

Langzeitüberwachung von Erdbebenzonen durch den Einsatz von Bohrlochseismometern

Marco Bohnhoff^{1,2}, Christina Raub¹, Fatih Bulut¹, Bernhard Prevedel¹, Georg Dresen¹, Peter E. Malin³

¹ Deutsches Geoforschungszentrum GFZ, Potsdam

² Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Berlin

³ IESE, University of Auckland, Neuseeland

The use of down-hole seismic instrumentation provides substantial benefits with regard to signal quality and reduced magnitude detection threshold in earthquake monitoring. This is mainly due to reduced levels of ambient and anthropogenic noise with depth, especially within the uppermost few hundred meters. Installing vertical arrays of seismometers in boreholes also allows including the depth as third dimension in addition to surface-based measurements. The installation procedure and selection of the depth of sensors in a borehole can range from quasi-permanent installations, with a retrieving option, to permanently cemented sensors in place. While sensor layouts generally depend on the boundary conditions of a specific project and are a compromise given the substantial drilling costs involved, the improvements in noise reduction generally open new windows in earthquake seismology and geomechanical reservoir monitoring. The current installation of highly sensitive down-hole seismometer arrays in monitoring wells around the eastern Sea of Marmara in Turkey (ICDP-GONAF project) and their integration into the local seismic network for monitoring the activity along the Princes Islands segment of the North Anatolian Fault Zone are discussed and first down-hole sensor responses are presented.



Die zunehmend genauere Erfassung der globalen Seismizität hat über die vergangenen Jahrzehnte dazu geführt, dass die seismisch aktiven Bereiche auf der Erdoberfläche heute zum größten Teil identifiziert und ihre Mechanismen gut verstanden sind. Etwa 90 % aller Erdbeben treten entlang der Ränder von Kontinentalplatten auf. Dort kommt es entweder zu Aufschiebungsbeben durch Kompression (Gebirgsbildung, Subduktion), Abschiebungsbeben durch Dehnung (Mittelozeanische Rücken, kontinentale Riftsysteme) oder Seitenverschiebungen, wenn sich zwei Kontinentalplatten aneinander vorbeischieben. Lediglich Regionen mit starken Erdbeben innerhalb von einzelnen Platten (Intraplattenbeben) sind bis heute unvollständig kartiert und noch nicht gut erforscht, weil sie mit Wiederkehrperioden von meist mehreren hundert Jahren – bedingt durch sehr geringe Deformationsraten – nur sehr selten auftreten.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ untersucht im Rahmen seiner Erdsystem-Observatorien die Seismizität ausgewählter erdbebengefährdeter Regionen. Ziel ist dabei, die von solchen Naturgefahren ausgehenden Georisiken zu reduzieren. Für die Abschätzung des Erdbebenrisikos einer bestimmten Region ist es wichtig, möglichst viele und möglichst kleine Erdbeben zu erfassen. Zudem sollten die erfassten Erdbeben mit hoher Genauigkeit räumlich lokalisiert werden können. Im Kontext der Erfassung möglichst kleiner Beben ist die Gutenberg-Richter-Relation von fundamentaler Bedeutung (*Gutenberg & Richter, 1941*). Sie besagt, dass die Zahl auftretender Erdbeben mit abnehmender Magnitude zunimmt; und zwar um den Faktor zehn pro Größenordnung in der Magnitude. Daraus folgt, dass bei der kleinsten gerade noch messbaren Erdbebenmagnitude (Detektionsschwelle) eines seismischen Messnetzes von z. B. $M=3$ bei Erfassung eines M_3 -Erdbebens auch zehn Erdbeben der Magnitude $M=2$, hundert Erdbeben der Magnitude $M=1$ usw. auftreten, die aber von den Seismometern nicht detektiert werden können. Der Grund dafür ist eine im Vergleich zum Rauschpegel an den Sensoren zu kleine Signalamplitude. Um die Magnituden-Detektionsschwelle eines seismischen Netzes zu senken, sind zwei Parameter von fundamentaler Bedeutung: der Rauschpegel am Seismometer und die Entfernung der Seismometer zum Hypozentrum.

Links: Impression nächtlicher Bohrarbeiten im Rahmen des GONAF-Observatoriums (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault) auf der Armutlu-Halbinsel in der Nordwest-Türkei (Foto: P. Malin, University of Auckland, Neuseeland)

Left: Impressions from night-time drilling in the frame of the GONAF project (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault) on the Armutlu peninsula in northwestern Turkey

Die einfachste Maßnahme, die Magnituden-Detektionsschwelle lokal zu senken, ist eine Erhöhung der Stationsdichte im Messgebiet. Dadurch wird die mittlere Entfernung der Stationen für Erdbeben, die innerhalb des Netzes auftreten, verringert. Jeder Installation einer Seismometerstation geht zudem eine Charakterisierung des Standorts voraus, um den rauschärmsten Standort in einem vordefinierten Areal zu finden, d. h. möglichst weit von anthropogenen Geräuschquellen wie Siedlungen, Autobahnen, Stromtrassen und Industrieanlagen entfernt. Darüber hinaus wird man einen Ort mit relativ festem Stationsuntergrund auswählen, um eine gute Ankopplung des Sensors an den Untergrund zu gewährleisten. Felsgestein bietet generell bessere Registrierbedingungen als beispielsweise Ackerboden (Abb. 1a). Diesem Optimierungsprozess an der Erdoberfläche sind jedoch dahingehend Grenzen gesetzt, dass anthropogene, aber auch natürliche Geräuschquellen wie z. B. Wetter nicht gänzlich zu eliminieren sind, aber zum Teil mit dem Frequenzbereich der zu messenden Signale von lokalen Erdbeben (etwa 1 bis 100 Hz) überlappen. Zudem herrscht auf der Erdoberfläche generell ein gewisser Hintergrundrauschpegel, der maßgeblich vom Meeresrauschen der Ozeane generiert wird. Er liegt allerdings im Frequenzbereich von etwa 0,14 Hz und damit außerhalb des Frequenzspektrums von Wellenformensignaturen lokaler Seismizität.

