

**Zeitschrift:** Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

**Band:** 93 (1995)

**Heft:** 4: ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ : Département des sciences géodésiques

**Artikel:** Satellitengeodäsie und Geodynamik : aktuelle Projekte der ETH-Zürich in Griechenland und Anatolien

**Autor:** Kahle, H.-G. / Müller, M.V. / Straub, C.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-235151>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Satellitengeodäsie und Geodynamik: Aktuelle Projekte der ETH-Zürich in Griechenland und Anatolien

H.-G. Kahle, M. V. Müller, C. Straub

Nach wie vor hat der Planet Erde bei weitem nicht alle seine Geheimnisse preisgegeben. Die Geodäsie kann mit modernen Methoden dazu beitragen, Veränderungen der Erdkruste zu erfassen und damit geodynamische Modellierungen zu unterstützen. Satelliten ermöglichen es, Bereiche mit weitreichender Bedeutung für die Erfassung von planetarischen Änderungen in die geodätische Forschung einzubeziehen. Hierzu gehören z.B. Meeresspiegeländerungen, globale plattentektonische Bewegungen und Intra-Plattendeformationen, Abschmelzen der polaren Eiskappen, Erdrotationsschwankungen und Gravitationsfeldänderungen. Radiowellenverfahren des Satellitensystems GPS eröffnen auch für die Praxis neue Wege. Zum Beispiel werden im Umweltprogramm der «Commission of the European Communities» und des Internationalen Lithosphärenprogramms (ILP) Gezeitenpegel im Mittelmeerraum hochpräzise mit GPS eingemessen und durch Laser- und Radioteleskope weltweit miteinander verknüpft, um globale Meeresspiegelunterschiede und deren zeitlichen Änderungen zu erfassen. Dieser Bericht wird anhand von Forschungsprogrammen in Griechenland und Anatolien die Möglichkeiten geodätischer Vermessungen im Zusammenhang mit geodynamischen Fragestellungen aufzeigen.

*La planète terre n'a pas encore révélé tous ses mystères. La géodésie peut, grâce à ses méthodes modernes, contribuer à détecter des modifications de la croûte terrestre et aider ainsi à élaborer des modélisations géodynamiques. Il est possible, à l'aide de satellites, d'étendre la recherche géodésique à des domaines qui ont une très grande importance pour la détection de modifications planétaires, par exemple de variations des niveaux des mers, de mouvements globaux des plaques tectoniques et de déformations internes de celles-ci, de fonte des glaces polaires, de variations de la rotation de la terre et des champs de gravitation. Le procédé basé sur les ondes radio du système de satellites GPS offre de nouvelles possibilités d'application pratique. Dans le cadre du programme «environnement» de la «Commission of the European Communities» ainsi que du programme international de lithosphère (ILP) on procède par exemple à la mensuration de haute précision des marées dans la région de la Méditerranée à l'aide du GPS que l'on interconnecte à l'échelon global par des laser- et radiotélescopes afin de déterminer les variations globales des niveaux des mers ainsi que leurs variations dans le temps. Cet article illustrera les possibilités, sur la base de programmes de recherche en Grèce et en Anatolie, de mensurations géodésiques relatives à des questions de géodynamique.*

Il pianeta terra non ha di gran lunga ancora rivelato tutti i suoi segreti. Con metodi moderni, la geodesia può contribuire a registrare i mutamenti della crosta terrestre e ad appoggiare la simulazione geodinamica. I satelliti permettono di includere nella ricerca geodetica anche settori di vasta portata per il rilevamento dei cambiamenti planetari. Tali settori comprendono, per es., le mutazioni del livello del mare, i movimenti tettonici a placche, le deformazioni tra le placche, lo scioglimento delle calotte polari, le variazioni di rotazione della terra e i mutamenti dei campi gravitazionali. I processi di radioonde del sistema di satellite GPS aprono anche nuove possibilità pratiche. Per esempio, nel programma ambientale della Commissione delle comunità europee e del programma internazionale sulla litosfera (ILP), con il GPS si misurano con grande precisione i livelli delle maree nel Mediterraneo e li si collega, tramite il radiotelescopio o il lasertelescopio, ai dati di tutto il mondo per rilevare le differenze globali del livello dei mari e le loro variazioni temporali. Basandosi su programmi di ricerca portati avanti in Grecia e Anatolia, questa relazione presenta le possibilità offerte dalle misurazioni geodetiche in correlazione a problemi di geodinamica.

