

# Das Erdbebenrisiko einer Megacity

## Seismische Überwachung der Nordanatolischen Verwerfungszone vor Istanbul durch ein Seismometernetz auf den Prinzeninseln

Marco Bohnhoff<sup>1</sup>, Fatih Bulut<sup>1</sup>, Mustafa Aktar<sup>2,3</sup>, Georg Dresen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, <sup>2</sup> Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute,

<sup>3</sup> Bogazici University, Istanbul

*The Marmara segment of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) in NW Turkey currently represents a ‚seismic gap‘ that has not been activated since 1766 and that has the potential to host a  $M > 7$  earthquake in the near future close to the Mega-City Istanbul with its 14 million inhabitants. To characterize the Marmara fault segment a local seismic network was installed offshore Istanbul on the Princes Islands in the direct vicinity to the fault (PIRES campaign) as part of the GFZ Plate Boundary Initiative. Recordings of the local microseismicity now allow for characterization of the fault below the Sea of Marmara for the first time. Distinct seismically active spots indicate that strain is released only partially along the seismic gap. Implementing recordings from seismic stations throughout the area results in stable fault plane solutions at refined hypocentral precision and an unprecedented perception of the seismotectonic setting. Current expansion of the PIRE network will provide for an increase in the data base at improved hypocentral resolution and also enable the performance of comparative studies e.g. with the San Andreas Fault in California.*