Genauere Messungen mit Bohrlochseismometern

Die einzige Möglichkeit, die Magnituden-Detektionsschwelle eines Seismometernetzes substanziell weiter zu senken, ist der Einsatz von Bohrlochseismometern. Dadurch ergeben sich folgende Vorteile: Zum Einen wird der Hintergrundrauschpegel mit zunehmender Einsatztiefe reduziert, da der anthropogene Rauschpegel sowie der Einfluss durch Wetter wesentlich verringert bzw. eliminiert wird (Abb. 1a). Auch die Amplitude des Meeresrauschens nimmt mit der Tiefe ab. Dadurch erhöht sich automatisch das Verhältnis von Nutz- zu Störsignal (engl. Signal to Noise Ratio – SNR), welches das entscheidende Qualitätskriterium einer seismischen Wellenformregistrierung darstellt. Zugleich werden Streueffekte der seismischen Wellen in den oberflächennahen (Verwitterungs-) Schichten vermieden, was die Erfassung deutlicherer Wellenformensignaturen mit höherer Amplitude und damit eine genauere Hypozentrenbestimmung sowie auch das Messen höherfrequenter Signalanteile ermöglicht.

In Ergänzung zu den beschriebenen Effekten spielt beim Einsatz von Seismometern in Bohrungen auch die Verringerung der Entfernung zwischen Sensor und seismischer Quelle eine Rolle, denn die absolute Signalstärke der elastischen Raumwellenamplitude (P- und S-Wellen) nimmt aufgrund der geometrischen



Kontakt: M. Bohnhoff
(marco.bohnhoff@gfz-potsdam.de)

a)

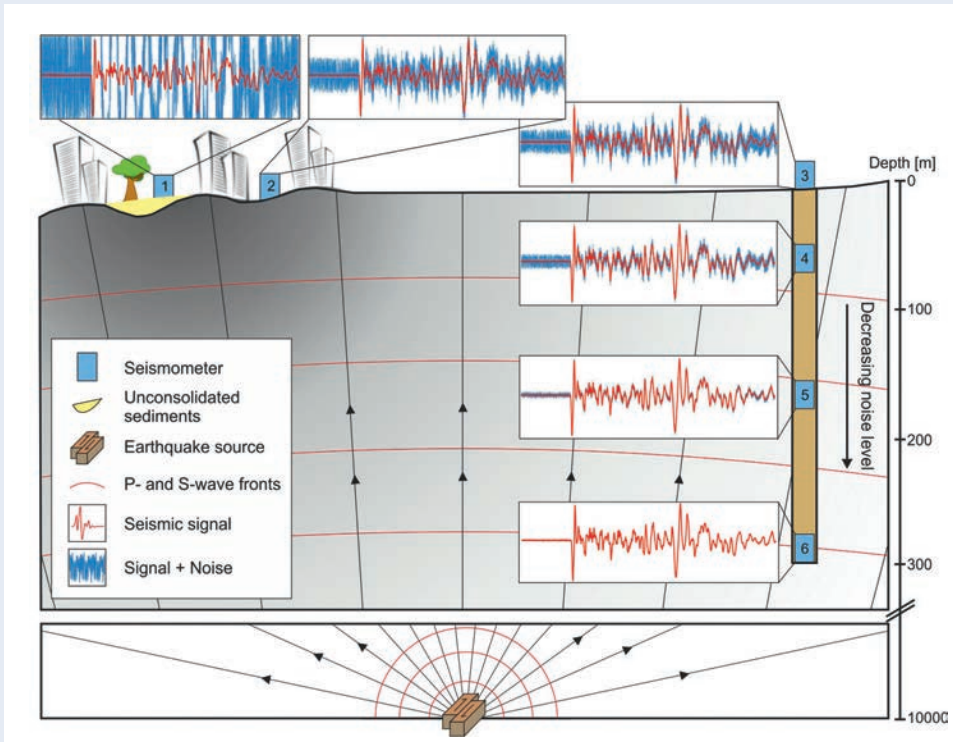
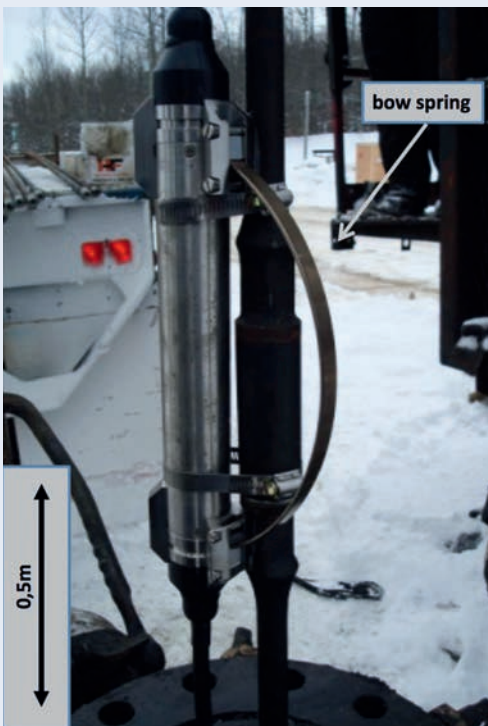


