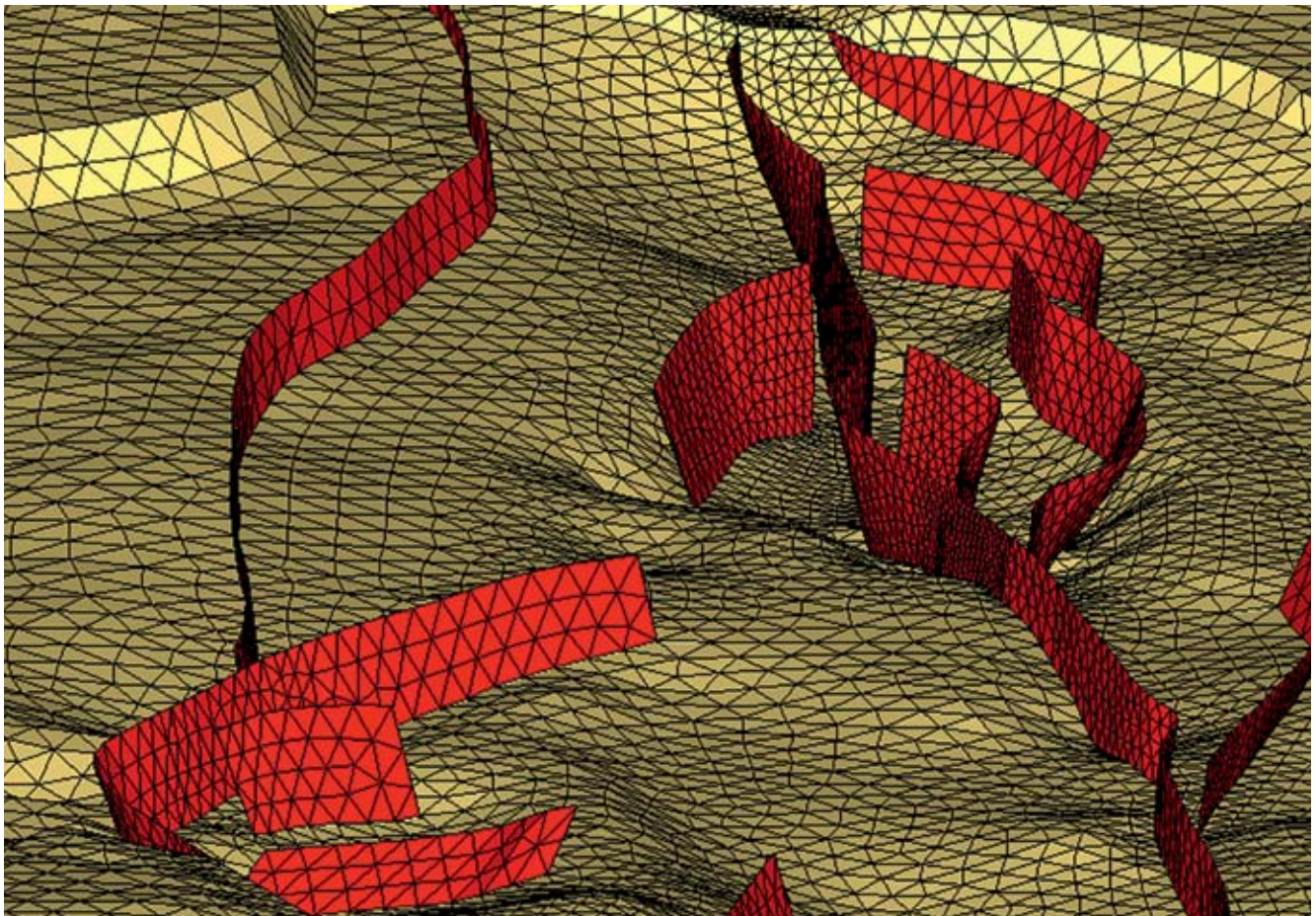


# Computersimulation der Plattenbewegungen südlich von Istanbul

Oliver Heidbach <sup>1</sup>, Tobias Hergert <sup>2</sup>, Gottfried Grünthal <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, <sup>2</sup> Geophysikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