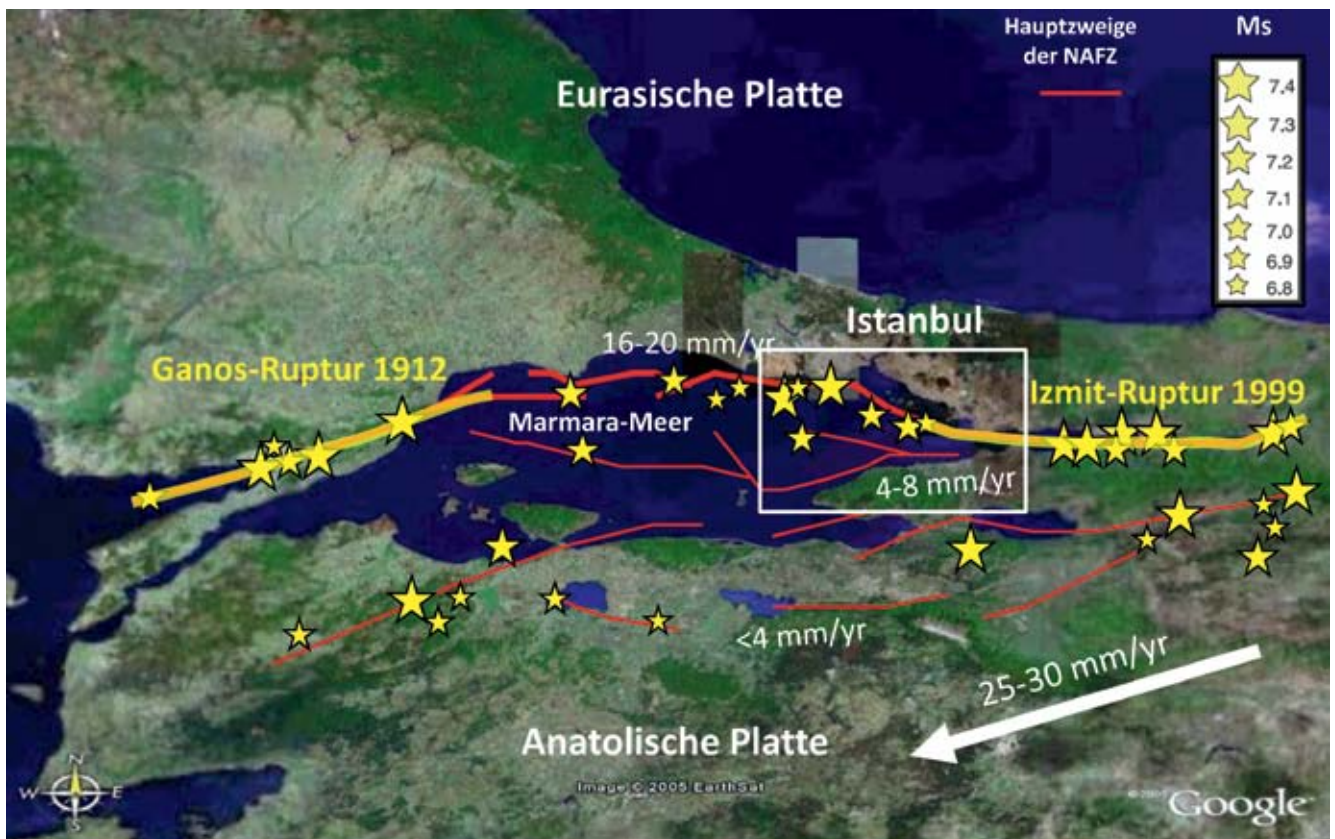


Abb. 1: Verlauf der Nordanatolischen Verwerfungszone (North Anatolian Fault Zone – NAFZ) in der NW-Türkei. Das weiße Rechteck markiert die Lokation des GFZ-Plattenrandobservatoriums Türkei im östlichen Bereich der „seismischen Lücke“ unterhalb des Marmara-Meeres. Rote Linien markieren Hauptzweige der NAFZ, gelbe Linien stehen für die letzten beiden Starkbeben in der Region. Sterne repräsentieren Erdbeben mit Magnituden  $\geq 6,8$  während der letzten 2000 Jahre (nach Ambraseys, 2002; Parsons, 2004). Der weiße Pfeil markiert die aus GPS-Messungen abgeleitete Relativbewegung der Anatolischen Kontinentalplatte im Vergleich zu Eurasien.

Fig. 1: The North Anatolian Fault Zone (NAFZ) in NW Turkey. The white rectangle indicates the location of the GFZ-Plate Boundary Initiative that focuses on the eastern part of the seismic gap below the Sea of Marmara. Red lines mark fault branches of the NAFZ, yellow bold lines represent the last major ruptures of the region in 1912 and 1999, respectively. Stars indicate hypocenters of major ( $M > 6.8$ ) earthquakes during the last 2000 years (after Ambraseys, 2002; Parsons, 2004). The white arrow indicated the GPS-derived horizontal motion of the Anatolian plate with respect to stable Eurasia.

## Die tektonische Situation

Die Nordanatolische Verwerfungszone (North Anatolian Fault Zone – kurz NAFZ) ist mit etwa 1600 km Länge eine der großen intrakontinentalen Plattengrenzen der Erde (Barka, 1992). GPS-Messungen des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes ergeben aktuell Relativverschiebungen an der NAFZ von 20 bis 25 mm pro Jahr (z. B. McClusky et al., 2000), die sich entlang einer schmalen Naht zwischen der Anatolischen Kontinentalplatte im Süden und Eurasien im Norden manifestieren. An dieser Naht dreht sich die Anatolische Platte zwischen der nordwärts wandernden Arabischen Platte im

Osten und der südwärts gerichteten Bewegung der Hellenischen Subduktionszone im Westen gegen den Uhrzeigersinn.

Ausgehend vom Erzincan-Erdbeben in Ostanatolien im Jahr 1939 ist es entlang der NAFZ im Verlauf des letzten Jahrhunderts zu einer systematischen, westwärts gerichteten Abfolge von Starkbeben mit Magnituden  $> 7$  gekommen. Die katastrophalen Erdbeben von Izmit ( $M=7,4$ ) und Düzce ( $M=7,1$ ) im August und November 1999 (Tibi et al., 2001) markieren aktuell die letzten starken seismischen Ereignisse dieser Serie. Seit 1999 verbleibt damit als letzter seit 1766 nicht aktivierter Bereich entlang der gesamten NAFZ das Segment unterhalb des Marmara-Meeres im Nordwesten der Türkei (Abb. 1). Dieses Segment repräsentiert gegenwärtig eine sogenannte „seismische Lücke“, die sich auf bis zu 140 km Länge zwischen den beiden Rupturen des Ganos-Bebens von 1912 im Westen und des Izmit-Bebens von 1999 im Osten erstreckt.