Abb 1: a) Prinzipskizze für den Einfluss anthropogener und natürlicher Rauschquellen auf die Qualität von Seismometer-Registrierungen an der Erdoberfläche und in Überwachungsbohrungen. Rote Schwingungen stellen exemplarisch das Messsignal eines Erdbebens mit P- und S-Wellen dar. Blaue Schwingungen zeigen den standortabhängigen Rauschpegel. Die graue Schattierung im Untergrund gibt ein Maß für den örtlich variierenden Rauschpegel an. b) Verankerungsvorrichtung eines Bohrlochseismometers über einen Spannbogen (Foto: M. Bohnhoff, GFZ). c) Drei-Komponenten-Bohrlochseismometer vom Typ MARK (Eigenfrequenz 1 Hz). Dieses hochempfindliche Gerät kommt im Rahmen des GONAF-Projekts erstmals in Bohrungen zum Einsatz. Eine kardanische Vorrichtung für die drei einzelnen Komponenten innerhalb des druckdichten Gehäuses sichert die vertikale Ausrichtung (Foto: B. Najdahmadi, GFZ).

b)



c)



Fig. 1: a) Sketch on the site-dependence of anthropogenic and ambient noise as a function of depth and vicinity to population centers (grey shading). Red traces represent seismic signals with P- and S-wave trains and blue traces indicate the level of ambient noise at the various locations, respectively. b) Coupling device for a borehole seismometer achieved through a bow spring. c) Three-component borehole seismometer (type MARK, natural frequency 1 Hz) as used for the first time in downhole deployments in the frame of the GONAF project. A gimbaled construction for each of the three components embedded in the pressure-secure housing ensures verticality of the instrument at depth.

Ausbreitung und Streuung mit der Entfernung ab. Die Auswirkung dieses Effekts auf die Datenqualität hängt jedoch stark von der jeweiligen Messgeometrie ab: So kann etwa im Fall der seismischen Überwachung eines geothermischen Reservoirs in einer Tiefe von typischerweise 3 bis 4 km die Hypozentralentfernung durch Sensoren in einigen hundert Metern Tiefe schon maßgeblich (um etwa 10 %) verkürzt werden, wohingegen bei der Überwachung von Erdbebenzonen mit Hypozentren in zehn und mehr Kilometern Tiefe dieser Effekt fast vernachlässigbar klein ist (wenige Prozent).

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von Bohrlochseismometern ergibt sich aus der Möglichkeit, eine vertikale Kette aus mehreren Sensoren zu installieren, und damit die Bodenbewegung in verschiedenen Tiefenstockwerken und relativ zu der Signalamplitude an der Oberfläche zu messen. Dadurch können wichtige Anhaltspunkte für eine standortabhängige seismische Gefährdung in besiedelten Gebieten gewonnen werden, denn aufgrund von Änderungen der Beschaffung der oberflächennahen Erdschichten kann es lokal zu erheblichen Verstärkungen der Amplituden von Erdbebenwellen kommen (soil amplification, siehe Abb. 1a). Außerdem lässt sich durch das Aufsummieren der Registrierungen aller Seismometer in einer Kette, das sogenannte Stapeln (engl. stacking), das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Rauschen (SNR) um den Faktor der Quadratwurzel der Anzahl gestapelter Seismometer verbessern. Also erzielt man beispielsweise bei vier gestapelten Seismogrammen eine Verdopplung der Signalqualität.

Das Mitte der 1980er Jahre am Parkfield-Segment der San Andreas-Verwerfung in Kalifornien installierte High Resolution Seismic Network (HRSN) hat erstmals nachhaltig den Nutzen des Einsatzes von Bohrlochseismometern im Langzeitbetrieb verdeutlicht. Das HRSN ist Teil des Parkfield Earthquake Prediction-Experiments, in dessen Rahmen die bis heute detaillierteste Überwachung eines Schlüsselsegments einer kontinentalen Plattenrandstörung realisiert wurde. Das HRSN besteht aus einem Netzwerk fest installierter Bohrlochseismometer rund um das Parkfield-Segment in 200 bis 300 m Einsatztiefe. Das Messnetz ist bis heute in Betrieb und liefert auf Basis von Registrierungen kleinster Erdbeben eine entscheidende Datengrundlage zur Überwachung des Parkfield-Segments. Das bei Weitem regional umfangreichste Netzwerk aus Bohrlochseismometern weltweit wurde im Verlauf der letzten Jahrzehnte in Japan errichtet, um dort flächendeckend die Seismizität bei niedriger Detektionsschwelle und in hoher Auflösung in Nah-Echtzeit zu überwachen. Der Einsatz von Bohrlochseismometern stellt heute allerdings aufgrund verschiedener technologischer und logistischer Herausforderungen nach wie vor die große Ausnahme dar.

Herausforderungen und Einsatzbereiche der Bohrlochseismologie

Der Einsatz von Seismometern in Bohrungen bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Allen voran ist das qualitäts-

bewusste und schnelle Abteufen von Bohrungen ein entscheidender Erfolgsfaktor. Abgesehen vom hohen technischen und logistischen Aufwand steigen erfahrungsgemäß die Bohrkosten exponentiell mit der Bohrtiefe an. Einer Festlegung der Einsatztiefe von Bohrlochseismometern geht daher immer eine Abwägung der Zielteufe im Vergleich zum erwarteten Vorteil bei den Monitoringbedingungen voraus. In den meisten Fällen liegt das Optimum bei wenigen hundert Metern Tiefe, da sich der Rauschpegel zu größeren Tiefen hin nur unwesentlich weiter reduziert und der zweite Faktor, die verringerte Hypozentralentfernung, meist vernachlässigbar ist. Besondere Herausforderungen für Bohrlochinstallationen sind eine abgeschirmte und damit störungsfreie Datenübertragung nach Übertage, sowie je nach Einsatztiefe auch erheblich erhöhte *In-situ*-Temperaturen und gestiegene hydrostatische Drücke. Bei Langzeiteinsätzen in nicht verrohrten (offenen) Bohrungen können zudem teils aggressive Bohrlochfluide hohe Anforderungen an das Material, Dichtungen und Kabelarmierungen darstellen.