### 1. Einleitung

Rezente Erdkrustenbewegungen sind im Zusammenhang mit der Erdbebenvorhersageforschung von grossem Interesse. Das U.S. Navigationssystem GPS (Global Positioning System) hat Möglichkeiten eröffnet, Stationen über mehrere Hundert Kilometer hinweg in relativ kurzer Messdauer mit bisher nicht gekannter Genauigkeit zu vermessen und damit auch deren zeitlichen Änderungen zu bestimmen. Dies trägt wesentlich dazu bei, dass Strain- und Stress-Modelle geodynamischer Vorgänge erstellt werden können. Neben den geodätischen Messungen, welche die langfristigen Deformationen erfassen, geben seismische Daten Auskunft über Erdbebenmechanismen und damit über die kurzzeitigen, sogenannten co-seismischen Bewegungen. Von besonderem Interesse ist das Aufspüren von Erdbebenvorläufern und von zum Teil tagelang andauernden post-seismischen Deformationen und Kriechbewegungen. Erst mit diesen Informationen können verlässliche Energiebilanzen und rheologische Parametrisierungen der seismisch aktiven Gebiete vorgenommen werden. In jüngster Zeit ist zudem durch Fernerkundungstechnologien an Bord von radar-gestützten Satelliten eine neue Möglichkeit zur Detektion von Krustenverschiebungen eröffnet worden (Massonet et al., 1993; Zebker et al., 1994). Es handelt sich um die Radar-Interferometrie, die bereits im Flugzeugbereich für die Erstellung von digitalen Geländemodellen eingesetzt wird. Die drei Technologien (Satellitengeodäsie, Seismologie und differentielle Radar-Interferometrie) sollen in N-W Griechenland, einem der seismisch aktivsten Gebiete Europas, eingesetzt werden, um dort den Aufbau der Erdkrustenspannungen und -Deformationen zu studieren.

### 2. Forschungsrahmen Geodynamik

Nach den Erkenntnissen der globalen Plattentektonik gibt es im wesentlichen drei Bewegungsvorgänge zwischen den Lithosphärenplatten: (1) In einigen Zonen gleiten die Platten horizontal aneinander vorbei (Strike-Slip-faulting). (2) In anderen Gebieten kommt es zu Kollisionen (Thrust faulting und Subduktion) oder (3) zum Auseinanderdriften (Normal faulting). Das bekannteste Beispiel für horizontales Vorbeigleiten ist die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien. In Lateinamerika ist es die mit häufigen Erdbeben verbundene Bocono-Verwerfung. In Griechenland ist es die Kephalaria-Verwerfung, in der Türkei die Nordanatolische Verwerfung. Während die Relativbewegung zwischen ozeanischen Platten in relativ schmalen Zonen stattfindet, welche den Platten erlauben, sich ohne merkliche Verformung

aneinander vorbeizubewegen, äussert sich die Relativbewegung zwischen kontinentalen Platten zumeist in Deformationen, die sich über Hunderte bis Tausende von Kilometern über die Plattenränder ausdehnen können. Sie sind verbunden mit Erdbeben und Verwerfungen der oberflächennahen Gesteinsschichten. Die Erdbeben liefern – zeitlich gesehen – bruchstückhafte Informationen über die sich aufbauenden Spannungen. Es besteht deshalb der Wunsch nach Daten aus anderen Quellen, um den gesamten zeitlichen Verlauf des Spannungsaufbaus zu evaluieren. Hierzu gehören satellitengeodätische Messungen und in Zukunft radarinterferometrische Verfahren.

Formal lassen sich die Plattengrenzen aufgrund der Seismizitätsverteilung definieren. Dabei ist aber zu bedenken, dass es sich bei den meisten Erdbeben um Deformations- und Bruchvorgänge in der oberen Erdkruste (bis zu Tiefen von 15 bis 20 km) handelt. Zwar können mittels kinematischer Herdlösungen seismotektonische Vorgänge abgeleitet werden, doch sind diese nicht unbedingt repräsentativ für die globalen Bewegungen der grossen Lithosphärenplatten. Dies gilt auch insbesondere für Eurasien und Afrika (Mueller und Kahle, 1993). Denkt man sich die eurasische Platte festgehalten, dann rotiert die afrikanische Platte wegen der grösseren Ausdehnungsrate im Südatlantik im Gegenuhrzeigersinn um einen Pol bei den Kapverdischen Inseln (Argus et al., 1989). Die «Plattengrenze» ist eine zwischen den beiden Platten liegende mehrere hundert Kilometer breite Übergangszone, deren Deformation nicht gleichmässig erfolgt, sondern räumlich in sehr komplexer Weise verteilt ist.

Abbildung 1 zeigt die aktiven tektonischen

Zonen in der östlichen Mittelmeerregion. Unsere Untersuchungen konzentrieren sich auf die Gebiete um die Kephalonia-Verwerfung und das Marmara-Meer.

Dies sind die gegenwärtigen Kenntnisse über die Relativbewegungen der im Mittelmeerraum identifizierten Deformationsstrukturen: Der südliche Teil der Ägäis bewegt sich, relativ zu Eurasien, mit dem Kreta-Bogen nach S-SW. Gleichzeitig erfolgt die Subduktion der afrikanischen Platte. Die Bewegungen verursachen eine ausgeprägte NE-SW-orientierte Extension des zentralgriechischen und ägäischen Raumes.