**Kontakt:** Marco Bohnhoff  
(bohnhoff@gfz-potsdam.de)

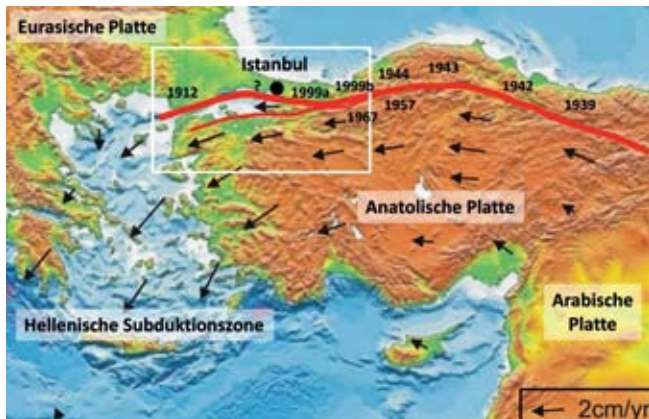


Abb. 2: Ägäisch-Anatolischer Raum mit den wichtigsten tektonischen Kontinentalplatten. Die schwarzen Pfeile geben das horizontale Deformationsfeld aus GPS-Messungen in Relation zu Eurasien an (nach McClusky et al., 2000). Die rote Linie markiert den Verlauf der Nordanatolischen Verwerfungszone (North Anatolian Fault Zone – NAFZ). Die Jahreszahlen geben die Lokationen der Starkbeben im letzten Jahrhundert an. Die Region um das Marmara-Meer (weißer Kasten) ist in Abb. 1 vergrößert dargestellt.

Fig. 2: Aegean-Anatolian region with major tectonic plates. Black arrows represent the GPS-derived horizontal velocity field with respect to stable Eurasia (after McClusky et al., 2000). The red line indicates the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) extending between eastern Anatolia and the northern Aegean. Numbers represent the years of major ( $M > 7$ ) earthquakes during the 20th century. The white rectangle highlights the Marmara region that is enlarged in Fig. 1.

Die seismische Lücke verläuft unmittelbar südlich des Ballungsraums Istanbul mit seinen etwa 14 Millionen Einwohnern und birgt aktuell das Potenzial für ein Erdbeben der Magnitude bis zu 7,5 (Parsons, 2004; Armijo et al., 2005). Das seit 1766 akkumulierte Verschiebungsdefizit entlang des Marmara-Segments beträgt bis zu fünf Meter. Probabilitätsabschätzungen für das Auftreten eines Erdbebens der Magnitude  $\geq 7$  bis zum Jahr 2035 liegen je nach Modell zwischen 35 und 70 % (Parsons, 2004). Angesichts der dichten Besiedlung, der konzentrierten Wirtschaftsleistung und der hohen seismischen Gefährdung ist diese Region durch eine verheerende Naturkatastrophe – wie beispielsweise ein großes Erdbeben – besonders verletzbar. Abschätzungen einer von den Vereinten Nationen in Auftrag gegebenen Studie gehen im Fall des Auftretens eines Erdbebens mit der Magnitude  $M > 7$  unterhalb des Marmara-Meeres von bis zu 90 000 Opfern und dem Zehnfachen an Obdachlosen aus (Bas & Yagci, 2008). Zudem sind durch historische Beben unterhalb des Marmara-Meeres auch Tsunamis im Bereich Istanbul mit Wellenhöhen bis zu sechs Meter belegt (Ambraseys, 2002).

### Messen und analysieren: Wie sieht die Bedrohung aus?

Aus geowissenschaftlicher Sicht ist es daher wichtig, den Großraum Istanbul und damit den östlichen Bereich der seis-

mischen Lücke bestmöglich seismisch zu überwachen und den gegenwärtigen physikalischen Zustand des Marmara-Segments quantitativ zu beschreiben. Mit einem Netz aus dicht gestaffelten Seismometerstationen in geringer Entfernung zur Verwerfung können Mikrobeben erfasst werden, also Erdbeben kleinerer Magnitude ( $M < 2,8$ ), die Aussagen über die Geometrie der Verwerfungszone in der Tiefe und die Lage kritisch gespannter Segmente erlauben.