Ohne gute Ankopplung des Sensors über die Bohrlochwand bzw. Stahlverrohrung und dessen Zementierung an die Gesteinsformation ist der Einsatz von Bohrlochseismometern nutzlos. Die Komplettierung einer Bohrlochinstallation ist allerdings anspruchsvoll, da im Gegensatz zu Oberflächenstationen kein direkter Zugriff auf das Messgerät im Bohrloch besteht, sondern lediglich ein Signalkabel die Verbindung zum Sensor darstellt. Die Ankopplung an die Gesteinsformation bei temporären Einsätzen erfolgt durch mechanische Verankerung der Seismometer mittels eines herausfahrbaren Hebelarms oder eines Spannbogens (Abb. 1b). In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, das Gerät nach dem Einsatz am Kabel wieder zu bergen. Bei einer permanenten Seismometerinstallation in der Tiefe erzielt man die optimale Ankopplung durch Einzementieren des Messgeräts in der Bohrung, wodurch allerdings eine anderweitige Nutzung der Bohrung für die Zukunft ausgeschlossen ist. Fest installierte Bohrlochsensorik kann dann im Erfolgsfall mehrere Jahrzehnte kontinuierlich Daten liefern. Dies ist beim HRSN der Fall, dessen Daten nach wie vor direkt in das kalifornienweite seismische Messnetz eingespeist werden. Die wesentlich verbesserten Monitoringbedingungen führen zu einer verringerten Magnituden-Detektionsschwelle durch kleinere Rauschpegel und zu einer erhöhten Lokalisierungsgenauigkeit der seismischen Ereignisse durch genauere Bestimmung der P- und S-Phaseneinsatzzeiten. Damit werden durch ein bohrlochgestütztes Seismometernetzwerk die Grundlagen für einen hochpräzisen Hypozentrenkatalog geschaffen. Dies erlaubt eine wesentlich detailliertere Analyse der raumzeitlichen Entwicklung der Seismizität im Untersuchungsgebiet – ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der unterhalb der Erdoberfläche ablaufenden Prozesse entlang von Erdbebenzonen. Darüber hinaus wird damit auch die Voraussetzung für eine präzisere Abbildung des krustalen Geschwindigkeitsfelds (tomography) sowie der seismisch aktiven Strukturen (passive fault-zone imaging) geschaffen. Bohrlochseismologische Wellenformregistrierungen erlauben darüber hinaus durch