Geodätische Messungen, die in regelmässigen Zeitabständen ausgeführt werden, erlauben es, Aussagen über das Deformationsverhalten und die daraus resultierenden geodynamischen Konsequenzen zu machen. Von besonderem Interesse ist die Permanentbeobachtung mit GPS, um das mechanische Verhalten der Erdkruste «on-line» zu studieren.

### 3. Technologie GPS

GPS ist ein satellitengestütztes Navigationssystem, welches zur Zeit aus 26 Satelliten besteht, die in sechs ca. 20000 km hohen Bahnebenen unter einer Inklination von 55° zur Äquatorebene angeordnet sind. Jeder Satellit sendet Signale, basierend auf zwei Trägerfrequenzen L1 und L2 aus, moduliert mit Zeitcodes und Informationen, welche die vorausberechneten Satellitenbahndaten enthalten.

Aus differentiellen Phasenmessungen an den Trägerwellen werden die Vektoren zwischen den Satellitenantennen dreidimensional bestimmt und aus wiederholten Messungen deren zeitliche Änderungen ermittelt. Bei kontinuierlicher Registrie-

rung erhält man den ganzen Bewegungsablauf und damit die zeitliche Deformation des betrachteten Erdkrustenabschnittes. GPS wird in der Geodynamik vornehmlich zur Verdichtung der SLR- und VLBI-Netze sowie zur Feinvermessung seismotektonisch aktiver Störzonen eingesetzt.

Gegenwärtig liegt die Genauigkeit der Radiowellungsverfahren im Bereich von einigen Millimetern über Basislinien von einigen 10 km Länge. Bei Permanentmessungen, wie sie im globalen IGS-Netz vorgenommen werden, erreicht man sogar Genauigkeiten von wenigen Zentimetern für 1000 km grosse Netze (Beutler, 1993). Solche Präzision erreicht man allerdings nur, wenn man diverse Reduktionen an den Messungen anbringt (z.B. Orbit-Parameter, Ionosphären- und Troposphäreinflüsse; siehe z.B. (Eckert et al., 1992) für 3D Meteo-Modellierung).

Bis heute kommen in der Geodäsie meistens «Offline»-Auswerteverfahren zum Einsatz. Dabei werden die Differenzen der Phasenmessungen zwischen zwei Stationen zum selben Satelliten gebildet. Diese sogenannten «Single»-Differenzen werden ein zweites Mal differenziert, indem die Differenzen zwischen zwei «Single»-Differenzen zu unterschiedlichen Satelliten gebildet werden. Daraus erhält man sogenannte «Double»-Differenzen, die als Beobachtungsgrössen in die Ausgleichung eingehen.

### 4. Geodynamische Modellierungen

Ein Ziel von geodynamischen Modellierungen ist es, geologische, tektonische und seismologische Daten zur Beschreibung von kristallinen Bewegungsvorgängen mit geodätischen Messgrössen in ein konsistentes numerisches Gerüst einzubinden. Das Modell, allerdings, sollte nicht nur die qualitativen und phänomenologischen Befunde richtig wiedergeben, sondern auch quantitative Messungen in befriedigender Masse annähern. Diese Forderungen machen sowohl intuitive wie auch mathematisch beschreibbare Modellbildungen nötig.

Probleme bei der Modellierung ergeben sich nicht nur durch die Berücksichtigung des viskosen Verhaltens des Materials, sondern auch durch unetliche Ereignisse. So sind viele Bewegungen im lokalen und regionalen Bereich durch Schwächezonen oder alte reaktivierte Brüche vorgezeichnet.

Ein effizientes und kraftvolles Instrument zur numerischen Lösung dieser Probleme ist die Methode der Finiten Elemente (FEM). Sie ist im Vergleich zu anderen Modellbeschreibungen und Lösungsverfahren, etwa der Methode der finiten Differenzen, flexibler.

