinnen,

sowohl durch die detaillierte Analyse des Bruchprozesses großer Beben (*Tilmann et al., 2016*) als auch durch die Beobachtung von Erdbeben über viele Größenordnungen: von tektonischen Beben, die mit regionalen Netzwerken aufgezeichnet werden über kleinere Beben, die nur mit Bohrlochseismometern oder durch Installationen in tiefen Minen detektiert werden können, bis hin zu kontrollierten Experimenten an Gesteinsblöcken im Labor (*Bohnhoff et al., 2016*). Die Verteilung häufig auftretender kleinerer Beben kann zusammen mit den eben beschriebenen Strukturuntersuchungen Aufschluss über tektonische Vorgänge geben, z. B. indem es die Position von subduzierenden Platten anzeigt (Anwendung auf die Kollision

von Indien und Asien: *Schurr et al., 2013* und Abb. 3 A). Indirekt kann so auch auf die Temperatur geschlossen werden, da in Mantelgesteinen Erdbeben normalerweise nur bei Temperaturen unter 650 °C entstehen können. Bestimmte Erdbeben-typen sind zudem für bestimmte Spannungszustände charakteristisch. So führt Kompression zu Aufschiebungsbeben, bei der sich eine Seite der Verwerfung über die andere schiebt – die Situation z. B. an der Hauptverwerfung in Subduktions-zonen. Bei Zugspannung treten dagegen Abschiebungen auf, also das Absacken einer Seite der Verwerfung gegenüber der anderen; diese Situation tritt auch bei der Grabenbildung auf, beispielsweise am ostafrikanischen Rift oder auch am Rhein-graben. Man kann daher aus den Bruchmechanismen vieler Beben den Spannungszustand der Erde rekonstruieren. Dies wird genutzt, um zusammen mit anderen Daten in der World Stress Map (*Heidbach et al., 2009*) global den Spannungszu-stand an der Erdoberfläche zu beschreiben. Aus Vergleichen der Mechanismen kleinerer Beben vor und nach großen Beben lässt sich der Abbau an Scherspannung durch vorangegange- ne Großbeben quantifizieren (*Tilmann et al., 2016*).

Die langfristige Erdbebenaktivität wird in Katalogen zusam- mengefasst. Mit Hilfe dieser Kataloge wird die Wahr- scheinlichkeit zukünftiger Beben abgeschätzt. Damit ist die Zuver- lässigkeit der Kataloge eine Grundvoraussetzung der seismi- schen Gefährdungsabschätzung. Diese wird mit empirischen oder Szenario basierten Abschätzungen kombiniert, welche Beschleunigungen Beben definierter Magnitude verursachen können, denn Bauingenieure als Endnutzer von seismischen Gefährdungsanalysen wollen wissen, gegen welche Bodenbe- schleunigungen sie Bauwerke absichern müssen. Als neuere Entwicklung ergänzt hier die zeitabhängige Gefährdungsab- schätzung die klassische Annahme einer statischen Gefähr- dungslage (*Schorlemmer et al., 2016*). Seismische Zyklen, also die Zeiträume, über die sich Spannung aufbaut und in größeren Erdbeben wieder abgebaut wird, sind häufig erheb- lich länger als die instrumentelle Beobachtungszeit, die nur etwas über hundert Jahre umfasst. Dies gilt insbesondere im kontinentalen Bereich, wo die Relativbewegung verschiedener Platten oft über hunderte oder tausend Kilometer weite diffuse Deformationszonen verteilt wird und daher jede einzelne Ver- werfung nur sehr selten aktiviert wird. Das Vorhandensein guter historischer Kataloge, also Informationen über präinstru- mentelle Erdbebenaufzeichnungen aus historischen Quellen, stellt daher eine Grundvoraussetzung für zuverlässige Gefähr- dungsabschätzungen dar (*Schellbach und Grünthal, 2016*). In der Paläoseismologie werden geologische Marker verwendet, um vergangene Erdbebengeschichte zu rekonstruieren.