*The Izmit earthquake of August 1999 with a magnitude 7.4 is the latest of an earthquake sequence that started in 1939 in Eastern Turkey. This sequence brought the plate boundary between the Anatolian plate and the Eurasian plate successively from East to West to fail. Thus, the next event in this series is expected to take place West of Izmit, i.e. South of Istanbul under the Marmara Sea. This segment is a so-called seismic gap – the stresses resulting from the plate motion have not been released since the last major earthquake in 1766. One important parameter for earthquake hazard assessment is the slip rate along plate boundaries. However, the precise estimation of these fault slip rates is difficult to determine in this area for two reasons. The plate boundary under the Marmara Sea is split into several splays with complex geometries. Furthermore, the main part of this fault system is below the Marmara Sea and classical observation methods cannot be applied. In order to estimate the fault slip rates a computer simulation is necessary. The simulation results show that the slip rate along the main fault is 10 to 45 % smaller than previously assumed and that it varies along the main fault by 40 %. The latter indicates that the accumulated stresses at this fault will potentially not be released with one strong earthquake, but in several events with smaller magnitude. However, it is important to emphasise that Istanbul, situated at a short distance to the main fault (15 km), still faces a very high seismic hazard.*



## Migration der Erdbeben und aktuelles Risiko

Im August 1999 ereignete sich ein schweres Erdbeben der Magnitude 7,4 in der Nordwesttürkei, das mehrere Wochen im Medieninteresse stand. Umgestürzte Wohnblocks, verbogene Eisenbahnschienen und die tagelang brennende Raffinerie von Izmit sind bleibende Eindrücke dieser Naturkatastrophe. In den umliegenden Dörfern erinnert heute fast nichts mehr an diese Katastrophe. Die wieder eingekehrte Normalität kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich auch unter dem Marmara-Meer in absehbarer Zukunft ein ähnliches Erdbeben ereignen kann.



Abb. 1: Koseismischer Versatz einer Mauer in der Stadt Gölcük 10 km südwestlich von Izmit nach dem Izmit-Erdbeben 1999 mit einer Magnitude von 7,4.

Fig. 1: Coseismic displacement of a wall in the city of Gölcük about 10 km southwest of Izmit due to the 1999 Izmit earthquake with magnitude 7.4.

Durch die Stadt Izmit am östlichen Rand des Marmara-Meeres verläuft die Nordanatolische Verwerfung, die sich unterhalb des Meeres fortsetzt. Entlang dieser Verwerfung bewegen sich die Anatolische und die Eurasische Platte mit etwa 25 mm pro Jahr aneinander vorbei (Abb. 2). Dem Izmit-Beben war im Lauf des vorigen Jahrhunderts eine Reihe von schweren Erdbeben vorausgegangen, die 1939 im Osten Anatoliens begann und mit dem Izmit-Erdbeben 1999 zunächst endete. Würde sich diese Serie fortsetzen, so stünde ein Erdbeben unterhalb des Marmara-Meeres bevor. Der zentrale Abschnitt der Verwerfung hat sich seit dem letzten Starkbeben im Marmara-Meer im Jahr 1766 verhakt und baut kontinuierlich Spannung auf (Hergert & Heidbach, 2010). Dies ist besorgniserregend, da die einzige europäische Metropole Istanbul mit seinen etwa 14 Millionen Einwohnern nur 15 Kilometer von der Verwerfung entfernt am nördlichen Rand des Marmara-Meeres liegt. Da etwa 50 % des Bruttoinlandprodukts der Türkei im Großraum Istanbul erwirtschaftet werden, müsste im Fall eines Starkbebens neben dem möglichen Verlust vieler Menschenleben auch mit erheblichen Auswirkungen auf die Ökonomie der gesamten Türkei gerechnet werden (Erdik et al., 2004).