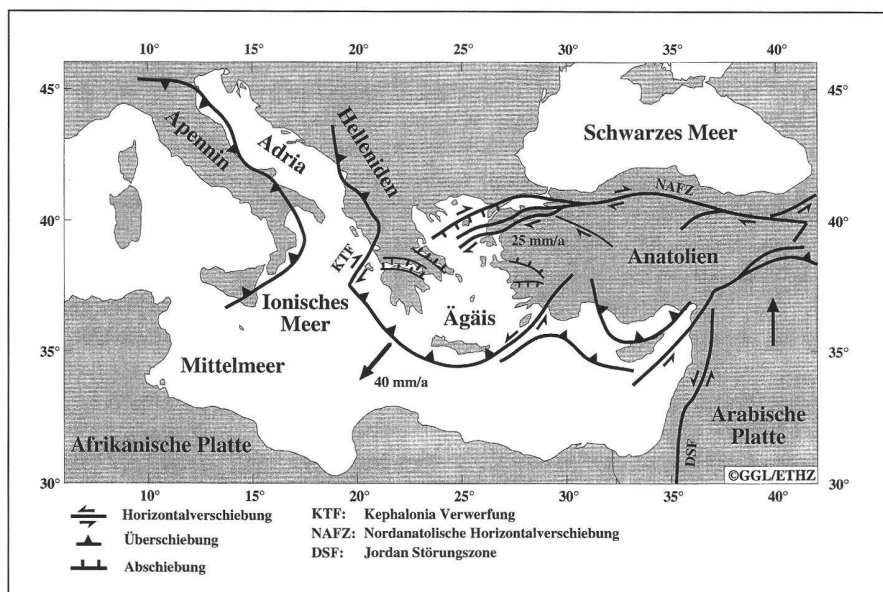


Abb. 1: Aktive tektonische Zonen in der Mittelmeerregion. Die Verschiebungsraten sind relativ zu Süditalien resp. Istanbul angegeben.

## 5. Untersuchungsgebiet Westhellenischer Bogen in Griechenland

Da die klassischen Vermessungsmethoden früher im Bereich der globalen geodynamischen Forschung nur wenig Impulse setzen konnten, reifte am Geodesy and Geodynamics Lab (GGL) des IGP die Idee, in einer seismisch aktiven Zone durch wiederholtes Messen eines Punktfeldes Verschiebungen und Deformationen zu detektieren. Die Wahl fiel dabei nicht ganz zufällig auf Griechenland. Zum einen bestanden seit geraumer Zeit gute Kontakte zu international angesehenen Wissenschaftlern der Technischen Universität Athen, zum anderen sind dort in der Kollisionszone zwischen Afrika und Eurasien die grössten Verschiebungen in Europa zu erwarten. Das von uns gewählte Gebiet zwischen Korfu und Kreta ist seismisch enorm aktiv; verschiedene grössere Erdbeben haben auch in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts verschiedentlich Tod und Zerstörung gebracht.

1989 wurde das GPS-Netz rekognosziert und vermarktet. In der Zwischenzeit wurden drei Hauptmesskampagnen durchgeführt – ergänzt durch einige Einzelmessungen in den Jahren 1990, 1992 und 1994. Mit Hilfe der im Feld erhobenen Daten galt es in einem ersten Schritt, pro Messepoche einen Satz von Koordinaten (mit zugehörigen Genauigkeiten) zu bestimmen. Verwendet wurde dazu die bekannte Berner Software (Rothacher et. al., 1993). Ein zweiter Schritt bestand darin, die erhalte-

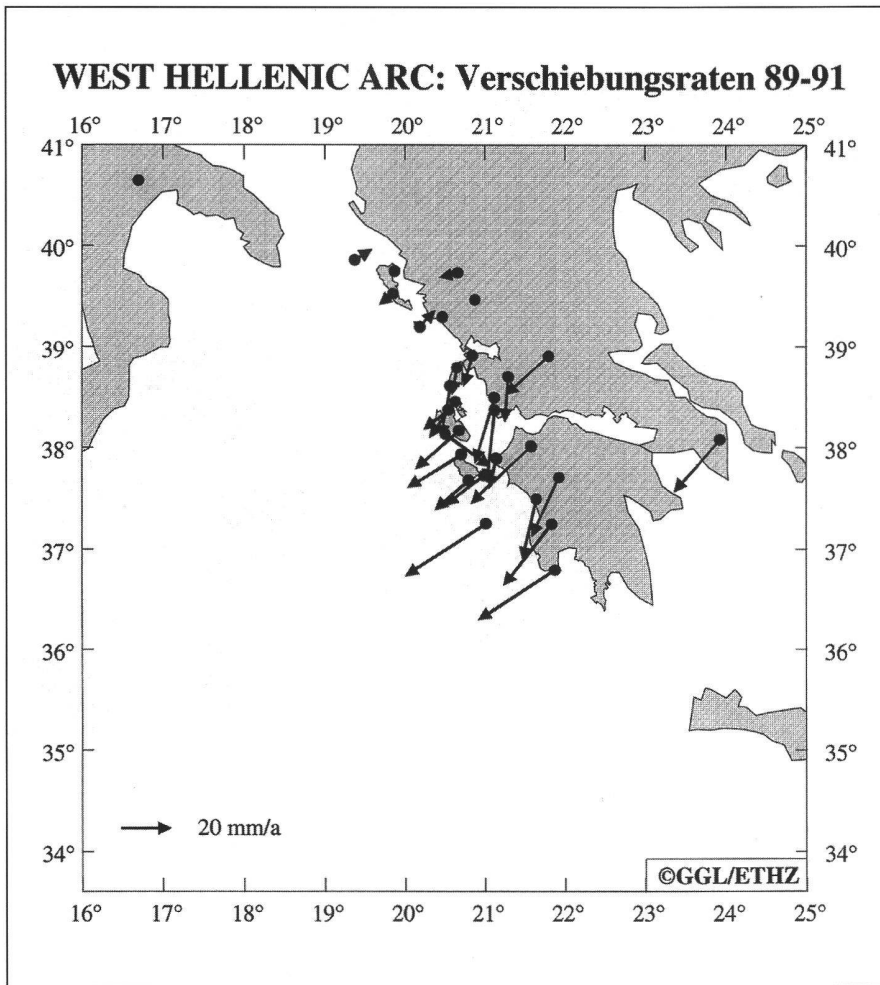


Abb. 2: Beobachtete Verschiebungsraten (1989–1991) relativ zu Matera (Süditalien).