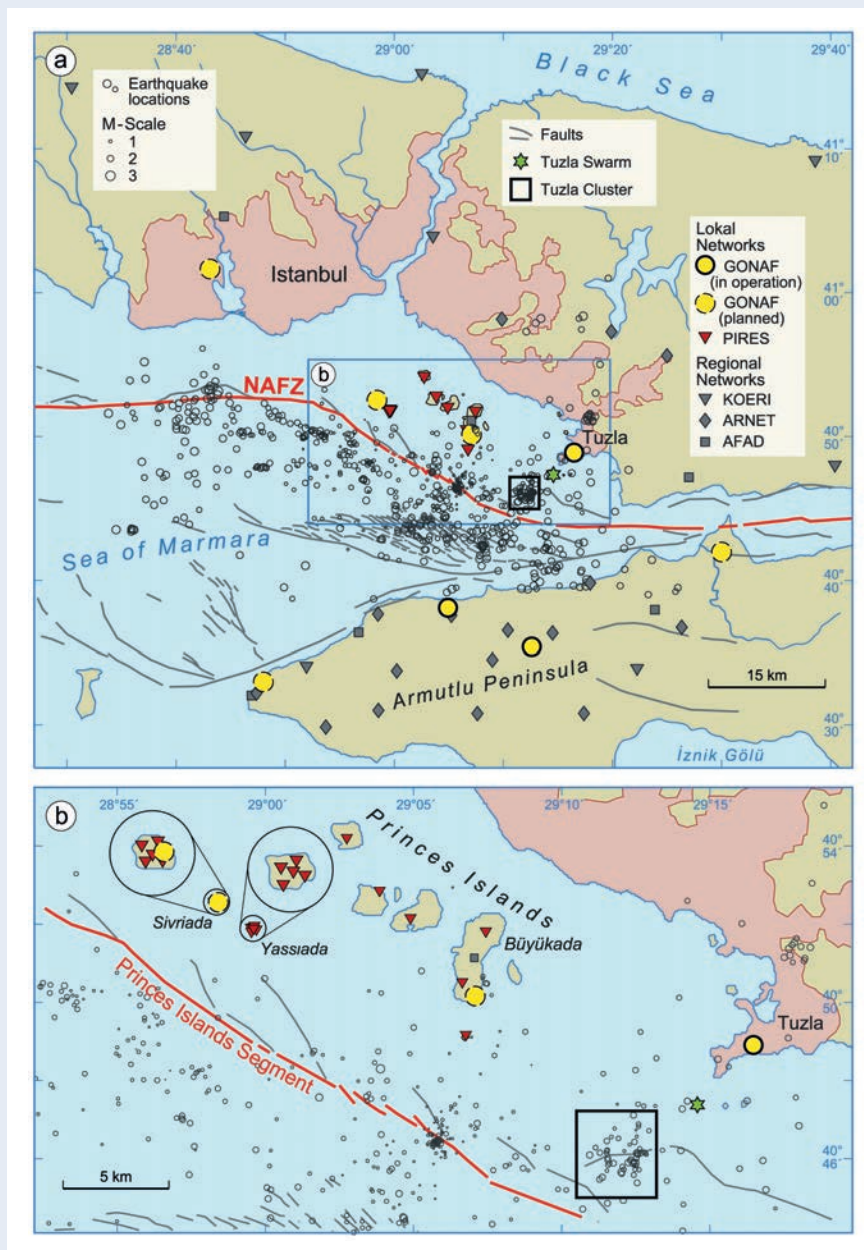


Abb. 2: a) Übersichtskarte der Region Istanbul/östliches Marmarameer im Nordwesten der Türkei. Die rote Linie markiert den Hauptzweig der Nordanatolischen Verwerfungszone (NAFZ) unterhalb des Marmarameeres. Graue Symbole markieren Stationen von regionalen Seismometernetzen. Blaue Kreise sind Bohrlochseismometer-Stationen des ICDP-GONAF-Projekts. b) Vergrößerter Ausschnitt des Prinzeninsel-Segments der NAFZ, das aufgrund einer hohen Wahrscheinlichkeit für ein starkes ($M > 7$) Erdbeben gezielt mikroseismisch überwacht wird. Rote Dreiecke markieren Stationen des inselgestützten PIRES-Netzwerks. Auf den beiden Inseln Sivriada und Büyükada werden jeweils 300 m tiefe GONAF-Bohrungen abgeteuft, in die Ketten aus Bohrlochseismometern installiert werden.

Fig. 2: a) Location map of the greater Istanbul metropolitan region in northwestern Turkey. The red line marks the Princes Islands segment as the main branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) below the Sea of Marmara. Grey symbols are stations of the regional permanent networks. Blue points are borehole locations of the ICDP-GONAF project. b) Enlarged map of the Princes Islands segment. Due to a high probability for a major ($M > 7$) earthquake this fault segment is monitored at reduced magnitude-detection threshold to study a critical fault segment before, and potentially also during and after a major rupture. Red triangles are stations of the island-based PIRES network. 300 m-deep GONAF boreholes equipped with vertical chains of seismometers will be installed on the islands of Sivriada and Büyükada.

verbesserte Signalqualität auch eine präzisere Bestimmung weitergehender seismischer Herdparameter (earthquake source parameters): Neben den Standardherdparametern wie Hypozentralkoordinaten, Magnitude und Herdzeit sind dies z. B. der Spannungsabfall auf der aktivierten Bruchzone während des Bebens (coseismic stress drop), die Eckfrequenz der im Hypozentrum abgestrahlten Wellen (corner frequency) oder auch der genaue Verlauf des Bruchprozesses mit der Zeit (source time function). Außerdem können so auch kontrovers diskutierte Phänomene, wie etwa das Auftreten von amplitudenschwachen Wellenformensignaturen vom unmittelbaren Bruchbeginn ei-

nes Erdbebens, erfasst werden. Diese geben Aufschluss über potenzielle Signale vom Nukleationsprozess eines Erdbebens mit entsprechend wichtigen Anwendungsfeldern, wie etwa der Möglichkeit einer effektiveren Erdbebenfrühwarnung.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch einen in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum von z. B. einem Jahr erfassten Erdbebenkatalog mit genaueren Hypozentren und insbesondere vielen magnitudenschwächeren Ereignissen für eine Zielregion eine Kalibrierung des örtlichen Langzeiterdbebenkatalogs möglich wird. Hier werden dann für das gleiche Ereignis die

Lokalisierungen mit und ohne das zusätzlich installierte Sensornetz verglichen, die Mislokationsvektoren für gezielte Bereiche bestimmt und dann für länger zurückliegende sowie lediglich mit dem Langzeitnetz erfassten Erdbeben als Korrektur angebracht. Somit erhält man eine höhere Lokalisierungsgenauigkeit für Erdbeben in der Zielregion für zurückliegende Zeiträume, obwohl kein ergänzendes Messnetz zur Verfügung gestanden hat.

Bohrlochseismologie vor den Toren Istanbuls

Das GFZ ist im Rahmen seiner Erdsystem-Observatorien seit vielen Jahren in der Marmara-Region, im Nordwesten der Türkei, aktiv. Einer der Forschungsschwerpunkte dort ist die Erdbebenüberwachung des östlichen Marmarameeres in unmittelbarer Nähe zum Ballungsraum Istanbul mit seinen mehr als 13 Mio. Einwohnern und einer Wirtschaftskraft von rund 40 % der Türkei. Unterhalb des Marmarameeres verläuft in nur etwa 20 km Entfernung zum historischen Stadtzentrum Istanbuls der Hauptzweig der Nordanatolischen Verwerfungszone (North Anatolian Fault Zone NAFZ), eine der großen Plattenrandstörungen der Erde mit einer Erstreckung von mehr als 1000 km zwischen Ostanatolien und der nördlichen Ägäis. Der Bereich der NAFZ in der Marmara-Region hat im Verlauf der vergangenen 2000 Jahre mehrfach zu Starkbeben der Magnitude $M > 7$ geführt, zuletzt im Jahr 1766. Im Mittel liegt die dortige Wiederkehrperiode für Starkbeben bei 200 bis 250 Jahren – ein Wert, der durch die lange Siedlungsgeschichte historisch sehr gut dokumentiert ist. Die Wahrscheinlichkeit für ein $M > 7$ Erdbeben in der Marmara-Region ist gegenwärtig insgesamt als sehr hoch einzuschätzen. Hinzu kommt, dass das letzte große Beben bei Izmit im Jahr 1999 die Spannungen auf der Verwerfung unterhalb des Marmara-Segments nochmals erhöht hat.