Eine exakte zeitliche Vorhersage des nächsten Erdbebens ist auch mit aufwändigen Computersimulationen, umfangreichen Beobachtungsdaten der Plattenbewegung, der Seismität und physikalischer Parameter nicht möglich. Kennt man jedoch die Struktur des Untergrunds, können daraus Modelle erstellt werden, welche die Bewegungsraten entlang der Plattengrenze mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Mit diesen Daten kann die Lage und Stärke des zukünftigen Bebens abgeschätzt werden. Diese Ergebnisse fließen wiederum in Modelle ein, welche die Schadenswirkung des zukünftigen Bebens auf die Infrastruktur der Stadt simulieren – eine wichtige Grundlage für die Berechnungen der seismischen Lastannahmen für erdbebengerechte Baunormen am GFZ (Grünthal et al., 2009; Grünthal, 2005), die entsprechende Verstärkung von Gebäuden, Vorbereitungen für den Notfall sowie das Katastrophen-Management (Erdik et al., 2004).

Eine Basisgröße zur Abschätzung der Stärke des möglichen zukünftigen Bebens ist die Bewegungsrate entlang der Plattengrenze. Die Bewegungsrate bestimmt auch die Wiederkehrrate von Starkbeben und ist somit eine wichtige Eingangsgröße für die Methoden der seismischen Gefährdungsabschätzung, die am GFZ entwickelt und eingesetzt werden. Die exakte Bestimmung dieser Bewegungsraten in der Region südlich von Istanbul ist aber aus zwei Gründen besonders schwierig: Zum einen ist die Plattengrenze in dieser Region in ein komplexes System tektonischer Verwerfungen aufgeteilt (Abb. 2b). Zudem entzieht sich die Region direkten Beobachtungsmethoden, da ein Großteil der Plattengrenze unter dem Marmara-Meer liegt. Die Bewegungsraten können daher nur über eine dreidimensionale Computersimulation bestimmt werden.