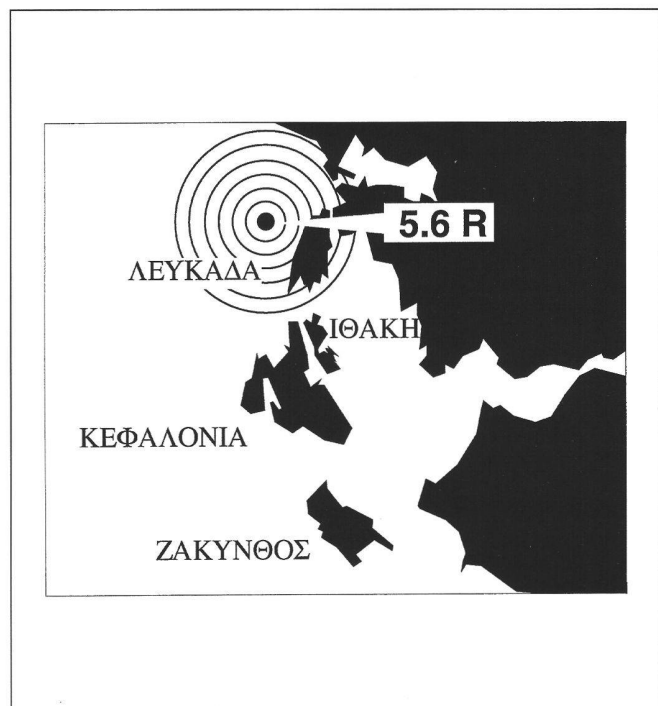
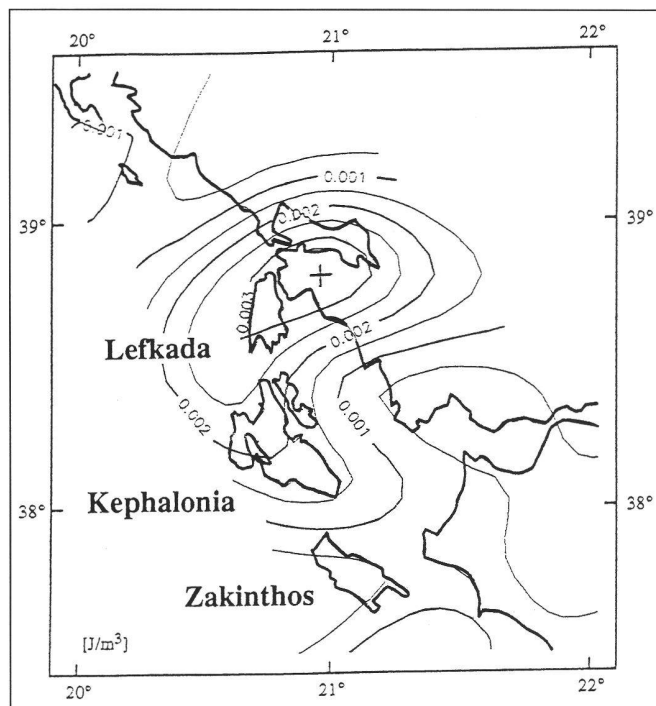
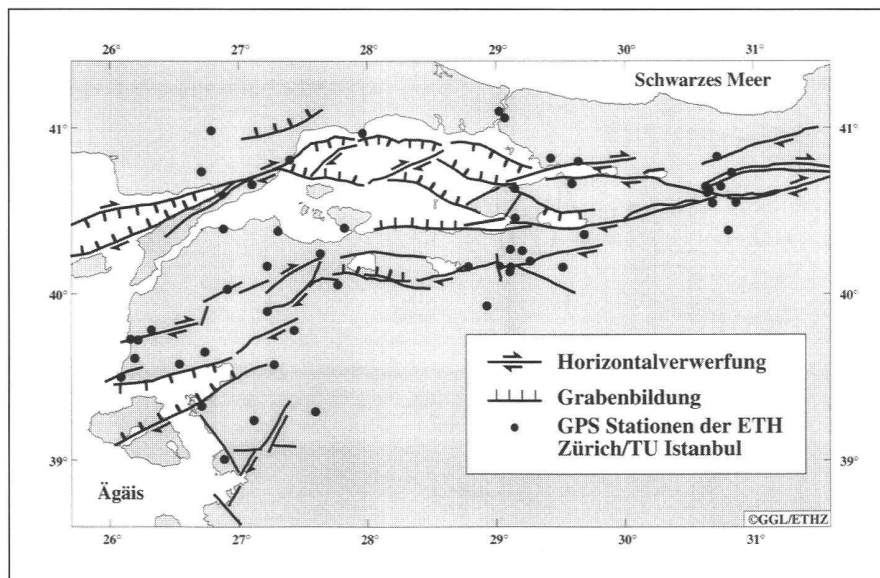


Abb. 3: Links: maximale Deformationsenergiedichten im Gebiet Kephalonia. Rechts: Erdbeben bei Lefkada vom 25. 2. 1994.