Trotz der starken sozio-ökonomischen Relevanz und trotz Verdichtung des regionalen, fest installierten türkischen Seismometernetzes seit 1999 lagen bisher keinerlei Langzeitmessungen der Seismizität im Bereich des östlichen Marmara-Meeres und dem Übergangsbereich zwischen der Izmit-Ruptur und dem Marmara-Segment für Magnituden  $\leq 2,8$  vor (Erdbebenkatalog des türkischen Seismometernetzes KOERI). Eine zentrale Frage in Bezug auf die Charakterisierung der Verwerfung ist zum Beispiel, ob der Übergangsbereich eine sogenannte seismische Barriere darstellt, an der das erwartete Marmara-Beben möglicherweise seinen Ursprung nehmen könnte. Dies hätte direkte Auswirkungen auf das seismische Gefährdungspotenzial für den gesamten Ballungsraum Istanbul. Weiterhin wird auch die Frage kontrovers diskutiert, ob der Untergrund des Marmara-Meeres von einem einheitlichen Segment der NAFZ durchzogen wird, das als Seitenverschiebung aktiviert werden könnte, oder ob eine Abfolge kleiner Abschiebungen möglich sein könnte. Neben diesen primär seismologischen Fragestellungen stellen Lage und Ausdehnung eines möglichen Starkbebens, die Struktur der Verwerfungszone sowie Aspekte einer optimierten Frühwarnung für Istanbul Hauptmotivationen für die Errichtung des Plattenrandobservatoriums des GFZ an der NAFZ vor Istanbul dar.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ ist seit seiner Gründung mit zahlreichen Einzelprojekten in der Türkei, speziell der Region um das Marmara-Meer, aktiv. Basierend auf den langjährigen Erfahrungen und den guten Kooperationsbeziehungen zu lokalen Partnern, speziell zu dem nationalen Erdbebendienst KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute) in Istanbul, wurde im Jahr 2006 damit begonnen, ein permanentes seismisches Netzwerk auf den Prinzeninseln Sivriada und Yassiada zur seismischen Überwachung der NAFZ im Bereich vor Istanbul zu errichten (Bohnhoff et al., 2007, siehe Abb. 3 a+b).

Die in diesem und den beiden folgenden Artikeln vorgestellten Aktivitäten sind Teil des Plattenrandobservatoriums Türkei des GFZ. Ziel ist es, das Marmara-Segment der NAFZ, speziell dessen östlichen Bereich, durch den kombinierten Einsatz verschiedener geowissenschaftlicher Ansätze quantitativ zu beschreiben: Seismologische und geodätische Methoden werden mit numerischer Modellierung verknüpft, die Charakterisierung eines Verwerfungssegments vor und möglicherweise auch während und nach dessen Aktivierung durch ein Erdbeben wird mit ingenieurseismologischen Projekten wie z. B. einer Optimierung der Frühwarnung für Istanbul kombiniert.