**Kontakt:** Oliver Heidbach  
(heidbach@gfz-potsdam.de)

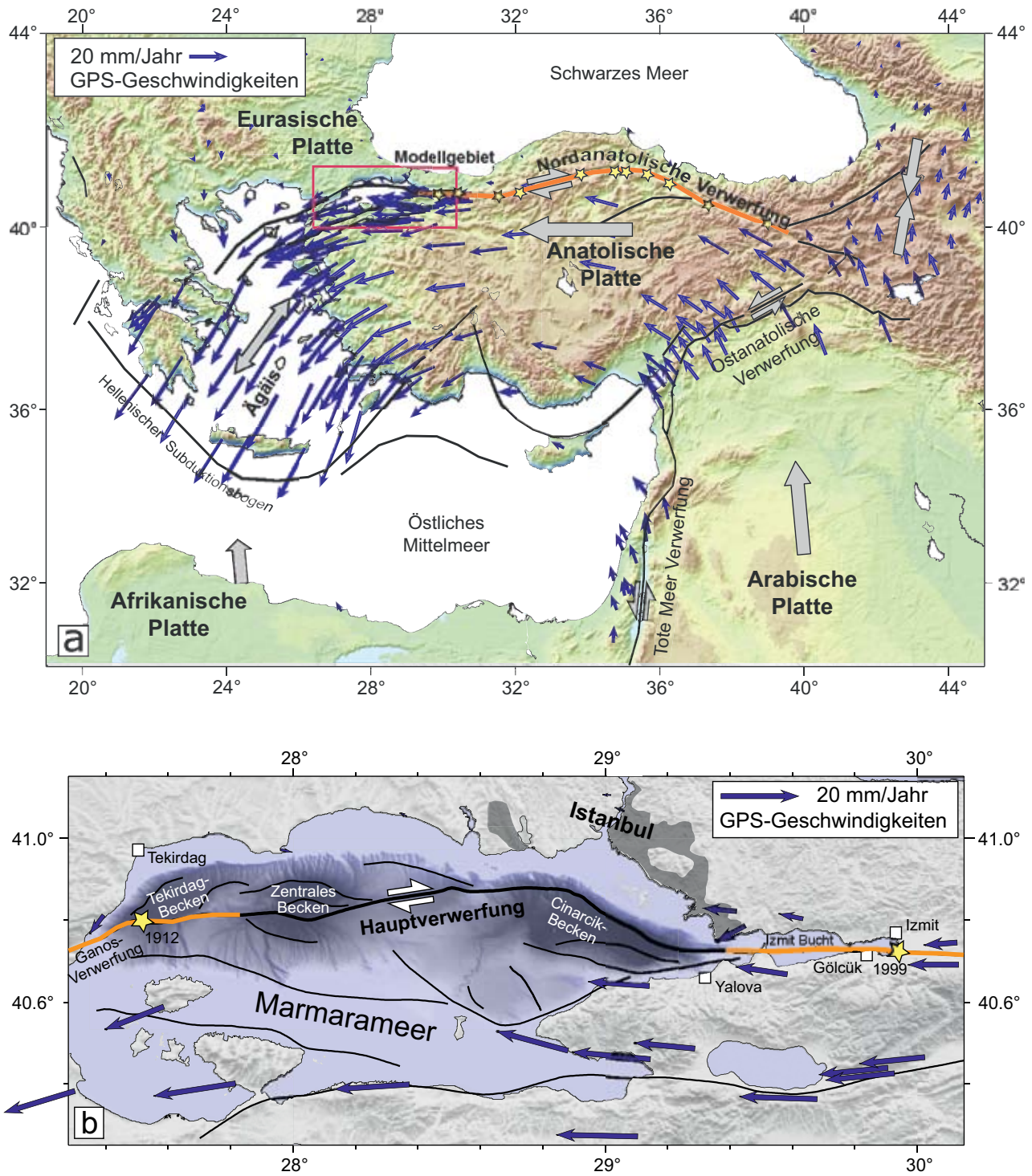


Abb. 2: Geodynamik des östlichen Mittelmeerraums und des Marmara-Meeres südlich von Istanbul. Blaue Pfeile zeigen die GPS-Geschwindigkeiten relativ zur Eurasischen Platte (Reilinger et al. 2006). a) Graue Pfeile zeigen die Bewegungen der tektonischen Platten relativ zur Eurasischen Platte. Die orange Linie markiert die Nordanatolische Verwerfung; die gelben Sterne zeigen die Bebenserie von 1939 bis 1999, die die Nordanatolische Verwerfung mit elf Starkbeben sukzessiv von Ost nach West nach Versagen brachte. Schwarze Linien markieren die Plattengrenzen; das rote Rechteck markiert das Modellgebiet. b) Detailkarte der Marmara-Meer-Region, die das Modellgebiet mit dem komplexen Verwerfungssystem darstellt. Orange Linien und Sterne mit Jahreszahlen markieren die Abschnitte der Hauptverwerfung an der zuletzt Beben stattgefunden haben. Der zentrale Abschnitt hat sich seit 1766 verhakt.

Fig. 2: Geodynamic of the eastern Mediterranean and of the Marmara Sea south of Istanbul. Blue arrows show the GPS velocities relative to the Eurasia plate taken from Reilinger et al. (2006). a) Grey arrows indicate the movement of the tectonic plates relative to the Eurasia plate. Orange line denotes the North-Anatolian fault; yellow stars mark the earthquake series of 1939-1999 that ruptured the North-Anatolian fault with 11 subsequent earthquakes from east to west. Black lines denote the plate boundaries; red box indicates the model area. b) Detailed tectonic map of the Marmara Sea region with the complex fault system. Orange lines and stars with years attached denote the parts of the main fault that had an earthquake. The central segment is locked since 1766.