Um die entlang des Prinzeninsel-Segments im östlichen Marmarameer auftretende Seismizität bei verringerter Magnituden-Detektionsschwelle zu erfassen, wurde im Jahr 2006 zunächst ein lokales oberflächengestütztes Seismometernetz (PIRES) auf den Istanbul vorgelagerten Prinzeninseln errichtet (*Bulut et al., 2009; 2011; Bohnhoff et al., 2013*). Unter Einbeziehung ausgewählter regionaler Stationen des türkischen Katastrophenschutzes AFAD und des türkischen Erdbebenobservatoriums Kandilli, sowie Stationen des Armutlu-Netzes (*Tunc et al., 2011*) wurde so zunächst die Magnituden-Detektionsschwelle um etwa eine Größenordnung von $M=3$ auf $M=1,8$ gesenkt (Abb. 2). Um die vor einem Starkbeben ablaufenden Prozesse an einer seismisch aktiven Plattenrandstörung mit bestmöglicher Präzision zu überwachen, wurde kürzlich damit begonnen, ein bohrlochgestütztes, geophysikalisches Plattenrandobservatorium entlang des Prinzeninsel-Segments zu errichten (GONAF – Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault; www.gonaf.de). Das GONAF-Projekt ist das erste Projekt im Rahmen des am GFZ angesiedelten Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP, das sich im Schwer-

punkt mit der Langzeitüberwachung einer Verwerfungszone durch den Einsatz eines Netzwerks von Bohrlochseismometern befasst. GONAF wird vom GFZ und dem türkischen Katastrophenschutz AFAD koordiniert. Weitere assoziierte Projektpartner realisieren unter anderem eine Verdichtung des GPS-Messnetzes in der Region und die Installation bohrlochgestützter Deformationsmessgeräte.

Im Rahmen von GONAF werden in insgesamt acht 300 m tiefen Bohrungen vertikale Ketten aus unterschiedlichen Seismometertypen installiert und einzementiert. Die Betriebsdauer ist auf zunächst 20 Jahre ausgelegt. Die Seismometerketten in den GONAF-Bohrungen bestehen aus jeweils drei Vertikalseismometern einer Eigenfrequenz von 1 Hz, die im Abstand von 75 m zum Einsatz kommen. Im Bohrlochtieftsten (300 m) sind zudem Dreikomponenten-Seismometer mit Eigenfrequenzen von 1, 2 und 15 Hz implementiert, um das Spektrum der Signalfrequenzen über eine möglichst große Bandbreite zu erfassen. In den Messcontainern am Bohrlochkopf sind neben der Datenerfassungseinheit auch zusätzlich kurzperiodische, Breitbandseismometer und Akzelerometer untergebracht. Die Abtastrate aller Wellenformenregistrierungen ist auf 2000 Hz festgelegt und die Daten werden in Echtzeit simultan ans GFZ in Potsdam und zu AFAD in Ankara übertragen, wo sie ausgewertet werden.

Beim Einsatz von Dreikomponenten-Bohrlochseismometern besteht generell keinerlei Einfluss auf die horizontale Ausrichtung der Sensoren. Im Fall der GONAF-Bohrlochstationen wird die horizontale Ausrichtung daher durch Polarisationsanalyse der Wellenformen von Sprengungen in nahegelegenen Steinbrüchen ermittelt und fließt dann als Korrektur in die Auswertung der Erdbebensignaturen mit ein. Die senkrechte Ausrichtung der Sensoren ist an die Vertikalität der Bohrungen gebunden. Für die ersten drei GONAF-Bohrungen ergab die Vermessung der Bohrlochtrajektorie jeweils weniger als ein Grad Ablenkung. Da die senkrechte Ausrichtung eines seismischen Sensors fundamental wichtig für die korrekte Übertragung der Bodenbewegung ist, wurden sämtliche GONAF-Bohrlochseismometer zusätzlich in eine kardanische Aufhängung integriert, die ihrerseits in einem druckdichten Gehäuse untergebracht ist (Abb. 1c).

Erste Ergebnisse

Im Folgenden wird exemplarisch die erzielte Datenqualität anhand von Messungen der ersten fertiggestellten GONAF-Bohrung auf der Halbinsel Tuzla im östlichen Teil Istanbuls vorgestellt (Abb. 2). Tuzla wurde als Ort für die erste Bohrlokation festgelegt, weil sie in unmittelbarer Nähe zu einem Gebiet liegt, das seit dem Izmit-Erdbeben von 1999 durch kontinuierliche seismische Aktivität aufgefallen ist (im folgenden „Tuzla-Cluster“ genannt). So konnte mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, in einem relativ kurzen Zeitraum lokal auftretende Seismizität in einer Hypozentralentfernung von 10 bis 15 km zu erfassen, um die Messgeometrie und Daten-

qualität vor dem Abteufen weiterer Bohrungen zu überprüfen. Nach Fertigstellung der Bohrarbeiten und Komplettierung der Seismometer-Installation nahm die erste GONAF-Station zu Beginn des Jahres 2013 ihren Betrieb auf. Im April 2013 fiel ein lokales Erdbeben mit einer Magnitude von $M=1,5$ auf, welches von permanenten regionalen Seismometernetzen erfasst und in der Umgebung des Tuzla-Clusters lokalisiert wurde (Abb. 2). Die Analyse der Registrierungen der GONAF-Bohrlochseismometer zeigt, dass es sich bei dem $M_{1,5}$ -Erdbeben nur um das größte Ereignis einer Erdbebensequenz handelt. Durch die reduzierten Rauschpegel in den verschiedenen Tiefenstockwerken und die relative Nähe der Bohrung zur Hypozentralregion konnten insgesamt 114 zusätzliche, kleinere Erdbeben durch Kreuzkorrelation der Wellenformen detektiert werden. 19 von diesen wurden, allerdings mit wesentlich geringerem Signal-Rausch-Verhältnis, auch auf den inselgestützten PIRES-Stationen erfasst (Abb. 3). Die weitergehende Analyse zeigt, dass es sich bei der hier aufgetretenen Seismizität nicht um eine Hauptbeben-Nachbe-