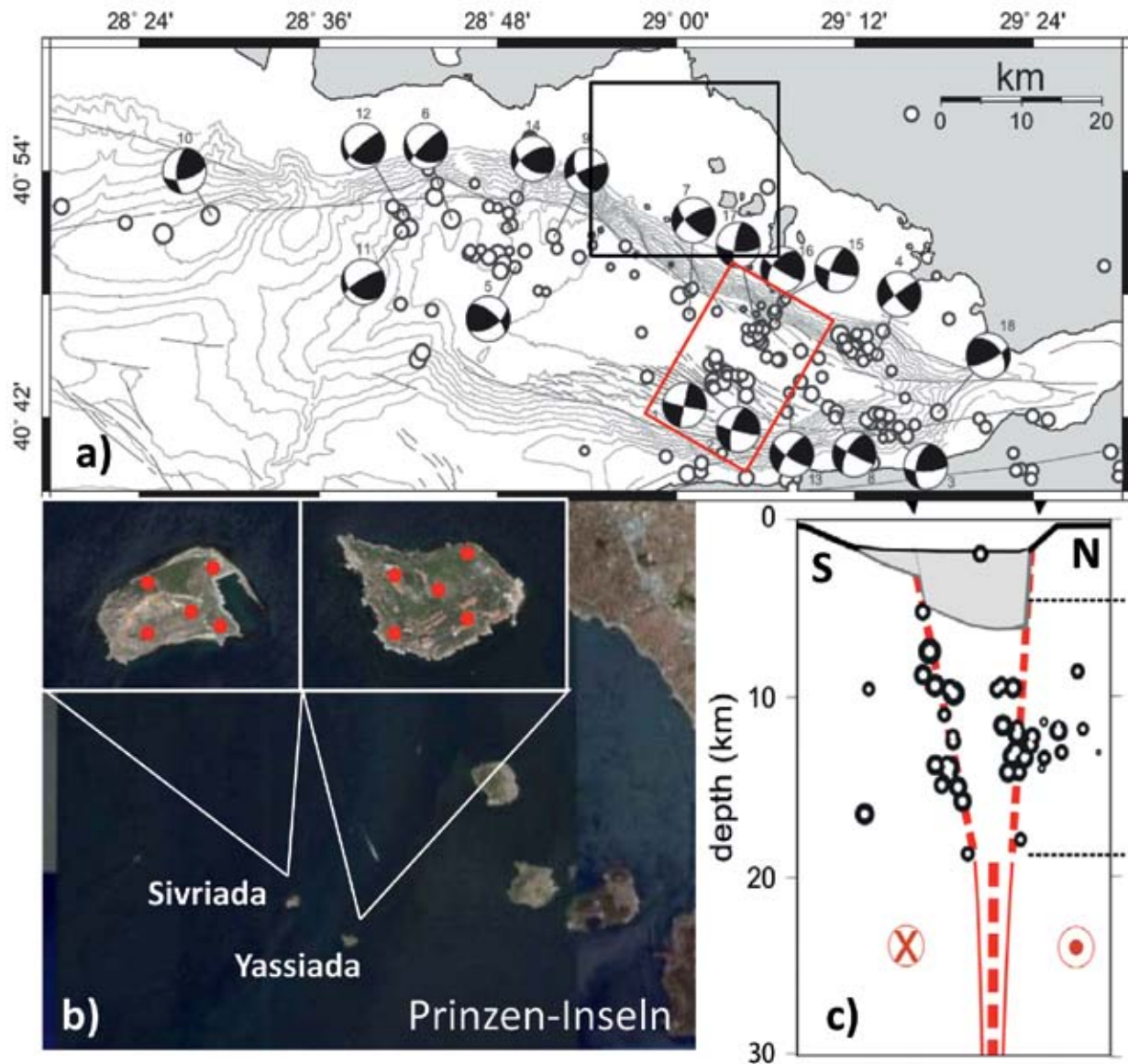


Abb. 3: a) Mikroseismizität entlang des östlichen Marmara-Segments, basierend auf Registrierungen des PIRES-Seismometernetzes (kleine Kreise). Große Kreise markieren Deformationsmechanismen (sogenannte Herdflächenlösungen) der stärkeren seismischen Ereignisse. Das schwarze und das rote Rechteck markieren den in b) und c) gezeigten Ausschnitt. b) Lokation und Stationsverteilung (rote Punkte) des seismischen PIRES-Netzwerks auf den beiden vorgelagerten Prinzeninseln Sivriada und Yassiada. c) Tiefenschnitt des in a) rot markierten SW-NE-streichenden Bereiches mit den Hypozentren, die die beiden Hauptäste der NAFZ unterhalb des östlichen Marmara-Meeres markieren und ab etwa 18 km Tiefe als einheitliche Verwerfung (Master fault) verlaufen.

Fig. 3: a) Spatial distribution of microseismicity observed by the PIRES network of seismometers (small circles). Larger circles represent fault plane solution for the larger events that were also seen by regional permanent seismic stations. The black and red rectangles are enlarged in fig. b) and c), respectively. b) Location and station distribution of PIRES stations on the outermost Princes Islands, Sivriada and Yassiada. c) Depth section of the observed microseismicity along the eastern Marmara segment of the NAFZ. The two major fault branches are imaged by hypocenters and interpreted to merge to a master fault below the seismogenic depth (18 km).