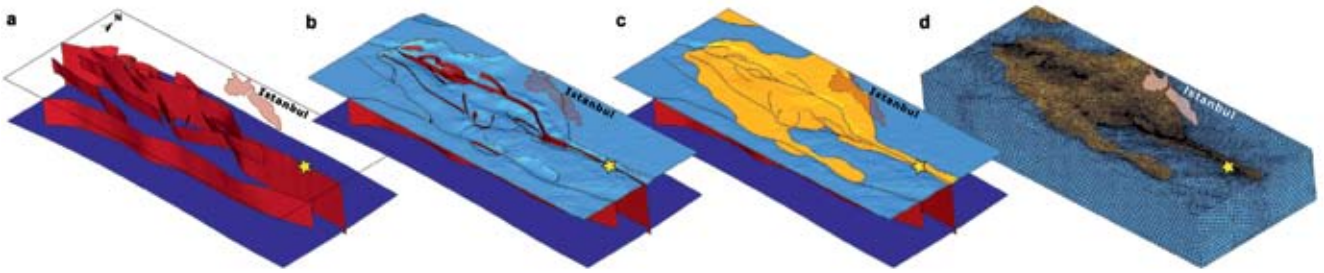


Abb. 3: Modellgeometrie. a) Die dunkelblaue Fläche variiert zwischen 26 km und 35 km Tiefe und markiert den Verlauf der Fläche zwischen Kruste und Mantel. Rote Flächen beschreiben das Verwerfungssystem mit Neigungen zwischen  $70^\circ$  und  $90^\circ$ . b) Die hellblaue Fläche zeigt die Oberkante des Grundgebirges in 0 bis 6 km Tiefe. c) Gelb eingefärbt ist die Sedimentfüllung der Becken mit einer Mächtigkeit von 0 bis 5 km. d) Diskretisierung mit 640 000 finiten Elementen

Fig. 3: Model geometry. a) Dark blue surface varies between 26 km and 35 km depth and marks the layer that separates the mantle from the crust. Red surfaces indicate faults that dip between  $70^\circ$  and  $90^\circ$ . b) Light blue layer shows the basement surface at 0-6 km depth. c) Yellow is the sediment infill of 0-5 km thickness. d) Discretization with 640,000 finite elements

Zur Untersuchung der erdbebenverursachenden Prozesse und zur Entwicklung von Maßnahmen, die das Risiko von Erdbebenschäden in Istanbul mindern, wurde im Rahmen von CE-DIM, dem Center of Disaster Management and Risk Reduction Technology, einer gemeinsamen Initiative des GFZ und KIT, das Projekt Megacity Istanbul etabliert. Die Risikominderung in den stetig wachsenden urbanen Ballungsräumen ist ein zentrales Forschungsthema am GFZ (vgl. dazu den Beitrag von Lühr et al. in diesem Heft).

## Geodynamik der Region

Eine Ursache für die Bewegungsraten an den Verwerfungen im Marmara-Meer ist eine Rotationsbewegung der Anatolischen Platte gegen den Uhrzeigersinn relativ zur Eurasischen Platte (Abb. 2a). Die Geschwindigkeit nimmt dabei von Ost nach West von etwa 25 mm/Jahr in Ostanatolien auf bis zu 38 mm/Jahr in der südlichen Ägäis zu. Die Antriebskräfte für

diese Plattenbewegung sind die Druckkräfte der Kollision der Arabischen Platte mit Eurasien im Osten sowie Zugkräfte aufgrund der nach Süden zurückweichenden Subduktionszone am Hellenischen Bogen (Heidbach & Drewes, 2003). Als Resultat dieser Plattenrandkräfte verschieben sich die Anatolische und die Eurasische Platte entlang der Nordanatolischen Verwerfung horizontal gegeneinander. Diese Relativbewegung findet jedoch nicht kontinuierlich statt. In der Region südlich von Istanbul haben sich die beiden Platten seit 1766 verhakt. So konnten sich hier seit über 240 Jahren Scherspannungen aufbauen, die bei Überschreiten der Scherfestigkeit des Gesteins abrupt abgebaut werden und so zu einem Erdbeben führen.