**Abb. 4: Neotektonische Bruchstrukturen (Barka, 1992) in der Marmararegion (inkl. GPS-Stationen).**

nen Ergebnisse zu analysieren, auszuwerten und zu interpretieren. Dies beinhaltet die Strain-/Stressanalyse, das Bestimmen von Zonen maximaler Deformationsdichten und das Modellieren von tektonischen Strukturen.

Das ETH-Projekt «West Hellenic Arc» erfährt nach Osten eine Fortsetzung durch das «Central Greece»-Netz, bei welchem die ETH zusammen mit den englischen Universitäten aus Newcastle, Nottingham und Oxford sowie der NTU Athen bei den drei durchgeführten Kampagnen im Juni 1989, Oktober 1991 und Mai 1993 eine aktive Rolle gespielt hat. Nach Westen wird der Westhellenische Bogen im Rahmen des NASA-Programms «Dynamics of the Solid Earth (DOSE)» an das Netz des GPS-Projekts «Calabrian Arc» angeschlossen («What a Cat»: West Hellenic Arc Tectonics and Calabrian Arc Tectonics (Kahle et al., 1993)).

Abbildung 2 zeigt die relativ zu Matera (Süditalien) ermittelten Verschiebungen zwischen 1989 und 1991. Aus den Resultaten geht hervor, dass es zwei sich deutlich unterscheidende Zonen gibt: Die (relativ) «unbewegte» Zone in Süditalien und Nord-West-Griechenland sowie andererseits Zentral-Griechenland und der Peloponnes mit einer einheitlichen Bewegung nach Süd-Südwesten mit etwa 40 mm/a. Die Trennzone zwischen den beiden ausgeprägten Bewegungsfeldern liegt im Bereich der Insel Kephallonia (Kephallonia Transform Fault). Neuere Auswertungen (Smith et al., 1994; Robbins et al., 1994) von Satellite Laser Ranging-Messungen auf weiter verteilten Stationen im östlichen Mittelmeer haben gezeigt, dass dieses SSW orientierte Bewegungsfeld das gesamte Gebiet der Süd-Ägäis umfasst. Die Koordinatensätze aus den GPS-Messungen dienen als Input für die Strain-

/Stressanalyse. Das Strainfeld wurde mit Hilfe der Methode der Kollokation aufgrund der beobachteten Verschiebungen interpoliert.

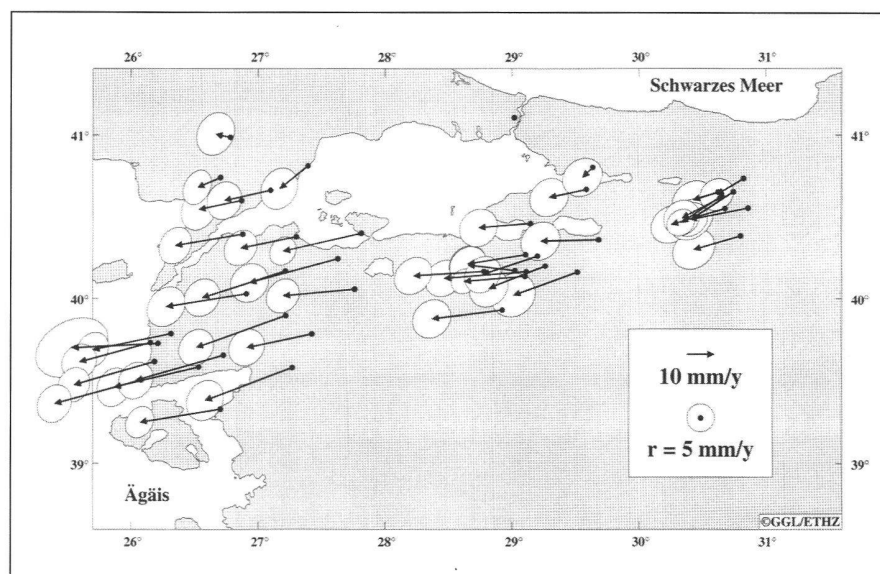
Für eine weitere Interpretation betrachten wir das untersuchte Gebiet als einen elastisch verformbaren Körper. Dazu leiten wir aus dem Deformationstensor unter Einbezug von Dehnungs-Spannungs-Beziehungen den Spannungstensor her. Unter Einbezug der berechneten Scherspannungen lassen sich die Deformationsenergiedichten für das untersuchte Gebiet ermitteln (Abbildung 3). Das Maximum ist zentriert um die Insel Lefkada. Ohne den Anspruch zu erheben, eine Erdbebenvorhersage gemacht zu haben, können wir dennoch feststellen, dass das Erdbeben von Lefkada am 25. Feb. 1994 mit der Magnitude 5.6 im Maximum der von