Thema dieses Beitrags ist die hochauflösende seismische Überwachung der NAFZ vor Istanbul im Übergangsbereich zur Izmit-Ruptur von 1999.

### Das seismische Netzwerk PIRES

Als erster Schritt zur Abschätzung der lokalen mikroseismischen Aktivität wurde Ende 2005 zunächst ein temporäres Netz aus Ozean-Boden-Seismometern (OBS) im östlichen Marmara-Meer ausgebracht. OBS sind auf dem Meeresboden

stehende Seismometerstationen, die für einen bestimmten Zeitraum positioniert und nach Ende der Messungen wieder eingeholt werden. Mit dem Ziel, den Istanbul vorgelagerten Teil der NAFZ langfristig bei niedriger Magnituden-Detektionsschwelle seismisch zu überwachen, wurde dann im Jahr 2006 damit begonnen, das inselgestützte seismische Netzwerk PIRES (Princes Island high Resolution Earthquake monitoring System) aufzubauen. Dazu wurden zunächst zwei Arrays aus je fünf Stationen auf den beiden vorgelagerten Prinzeninseln Sivriada und Yassiada installiert (Abb. 3b). Beide Inseln befinden



sich an der Grenze des kontinentalen Schelfs, etwa 3 km von einem über 1000 m abfallenden submarinen Abhang entfernt, der das Ausstreichen der NAFZ markiert.

Das PIREs-Netz wurde an der einzig möglichen Lokation in direkter Nähe zu Istanbul (~15 km) und zum Hauptzweig der NAFZ (~3 km) unterhalb des Marmara-Meeres errichtet. Die seismischen Stationen sind mit kurzperiodischen Seismometern der Eigenfrequenz 1 Hz ausgestattet. Zum Schutz vor Fremdzugriff und aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Verwerfung wurden sie in verschlossenen Betonquadern erdbebensicher errichtet. Darüber hinaus wurde eine Station zusätzlich mit einem Beschleunigungssensor ausgerüstet. Die Stromversorgung erfolgt über Solarpaneele. Nach der erfolgreichen ersten Phase wurde PIREs im Jahr 2008 durch zusätzliche Stationen auf den umliegenden Inseln Burgazada und Balıciada erweitert und damit die Apertur des Messnetzes vergrößert. So können jetzt seismische Signale entlang des gesamten zu überwachenden Verwerfungssegmentes mit homogener Magnituden-Detektionsschwelle registriert werden. Mit PIREs soll vor allem die unmittelbar vor den Inseln am Hauptast der Verwerfung auftretende Mikroseismizität erfasst und analysiert werden. Für die Lokalisierung der größeren Ereignisse mit Magnituden  $>2,8$  werden darüber hinaus auch Registrierungen ausgewählter Seismometerstationen des türkischen KOERI-Netzes und des vom GFZ betriebenen Armutlu-Netzes (ARNET) auf der Armutlu-Halbinsel (Woith, Baris, pers. comm.) in die Auswertung mit einbezogen, was für die stärkeren Ereignisse zu einer verbesserten Lokalisierungsgenauigkeit führt. ARNET erstreckt sich mit insgesamt 22 seismischen Stationen von der Südküste des Golfs von Gemlik bis an die Südküste des östlichen Marmara-Meeres. Neben seismischen Beobachtungen werden dort auch Fluidruck und -temperatur gemessen.

Die bisher durch PIREs erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse konzentrieren sich auf die raum-zeitliche Verteilung der Mikroseismizität vor Istanbul und seismotektonische Aspekte in der Region.