Nach dem Erdbeben 1999 von Izmit starteten umfangreiche Untersuchungen mit internationaler Beteiligung mit dem Ziel, den bisher nur wenig bekannten Untergrund des Marmara-Meeres zu erforschen (Laigle et al., 2008; Bécél et al., 2009). Mithilfe seismischer Tomographie wurde das

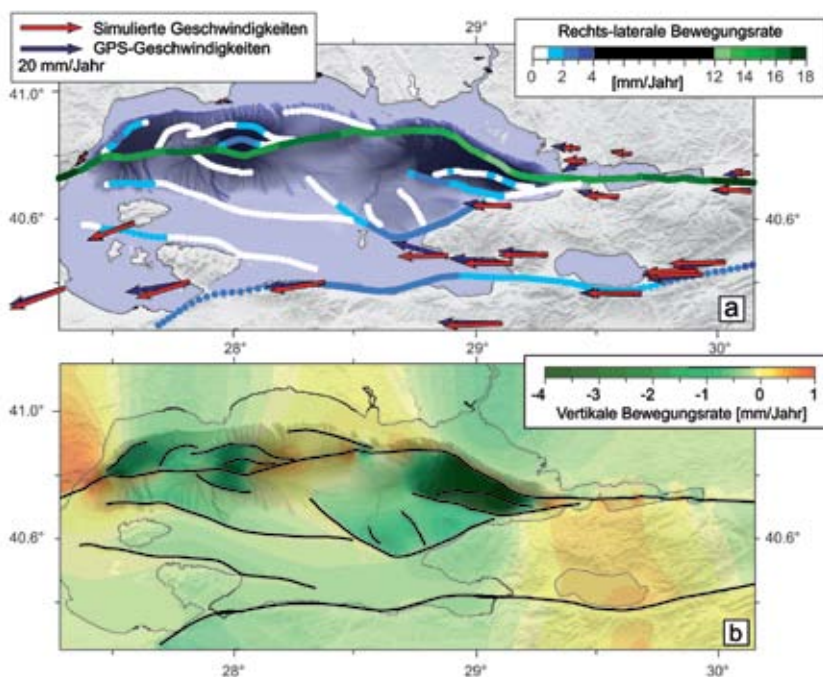


Abb. 4: Kinematische Ergebnisse der Computersimulation. a) Die Geschwindigkeiten aus dem Modell mit verhakteten Verwerfungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den GPS-Geschwindigkeiten. Die simulierten Bewegungsraten der Verwerfungen weisen eine signifikante laterale Variation auf. b) Die vertikalen Bewegungsraten bilden die Beckenstruktur in der Bathymetrie hervorragend ab.

Fig. 4: Kinematic Results of the computer simulation. a) The velocities from the model with locked faults are in good agreement with the GPS velocities. The simulated fault slip rates show significant lateral variation. b) The vertical displacements resemble the basin structure as observed in the bathymetry remarkably well.

Relief des Meeresgrundes erkundet, das hier durch tiefe Becken und untermeerische Hänge geprägt ist, an denen der Meeresboden bis zu einem Kilometer steil abfällt. Abgesunkene und verkippte Grundgebirgsblöcke sowie mit kilometermächtigen Sedimentablagerungen gefüllte Becken (Abb. 2b) zeugen eindrücklich von der tektonischen Aktivität in dem Netzwerk geometrisch komplexer Verwerfungen. Die Struktur dieses Verwerfungssystems ist die wichtigste Eingangsgröße für ein Computermodell, das die Bewegungen simuliert. Ändern sich Richtung und Neigung der Verwerfungen, so beeinflusst dies die Bewegungen maßgeblich und somit auch die seismische Gefährdungsabschätzung.