uns vorher festgestellten Deformationsenergiedichte liegt. Am 29. November 1994 (Magn. 5.4) und 1. Dezember 1994 (Magn. 5.3) haben weitere Beben Lefkada erschüttert.

## 6. Untersuchungsgebiet Marmararegion

Die geodynamischen Prozesse in NW-Anatolien spielen für den Mechanismus der Tektonik des östlichen Mittelmeeres eine entscheidende Rolle: Die dominierenden Strukturen des vorgestellten Untersuchungsgebietes rund ums Marmarameer liegen am westlichen Ende der Nordanatolischen Horizontalverwertung (NAFZ) und in deren Übergang in ein komplexes System von Grabenbrüchen und Horizontalverwertungen (Abbildung 4). Das beschriebene Geodynamikprojekt ist in das Polyprojekt MARMARA der ETH Zürich eingebettet, in welchem ETH-Gruppen der Geologie, Geothermie, Seismologie und Geodäsie zusammenarbeiten (Schindler et al., 1993). Die Durchführung des Projektes wäre ohne die Zusammenarbeit mit türkischen Partnern (TU Istanbul und Generalkommandantur für Vermessungswesen, Ankara) undenkbar. Durch die verschiedenen geowissenschaftlichen Forschungsgruppen ist sichergestellt, dass Beobachtungen aus vielen unterschiedlichen Blickwinkeln zusammengetragen und ausgewertet werden. Aufgabe der Geodäsie ist die Bestimmung des Geschwindigkeits- und Deformationsfeldes. Hierzu wurden 1990 mit Hilfe von ETH-Geologen vorgängig 52 Punkte rekognosziert und vermarktet.

In den Jahren 1990, 1992 und 1994 wurde je eine GPS-Kampagne durchgeführt. Resultate der Messungen von 1990 und 1992 sind in der Abbildung 5 dargestellt. Sie zeigen eindrücklich, wie der Anatoli-



**Abb. 5: Beobachtete Verschiebungsraten (1990–1992) relativ zu Istanbul.**

sche Block gegenüber der als stabil angenommenen Eurasischen Platte nach Westen drifft. Dabei beschleunigt sich die Bewegung von Osten nach Westen von 20 mm/a auf rund 30 mm/a. Diesem Bewegungsmuster ist zusätzlich eine Nord-Süd gerichtete Extension überlagert. Sie ist für die vielen Grabenbildungen rund ums Marmarameer verantwortlich. Weiter sieht man deutlich, wie der generelle Ost-West Trend der Verschiebungen gegen Westen nach Süden abbiegt. Der Grund für die Extensionskomponente und das Abbiegen dürfte mit den seismotektonischen Prozessen im Ägäischen Raum zusammenhängen (Straub und Kahle, 1994). Auswertungen von weiter verteilten GPS-Messungen haben gezeigt (Oral et al., 1993), dass die Größenordnung von 25 mm/a für die Bewegung entlang der gesamten Nordanatolischen Verwerfung zutreffen dürfte.

Vergleiche mit seismologischen und neotektonischen Daten ergaben befriedigende Übereinstimmungen. So wurde das aus den GPS Daten ermittelte Strainfeld mit den Extensionsfeldern aus rund 60 Herdflächenlösungen von Erdbeben und der geometrischen Anordnung der Brüche einander gegenübergestellt. Die Analysen zeigen, dass die drei Deformationsmuster gut zueinander passen. Dies ist um so erstaunlicher, als die drei Datensätze komplett verschiedene Zeiträume repräsentieren (Geologie  $\approx$  mehrere Millionen Jahre, Seismologie  $\approx$  70 Jahre, Geodäsie  $\approx$  2 Jahre).

Endziel der Arbeiten ist die Erstellung eines geodynamischen Modelles der Marmara Region, welches den neuesten Erkenntnissen der verschiedenen erdwissenschaftlichen Disziplinen Rechnung trägt. Diese Berechnungen werden mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Dabei möchten wir nochmals darauf hinweisen, dass die multidisziplinäre Zusammenarbeit in einer Gemeinschaft, wie sie das Polyprojekt Marmara darstellt, unerlässlich ist.