## Mikroseismizität und seismotektonische Implikationen

Durch PIREs gelang erstmals die Erfassung von Mikroseismizität entlang der NAFZ vor Istanbul über einen längeren Zeitraum. Es werden Raten von 20 Beben im Monat für  $M < 2,8$  beobachtet, was insgesamt einer niedrigen bis moderaten Aktivität entspricht. Durch den Einsatz moderner Relokalisierungstechniken (Waldhauser und Ellsworth, 2000) gelang eine relative Genauigkeit bei der Bestimmung der Hypozentren von  $<100$  m, was einer Verbesserung um einen Faktor 20 im Vergleich zu Absolutlokalisierungen darstellt (Bulut et al., 2009). Die beobachtete Seismizität weist sowohl räumlich wie auch zeitlich eine starke Häufung, eine sogenannte Clusterung, auf und erlaubt die Identifizierung von lokalen Aktivitätszentren entlang der Verwerfung. Die beobachteten Muster ähneln denen, die an Segmenten der San Andreas-Verwerfungszone in Kalifornien beobachtet werden. NW-SE-streichende, durch die Mikroseismizität belegte Bruchflächen, weisen die gleiche Orientierung auf, wie am Meeresboden erfasste Strukturen, die parallel zum Hauptzweig der NAFZ verlaufen. Während südöstlich Istanbul reine Seitenverschiebungen beobachtet werden, liegen weiter westlich auch Überschiebungskomponenten vor. Abschiebungsbeben werden hingegen nicht beobachtet, obwohl sie durch eines der beiden regionalen tektonischen Modelle prognostiziert werden. Die beobachtete Kinematik könnte durch die NW-Migration einer Mikroplatte unterhalb des östlichen Marmara-Meeres erklärt werden. Aufgrund der vergleichsweise kurzen bisherigen Beobachtungsperiode wird in diesem Zusammenhang erst die kontinuierlich wachsende Datenbasis weiteren Aufschluss geben können.

Die Tiefenverteilung der Erdbeben erstreckt sich über den gesamten seismogenen Bereich. Sie erlaubt erstmals, den Verlauf der Hauptzweige der NAFZ direkt durch Seismizität abzubilden. Dabei deutet sich eine Konvergenz der einzelnen Segmente zu einer einheitlichen Verwerfung unterhalb von etwa 18 km an, d. h. erst unterhalb der seismogenen Zone (Abb.

3c). Zeitliche Aktivitätsmaxima erreichen Raten von mehr als 70 Erdbeben innerhalb von 18 Stunden und repräsentieren raum-zeitliche Cluster, die sich auf wenige Quadratkilometer große Flächen entlang der Verwerfung konzentrieren (Abb. 3a). Dabei übersteigen die kumulativen Magnituden dieser Aktivitätsmaxima jedoch nicht die durchschnittlich pro Zeit freigesetzte seismische Energie und deuten somit eher Schwarmaktivität als Haupt- und Nachbebensequenzen an. Anders als zunächst vermutet, repräsentieren die Mikroerdbeben der Erdbeben-Cluster zudem keine Mehrfachaktivierung derselben Bereiche, sogenannte „seismische Repeater“. Vielmehr findet in den Aktivitätszentren selbst eine sukzessive Verlagerung der Mikroerdbeben hin zu geringeren Tiefen statt, was durch lokale tektonische Prozesse, aber z. B. auch durch aufsteigende Fluide erklärt werden kann (Bulut et al., 2009).

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die PIREs-Messkampagne im Rahmen des GFZ-Plattenrandobservatoriums Türkei konnte erstmals Mikroseismizität entlang der östlichen seismischen Lücke unterhalb des Marmara-Meeres über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Die eingesetzten seismologischen Array-Verfahren in Kombination mit modernen Relokalisierungstechniken erlauben eine im Vergleich zu bestehenden Erdbebenkatalogen um den Faktor 20 genauere Lokalisierung der Hypozentren von Mikroerdbeben entlang der NAFZ im östlichen Marmara-Meer. Die unterhalb des Cinarcik-Beckens beobachtete Mikroseismizität weist starke raumzeitliche Clusterung auf. Dies deutet an, dass die tektonisch aufgestaute elastische Verformung entlang des Hauptzweigs der NAFZ vor Istanbul nur lokal und partiell abgebaut wird. Weite Teile der Verwerfung verhalten sich bis hinunter zu Magnituden um 1,5 seismisch inaktiv. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich in diesem Bereich seit dem letzten großen Beben 1766 verstärkt Spannungen aufgestaut haben, falls sich die bisherigen Ergebnisse aus einem Beobachtungszeitraum von knapp zwei Jahren auf einen längeren Zeitraum übertragen lassen.