Die Gefährdung durch natürliche Erdbeben lässt sich nicht be- einflussen, aber Mitigationsmaßnahmen können das Risiko, das von ihnen ausgeht, mindern. Neben den schon erwähnten Baumaßnahmen ist der Einsatz von Frühwarnsystemen eine Möglichkeit zur Verringerung von Erdbebenschäden. Hierbei geht es explizit nicht um Vorhersage, sondern man macht

sich die Tatsache zu Nutze, dass die Schäden verursachen- den Scher- und Oberflächenwellen erst mit einer gewissen Verzögerung gegenüber den schnelleren Kompressionswellen in gefährdeten Städten eintreffen, zumindest, wenn der Erd- bebenherd sich nicht in unmittelbarer Nähe befindet. Diese Verzögerung lässt sich nutzen, um eine Warnzeit von maxi- mal einigen Zehnersekunden zu gewinnen, was rudimentäre Schutzmaßnahmen wie das Anhalten von Zügen, Sperren von Brücken, Stoppen von gefährlichen industriellen Prozessen ermöglicht. *Parolai et al. (2016)* beschreibt die Entwicklung eines solchen Systems für Zentralasien.

Durch menschliche Aktivitäten ausgelöste Erdbeben, soge- nannte induzierte Seismizität, ist in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Die Nutzung geother- mischer Energie und die unterirdische Verpressung der bei Fracking entstehenden großen Menge an Abwasser sind die wichtigsten Ursachen von fühlbarer induzierter Seismizität, während das eigentliche Fracking im Normalfall nur kleine Erdbeben weit unter der Wahrnehmungsschwelle erzeugt. Im Osten von Nordamerika lässt sich sogar das Gros der Seis- mizität in den letzten zehn Jahren auf menschliche Einflüsse zurückführen (*Ellsworth, 2013*). Die langjährigen Erfahrungen in der Analyse natürlicher Beben erlauben es, Prozeduren zu entwickeln, die eine Nutzung der Wärmeenergie der Erde ermöglichen und gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit eines in- duzierten Schadenbebens sehr gering halten. Zudem können die Methoden der Erdbebenanalyse angewendet werden, um Nukleartests zu detektieren und von natürlichen Erdbeben zu unterscheiden; tatsächlich kommt am GFZ für die Erdbeben- beobachtung entwickelte Software auch an anderen Instituten bei der Überwachung des Vertrags zum Nuklearwaffentest- stopp zum Einsatz.

Neben Erdbeben und Explosionen können auch ganz anders- artige seismische Signale untersucht werden. Zum Beispiel werden Anwendungen im Bereich der Erosionsforschung seit kurzem eingesetzt. Der Ansatz hat ein hohes Potenzial zur räumlich/zeitlichen Eingrenzung von Erosionsereignissen wie Steinfällen, Landrutschen und Transport von Geröll in reißen- den Flüssen (*Turowski et al., 2016*).

Neue instrumentelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Seis- mologie sind der Einsatz von GPS-Stationen, um dynamische Signale auch für sehr starke Bodenunruhen aufzunehmen (*Tilmann et al., 2016*), die Verwendung von Glasfaserkabeln, die die Messung von dynamischen Bodenverformung prak- tisch kontinuierlich entlang der Messstrecke ermöglichen (*Haberland et al. 2016*) und lokale Messungen der Rotation, die insbesondere Informationen über die Struktur in der Nähe des Messgeräts liefern. Großangelegte, in internationalen Kooperationen durchgeführte Messkampagnen mit Hunderten und in Zukunft bald Tausenden von Instrumenten versprechen neuartige Erkenntnisse aufgrund der Möglichkeit, das ge- samte seismische Wellenfeld aufnehmen und modellieren zu