## 7. Ausblick

Es ist geplant, in einem etwa 100 km x 100 km grossen Gebiet, zentriert um die Kephalaria-Verwerfung, für eine Zeitdauer von etwa drei Monaten ein permanent messendes GPS-Stationsnetz aufzubauen und in derselben Zeit im gleichen Gebiet ein Erdbebennetz mit mobilen Seismographen zu beobachten. Mit einigen Verbindungsstationen soll dieses Netz mit unseren bisherigen regionalen Netzen (West Hellenic Arc und Central Greece) verknüpft werden. Die Daten sollen interdisziplinär verarbeitet werden, um ein geodynamisches Modell für die seismotektonischen Prozesse zu erarbeiten.

Als Datenmaterial werden zudem Radarmessungen vom ERS 1 und ERS 2-Satelliten der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA verwendet (Geographisches Institut der Universität Zürich (Nüesch, Meier, Werner)).

Die innerhalb des Marmaraprojektes gesammelten Informationen aller beteiligten geowissenschaftlichen Gruppen werden gemeinsam ausgewertet. Daraus wird bis Ende 1995 ein multidisziplinäres geodynamisches Modell der Marmara-Region erstellt.

### Literatur:

Argus, D.F., Gordon, R.G., Demets, C. and S. Stein (1989): Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault, *J. Geophys. Res.*, 94, 5585-5602.

Beutler, G. (1993): The 1992 IGS Test Campaign, Epoch '92, and the IGS Pilot Service: an Overview, *Proceedings of the 1993 Bern IGS Workshop*.

Barka, A.A. (1992): The North Anatolian fault zone, *Annales Tectonicae*, Supp. to Vol. VI, 164-195.

Eckert, V., Cocard, M. und A. Geiger (1992): COMEDIE (Collocation of Meteorological Data for Interpretation and Estimation of Tropospheric Pathdelays), *IGP-Berichte* 194 und 195, ETH-Zürich.

Kahle, H.-G., Müller, M.V., Müller, St., Veis, G., Billiris, H., Paradissis, D., Drewes, H., Kaniuth, K., Stuber, K., Tremel, H., Zerbini, S., Corrado, G. and G. Verrone (1993): Monitoring West Hellenic Arc Tectonics and Calabrian Arc Tectonics using GPS. In: Smith and Turcotte (eds.), *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*. American Geophysical Union (AGU), *Geodynamics Series*, Vol. 23: 417-429. Washington D.C.

Kahle, H.-G., Müller, M.V., Mueller, St. and G. Veis (1993): The Kephalaria transform fault and the rotation of the Apulian platform: Evidence from Satellite Geodesy. *Geophysical Res. Letters*, vol 20, no. 8: 651-654.

Massonet, D., Rossi, M., Carmona, F.A., Peltzer, G., Feigl, K. and T. Rabate (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 8.7.93: 138-142.

Mueller, St. and H.-G. Kahle (1993): Crust-mantle evolution, structure and dynamics of the Mediterranean-Alpine region. In: Smith and Turcotte (eds.), *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*. American Geophysical Union (AGU), *Geodynamics Series*, Vol. 23: 249-298. Washington D.C.

Oral, M.B., Reilinger, R.E., Toksöz, M.N., Barka, A.A. and I. Kinik (1993): Preliminary results of 1988 and 1990 GPS measurements in western Turkey and their tectonic implications. In: Smith and Turcotte (eds.), *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*. American Geophysical Union (AGU), *Geodynamics Series*, Vol. 23: 407-416. Washington D.C.

Robbins, J. W., P. J. Dunn, M. H. Torrence and D. E. Smith, «Deformation in the Eastern Mediterranean», in the *Proceedings of the First Turkish Symposium on Deformations*, edited by M. Sahin and P. A. Cross, 1994.

Rothacher, M., Beutler, G., Gurtner, W., Brockmann, E. and L. Mervart (1993): *Bernese GPS Software Version 3.4.*, Print. Off. University of Berne.

Schindler, C. et al. (1993): The MARMARA Poly-project: tectonics and recent crustal movements revealed by space-geodesy and their interaction with the circulation of groundwater, heat flow and seismicity in Northwestern Turkey, *Terra Nova* 5, 164-173.

Smith, D.E., Kolonkiewicz, R., Robbins, J.W., Dunn, P. and M. Torrence (1994): Horizontal crustal motion in the central and eastern Mediterranean inferred from satellite Laser ranging measurements. *Geophys. Res. Letters*, 21, 18: 1979-1982.

Straub, C. und H.-G. Kahle (1994): Global Positioning System (GPS) estimates of crustal deformation in the Marmara Sea region, NW Anatolia, *Earth & Planetary Science Letters* 121, 495-502.

Zebker, H., Rosen, P., Goldstein, R.M., Gabriel, A.K. and C.L. Werner (1994): On the derivation of coseismic displacement using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 99, B10: 19'617-19'634.

### Adresse der Verfasser:

Prof. Dr. H.-G. Kahle  
M. V. Müller  
C. Straub  
Institut für Geodäsie und  
Photogrammetrie  
ETH-Hönggerberg  
CH-8093 Zürich