ben-Sequenz handelt. Hingegen spricht die zeitliche Abfolge der Erdbeben und der Magnituden für das Auftreten eines Erdbebenschwarms. Die Hauptaktivität des Tuzla-Schwarms erstreckte sich über einen Zeitraum von etwa fünf Tagen (Abb. 4). Derartige seismische Sequenzen treten z. B. auch in vulkanisch aktiven Gebieten auf und werden meist mit dem Aufstieg von kristallinen Fluiden (z. B. Magma) in Verbindung gebracht. Die innerhalb des Tuzla-Schwarms beobachtete Seismizität in 7 km Tiefe steht möglicherweise in ursächlichem Zusammenhang mit dem Aufstieg von Fluiden und Gasen entlang von Nebenästen des Prinzeninsel-Segments (Geli et al., 2008). Ein direkter Zusammenhang mit in der gleichen Region am Meeresboden beobachteten Ausgasungen ist möglich, muss aber zunächst noch weiter untersucht werden. Analysen der Gaszusammensetzung scheinen eher auf eine geringere Ursprungstiefe als die beobachtete Tiefe des Bebenschwarms, und damit auf einen entkoppelten Prozess hinzudeuten. Eine systematische raumzeitliche Wanderung von Erdbeben innerhalb des Schwarms

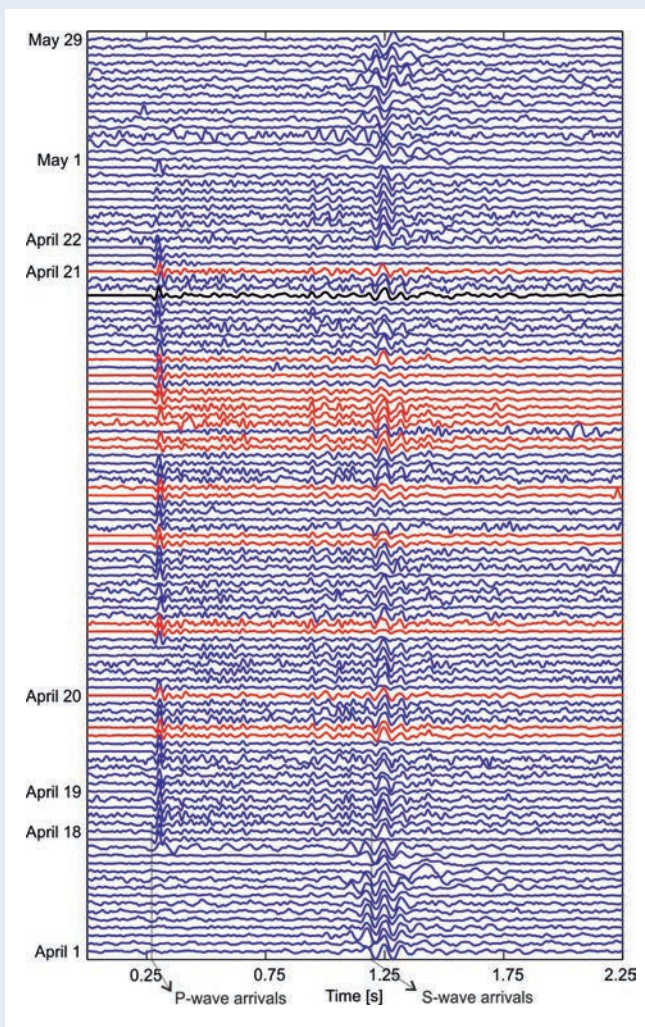


Abb. 3: Seismische Wellenformenregistrierungen des Tuzla-Erdbebenschwarms von April bis Mai 2013. Gezeigt ist jeweils die vertikale Bodenschwingung für jedes der detektierten Erdbeben an der GONAF-Station auf der Halbinsel Tuzla in 215 m Tiefe. Die hohe Ähnlichkeit der Signale weist auf eine sehr eng begrenzte Herdregion der Ereignisse hin. Während von den regionalen Festnetzstationen nur das stärkste Erdbeben dieses Schwarms mit einer Magnitude von 1,5 erfasst und lokalisiert wurde (schwarze Spur), konnten auf den inselgestützten PIRES-Stationen 19 weitere schwächere Erdbeben erfasst werden. Durch den Einsatz von Bohrlochseismometern in der GONAF-Bohrung auf Tuzla (Abb. 2) konnten bei reduziertem Rauschpegel und verringerter Hypozentralentfernung weitere 95 magnitudenschwächere Erdbeben aus derselben Herdregion erfasst werden (blaue Spuren). Alle Ereignisse zusammen bilden einen Erdbebenschwarm, der ohne Bohrlochstationen nicht detektiert worden wäre.

Fig. 3: Waveform recordings of the Tuzla earthquake swarm of May-June 2013. The traces shown are recordings of the vertical component at the GONAF borehole seismometer at 215 m on the Tuzla peninsula. While only one event was detected and located by the regional permanent seismic network (black trace), another 19 smaller-magnitude events were detected by the PIRES stations on the Princes islands (red traces). Using a cross-correlation technique additional 95 earthquakes were detected by the GONAF Tuzla borehole station (blue traces). All events belong to one earthquake swarm within a narrow hypocentral region close to the Tuzla cluster (see Fig. 2).