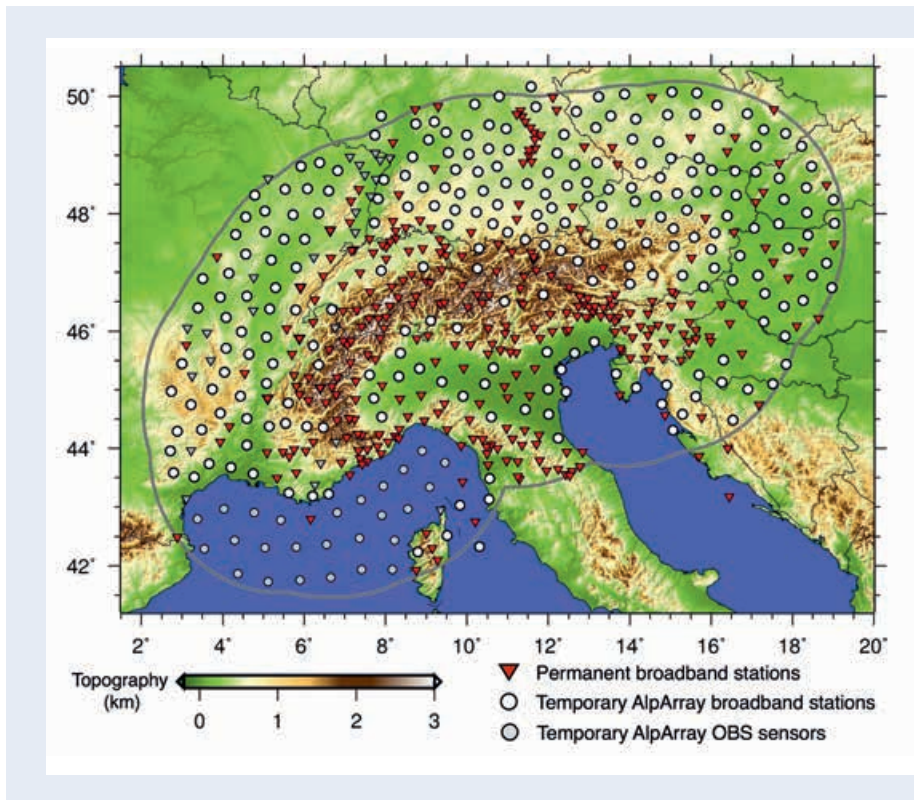


Abb. 4: Übersicht über Stationen des AlpArray-Experiments. Die dichte Abdeckung wird es erlauben, die komplizierte Konfiguration der verschiedenen Mikroplatten unter den Alpen aufzulösen und neue Erkenntnisse über seismische Gefährdung, petrologische und geomorphologische Prozesse zu erlangen. (Grafik: AlpArray Working Group, www.alparray.ethz.ch)

Fig. 4: Station distribution in the AlpArray experiment

können. Ein Beispiel ist die europäische Kooperation im AlpArray-Experiment, mit dem der Aufbau der Alpen im Untergrund mit Hilfe dichter Seismometerarrays genau analysiert wird (Abb. 4). Flankierende geodätische, geologische und geomorphologische Beobachtungen werden eine Rekonstruktion der geologischen Werdegeschichte sowie eine differenzierte Gefährdungsabschätzung für die dicht besiedelten Alpen und die Sedimentbecken des Alpenvorlands erlauben.

Literatur

- Bohnhoff, M., Raub, C., Bulut, F., Prevedel, B., Dresen, G., Malin, P. E. (2014): Langzeitüberwachung von Erdbebenzonen durch den Einsatz von Bohrlochseismometern. - *System Erde*, 4, 1, pp. 14–21.
- Ellsworth, W. L. (2013): Injection-induced earthquakes. - *Science*, 341, 6142, 1225942.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B. (2009): The World Stress Map Based on the Database Release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Paris: Commission for the Geological Map of the World.
- Kufner, S.-K., Schurr, B., Sippl, C., Yuan, X., Ratschbacher, L., Akbar, A. s. M., Ischuk, A., Murodkulov, S., Schneider, F. M., Mechie, J., Tilmann, F. (2016): Deep India meets deep Asia: Lithospheric indentation, delamination and break-off under Pamir and Hindu Kush (Central Asia). - *Earth and Planetary Science Letters*, 435, pp. 171–184.
- Kind, R., Tilmann, F., Mechie, J., Pandey, S., Kumar, P. (2012): Tibet: die größte Kollision auf der Erde. - *System Erde*, 2, 2, pp. 24–31.
- 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.
- Schneider, F. M. (2014): Imaging an intra-continental subduction in Central Asia with teleseismic receiver functions, PhD Thesis, (Scientific Technical Report; 14/06), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 179 p.
- Sens-Schönfelder, C., Eulenfeld [Richter], T. (2013): Am Puls der Erde: natürliche Vibrationen und deren Analyse mit der seismischen Interferometrie. - *System Erde*, 3, 1, pp. 32–39.
- 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.

Zitierte Beiträge in dieser Ausgabe des GFZ-Journals

„System Erde“ (2016), Heft 1:

- Bauer et al.: „Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen“, S. 12–17
- Sens-Schönfelder und Snieder: „Die Streuung des globalen seismischen Wellenfelds“, S. 18–23
- Tilmann et al.: „Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben“ S. 24–31
- Parolai et al.: „Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit“, S. 32–37
- Schorlemmer et al.: „Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben“, S. 38–43
- Schellbach und Grünthal: „Historische Seismologie“, S. 44–49
- Bohnhoff et al.: „Von der Gesteinsprobe bis zur Plattengrenze: Skalenübergreifende Analyse von Bruchprozessen“, S. 50–55
- Turowski et al.: „Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft“, S. 56–61
- Dahm et al.: „Vulkanseismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane“, S. 62–67
- Haberland et al.: „Trends in seismologischer Instrumentierung“, S. 68–73