Bisher wurden fast ausschließlich Seitenverschiebungs-Bruchmechanismen beobachtet. Abschiebungsmechanismen haben im Beobachtungszeitraum offensichtlich keine Rolle gespielt. Dies macht vor dem Hintergrund der dort vorherrschenden, durch Dehnungsprozesse entstandenen Beckenstruktur deutlich, dass die dominierenden Verschiebungsmechanismen an den Verwerfungssegmenten auch zeitlich variieren können. Diese Beobachtungen liefern wichtige Beiträge nicht nur in Bezug auf die beiden konträren seismotektonischen Modelle für die Region, sondern vor allem für die aus den Beobachtungen abzuleitenden Gefährdungsszenarien für die Megacity Istanbul.

Durch eine kürzlich erfolgte und hier noch nicht berücksichtigte Erweiterung des PIREs-Netzes sowie durch den geplanten Aufbau eines bohrlochgestützten geophysikalischen Tiefenobservatoriums (GONAF-Projekt) wird eine weitere Herabsetzung der Magnituden-Detektionsschwelle erfolgen, die die Qualität und

Quantität der erfassten Mikroseismizität vor Istanbul nochmals um etwa eine Größenordnung verbessern wird. Zudem stehen PIREs-Registrierungen in unmittelbarer Nähe zur NAFZ dem Frühwarnsystem Istanbuls zur Verfügung, das eine verbesserte Erdbeben-Frühwarnung im Bereich des Marmara-Meeres zum Ziel hat und damit wichtige Beiträge im Rahmen der Daseinsvorsorge für diese sensitive Metropol-Region leistet.

## Literatur

- Ambraseys, N.N. (1970): Some characteristic features of the Anatolian fault zone. – *Tectonophysics*, 9, 2-3, 143-165, 10.1016/0040-1951(70)90014-4
- Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uçarkus, G., Mercier de Lépinay, B., Malavieille, J., Dominguez, S., Gustcher, M.-A., Schmidt, S., Beck, C., Çagatay, N., Çakir, Z., Imren, C., Eris, K., Natalin, B., Özalaybey, S., Tolun, L., Lefèvre, I., Seeber, L., Gasperini, L., Rangin, C., Emre, O., Sarikavak, K. (2005): Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian fault): Implications for seismic hazard in Istanbul. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6, 6, Q06009, 10.1029/2004GC000896
- Barka, A. A. (1992): The North Anatolian Fault. - *Annales Tectonicae*, 6, Supplement, 164-195.
- Baş, M., Yağci, M. Ö. (2008): Disaster Prevention Mitigation Studies for a Safer Urban Life Measures for Preventing Disaster of Istanbul Metropolitan Municipality. – In: Erdik, M. and Zschau, J. (Eds.), Megacity Istanbul Megacity Project Reports, Municipality Disaster Management Center (AKOM), Istanbul, Turkey ([http://www.cedim.de/download/Megacity\\_Istanbul\\_Final\\_Report2008.pdf](http://www.cedim.de/download/Megacity_Istanbul_Final_Report2008.pdf)).
- Bohnhoff, M., Bulut, F., Aktar, M., Childs, D. M., Dresen, G. (2007): The North Anatolian Fault zone in the broader Istanbul/Marmara region: monitoring a seismic gap, (EOS, Transactions, American Geophysical Union, Suppl., 88 (52), vol. 2), AGU 2007 Fall Meeting (San Francisco 2007)
- 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, B09302, 10.1029/2008JB006244
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N., Veis, G. (2000): Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. – *Journal of Geophysical Research*, 105, B3, 5695-5719, 10.1029/1996JB900351
- Parsons, T. (2004): Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey. – *Journal of Geophysical Research*, 109, B05304, 10.1029/2003JB002667
- Tibi, R., Bock, G., Xia, Y., Baumbach, M., Grosser, H., Milkereit, C., Karakisa, S., Zünbül, S., Kind, R., Zschau, J. (2001): Rupture processes of the 1999 August 17 Izmit and November 12, Düzce (Turkey) earthquakes. – *Geophysical Journal International*, 144, 2, F1-F7, 10.1046/j.1365-246x.2001.00360.x
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 6, 1353-1368, 10.1785/0120000006