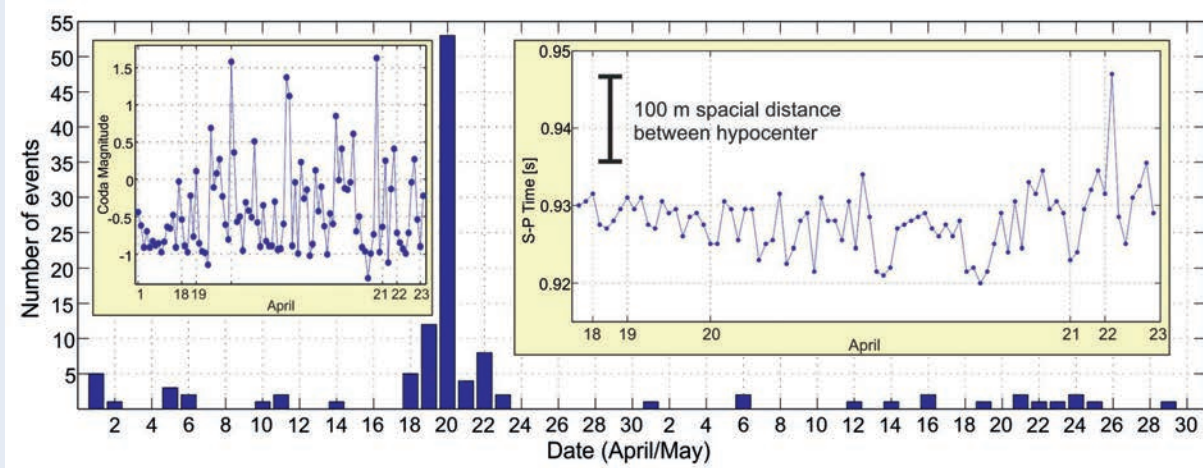


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung des Tuzla-Erdbebenschwarms (tägliche Ereignisrate). Während die Hauptaktivität zwischen dem 18. und 23. April 2013 liegt wurde mittels Wellenform-Kreuzkorrelationsanalyse über einen Zeitraum von zwei Monaten eine Reihe weiterer ähnlicher Erdbeben detektiert. Der Kasten oben links zeigt die zeitliche Entwicklung der Magnituden mit der Zeit und liefert klare Hinweise auf einen Erdbebenschwarm. Der Kasten oben rechts zeigt die zeitliche Entwicklung der Differenzlaufzeit aus P- und S-Wellen, wobei die geringe Variation keine systematische Wanderung von Erdbeben innerhalb der Schwarmregion erkennen lässt.

Fig. 4: Temporal evolution of the Tuzla earthquake swarm (daily event rate). While the main activity of the swarm occurred during April 18-23 2013 several additional events with highly similar waveforms were detected during the framing two-month period. The inset in the upper left shows the temporal evolution of the earthquake magnitudes indicating a swarm-type behavior rather than a mainshock-aftershock sequence. In the upper right the S-P times are plotted indicating that no major internal migration of hypocenters was identified.

kann durch Änderungen in der Differenz der Ankunftszeiten von Scher- und Primärwelle (S-P time) festgestellt werden. Diese variiert im Fall des Tuzla-Schwarms nur minimal, daher kann eine signifikante räumliche Veränderung der Seismizitätsverteilung während des Schwarms ausgeschlossen werden (Abb.4). Die weitere Auswertung dieser Daten am GFZ dauert an.

Ausblick

Der systematische Einsatz von Bohrlochseismometern stellt heute trotz der beschriebenen substanziellen Vorteile nach wie vor die Ausnahme bei der Erdbebenüberwachung dar. Dies ist zuallererst durch hohe Bohrkosten, teure Spezialmesstechnik und in einer aufwendigen Installationslogistik begründet. Bestehende bohrlochgestützte seismische Langzeitinstallationen, unter anderem in Japan und Kalifornien, dokumentieren, dass ein Betrieb über Jahrzehnte möglich ist und die so gewonnenen Messdaten die Grundlage für aktuelle Forschung bilden. Erste Messdaten von kürzlich in der Marmara-Region installierten Bohrlochseismometer-Arrays im Rahmen des vom GFZ gemeinsam mit dem türkischen Katastrophenschutz AFAD koordinierten ICDP-GONAF-Projekts bestätigen den Nutzen von rauscharmen seismischen Registrierungen. Hier zeigt sich auch, dass international vernetzte Projektstrukturen, wie die Erdsystem-Observatorien des GFZ, eine wichtige Voraussetzung für wissenschaftlich motivierte Langzeitvorhaben darstellen.

Literatur

- Bohnhoff, M., Bulut, F., Dresen, G., Eken, T., Malin, P. E., Aktar, M. (2013): An earthquake gap south of Istanbul. - *Nature Communications*, 4, 1999. DOI: <http://doi.org/10.1038/ncomms2999>
- Bulut, F., Bohnhoff, M., Ellsworth, W. L., Aktar, M., Dresen, G. (2009): Microseismicity at the North Anatolian Fault in the Sea of Marmara offshore Istanbul, NW Turkey. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B9, B09302. DOI: <http://doi.org/10.1029/2008JB006244>
- Bulut, F., Ellsworth, W. L., Bohnhoff, M., Aktar, M., Dresen, G. (2011): Spatiotemporal Earthquake Clusters along the North Anatolian Fault Zone Offshore Istanbul. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 4, 1759-1768. DOI: <http://doi.org/10.1785/0120100215>
- Geli, L., Henry, P., Zitter, T., Dupré, S., Tryon, M., Ca atay, M. N., Mercier de Lépinay, B., Le Pichon, X., Sengör, A. M. C., Görür, N., Natalin, B., Uçarkus, G., Özeren, S., Volker, D., Gasperini, L., Burnard, P., Bourlange, S., the Marnaut Scientific Party (2008): Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara. - *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 1-2, 34-39. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.047>
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1941): *Seismicity of the Earth*, (Geological Society of America Special Papers; 34), Geological Society of America, 126 p. DOI: <http://doi.org/10.1130/SPE34>
- Tunc, B., Caka, D., Irmak, T. S., Woith, H., Tunc, S., Baris, S., Özer, M. F., Lühr, B.-G., Günther, E., Grosser, H., Zschau, J. (2011): The Armutlu network: An investigation on seismotectonic setting of Armutlu-Yalova-Gemlik and surrounding regions. - *Annals of Geophysics*, 54, 1, 35-45. DOI: <http://doi.org/10.4401/ag-4877>