## Aufbau der Computersimulation

Wesentliches Ziel der hier vorgestellten Computersimulation ist es, die Bewegungen des gesamten Verwerfungssystems unter dem Marmara-Meer zu berechnen. Das Computermodell wird in vier aufeinander folgenden Schritten aufgebaut: (1) Zunächst wird die dreidimensionale Geometrie des Modellgebiets erstellt. Hierzu gehören die verschiedenen Abschnitte der Verwerfungen und die Verschneidung mit den horizontalen Flächen (Abb. 3a-c). Dem Modell werden dann die aus den seismischen Experimenten abgeleiteten elastischen Parameter und die Gesteinsdichte zugeordnet. (2) Im zweiten Schritt werden an dem Modellrand die kinematischen Randbedingungen definiert, die Kräfte durch die Auflast des Wassers des Marmara-Meeres und die Wirkung der Schwerkraft auf die im Modellgebiet vorhandenen Gesteinsschichten bestimmt. (3) Im dritten Schritt wird das Gleichgewicht aller im Modell wirkenden Kräfte berechnet. Die Gesteinsblöcke verschieben und deformieren sich dabei in Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften, bis sich ein Kräftegleichgewicht eingestellt hat. Dieses Gleichgewicht wird über eine mathematische Gleichung, eine partielle Differentialgleichung, berechnet. Da nur für sehr einfache Modelle eine analytische Lösung existiert, muss eine numerische Näherungslösung bestimmt werden. Hierzu wird das Modellgebiet in eine Vielzahl von Tetraedern unterteilt; hier sind es 640 000 einzelne Elemente (Abb. 3d). Diese sogenannten finiten Elemente sind an den Ecken, den Knotenpunkten, miteinander verknüpft. Für diese Knotenpunkte kann eine diskrete Lösung berechnet werden. Gebiete, in denen man große Deformationsraten vermutet, werden fein unterteilt, an den Rändern wird das Netz dagegen weitmaschiger angelegt. (4) Im vierten Schritt wird das Ergebnis der Computersimulation mit modellunabhängigen Beobachtungen wie z. B. GPS-Geschwindigkeiten oder geologischen Absenkungsraten verglichen. Die freien Modellparameter (Reibungskoeffizient und elastische Eigenschaften) sowie die Randbedingungen des Modells werden dann entsprechend verändert, bis die Modellergebnisse zufriedenstellend gut an die modellunabhängigen Beobachtungen angepasst sind.

## Ergebnisse der Computersimulation

Die Computersimulation der Bewegungsraten innerhalb des Verwerfungssystems zeigt, dass diese an der Hauptverwerfung im Marmara-Meer im Vergleich zu früheren Simulationen von Meade et al. (2002), Flerit et al. (2004) und Reilinger et al. (2006) 10 bis 45 % geringer sind. Die zum Teil erheblichen Abweichungen sind auf die im vorliegenden Modell wesentlich detaillierter implementierte Verwerfungsgeometrie zurückzuführen (Hergert & Heidbach, 2010). Weiterhin zeigen die Ergebnisse eine hohe laterale Variation der Bewegungsraten entlang der Hauptverwerfung von 12,8 mm/Jahr bis 17,8 mm/Jahr (Abb. 4). Daraus lässt sich schließen, dass ein kritischer Spannungszustand entlang der Verwerfung zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht wird. Dies hätte zur Folge, dass sich die aufgestauten Scherspannungen abschnittsweise in mehreren kleinen Erdbeben mit kleiner Magnitude entladen und nicht in einem großen, das die gesamte seismische Lücke zum Versagen bringt.

## Bedeutung für Istanbul

Trotz der geringeren Bewegungsraten, die aus unserem Modell resultieren, und der trotz postulierten Segmentierung kann ein zukünftiges Beben im Marmara-Meer nach dieser Computersimulation im Magnitudenbereich  $M > 7$  liegen. Bezieht man in die Gefährdungsabschätzung mögliche Ausbreitungseffekte mit ein, wie z. B. eine Verstärkung der seismischen Wellenamplitude und Standorteffekte sowie die geringe Entfernung der Stadt von der Verwerfung, so ist Istanbul nach wie vor eine Megacity mit sehr hoher seismischer Gefährdung.

Ziel der neuen Computersimulationen, die am GFZ mit diesem geomechanischen Modell derzeit durchgeführt werden, ist es, verschiedene mögliche Szenarien von zukünftigen Erdbeben zu modellieren. Kombiniert man diese Szenariobeben mit Ausbreitungseffekten von seismischen Wellen, können daraus Prognosen über mögliche Schäden und konkrete Maßnahmen zur Risikominderung abgeleitet werden, eine der großen Herausforderungen der Forschung am GFZ.

## Danksagung

Dieses Projekt wurde im Rahmen von CEDIM (Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology) gefördert. Außerdem danken wir der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, dem DFG-Sonderforschungsbereich 461 Starkbeben und der Task Force VII des Internationalen Lithosphärenprogramms für zusätzliche finanzielle Unterstützung. Weiterhin danken wir den Firmen Altair und Simulia für die Campus-Lizenzen der Softwarepakete HYPERMESH™ und ABAQUS™. Ein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Alfred Hirn, Frau Dr. Anne Becél und Frau Dr. Mireille Laigle vom Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) für die Bereitstellung der Daten aus dem Seismarmara Experiment Leg-1 und hilfreiche Diskussionen.

## Literatur

- Bécel, A., Laigle, M., de Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Galvé, A., Shimamura, H., Murai, Y., Lépine, J.-C., Sapin, M. & Özalaybey, S. (2009): Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the Seismarmara Leg1 offshore-onshore reflection-refraction survey. – *Tectonophysics*, 467,1-4, 1-21, 10.1016/j.tecto.2008.10.022
- Erdik, M., Demircioglu, M., Sesetyan, K., Durukal, E., Siyahi, B. (2004): Earthquake hazard in Marmara Region, Turkey. – *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 8, 605-631, 10.1016/j.soildyn.2004.04.003
- Flerit, F., Armijo, R., King, G., Meyer, B. (2004): The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean. – *Earth and Planetary Science Letters*, 224, 3-4, 347-362, doi:10.1016/j.epsl.2004.05.028
- Grünthal, G., Bosse, C., Stromeyer, D. (2009): Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland : Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 'Stauanlagen', (Scientific Technical Report , 09/07), Potsdam, 81 p., 10.2312/GFZ.b103-09076
- Grünthal, G. (2005): Die Erdbebenzonenkarte als Bestandteil der neuen DIN 4149, Tagungsband der DGEB-DIN-Gemeinschaftstagung, Beuth, 3-24.
- Heidbach, O., Drewes, H. (2003): 3-D Finite Element model of major tectonic processes in the Eastern Mediterranean. – In: Nieuwland, D. A. (Eds.), *New insights in structural interpretation and modelling*, (Special publications ; 212), Geological Society, 261-274, 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.17
- Hergert, T., Heidbach, O. (2010): Slip-rate variability and distributed deformation in the Marmara Sea fault system. – *Nature Geoscience*, 3, 132-135, 10.1038/ngeo739
- Laigle, M., Becél, A., de Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Özalaybey, S., Members of SEISMARMARA Leg 1 Team (2008): A first deep seismic survey in the Sea of Marmara: Deep basins and whole crust architecture and evolution. – *Earth and Planetary Science Letters*, 270, 3-4, 168-179, 10.1016/j.epsl.2008.02.031
- Meade, B. J., Hager, B. H., McClusky, S. C., Reilinger, R., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A., Özener, H. (2002): Estimates of Seismic Potential in the Marmara Sea Region from Block Models of Secular Deformation Constrained by Global Positioning System Measurements. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1, 208-215, 10.1785/0120000837
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G. (2006): GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. – *Journal of Geophysical Research*, 111, B05411, 10.1029/2005JB004051.