

Erdbeben an verborgenen Störungen

Bisher galten an der Oberfläche erkennbare Bruchstellen in der Erdkruste als Zentren und Auslöser seismischer Aktivität. Nach neuesten Erkenntnissen können starke Erdbeben jedoch auch an blinden Störungen auftreten, die unter Falten verborgen sind.

Jüngstes Beispiel: das verheerende Beben in Armenien von 1988.

Von Ross S. Stein und Robert S. Yeats

Ein ausbrechender Vulkan zeigt unmißverständlich an, daß sich hier eine Austrittsöffnung für Magma aus dem Erdinneren befindet. Der Zusammenhang zwischen einem Steilhang und der aktiven Störung oder Bruchfläche in der Erdkruste, die ihn schuf, ist schon weniger offensichtlich; daher hat man derartige Stufen auch erst im letzten Jahrhundert mit Erdbeben in Verbindung gebracht. Sanft gewelltes oder gefaltetes Gelände aber weckt ganz und gar keine Assoziationen von Naturgewalten, sondern suggeriert eher Frieden als Gefahr. Wie der englische Dichter und Essayist Matthew Arnold (1822 bis 1888) schreibt:

In ein freundliches, südliches Land ist er geflohn,
Und nun in glücklicherer Luft,
Wandelt er mit dem göttlichen Zug der
Großen Mutter dahin...
In einer Falte des Apennin.

Die Apenninen Norditaliens – einer der vielen Faltengürtel, die den Erdball umspannen – sind jedoch kein harmloses, friedliches Gebirge. Vielmehr wurden sie aufgeworfen von Erdbeben, die sich an tief in der Erde verborgenen Störungen ereigneten. Solche Beben, bei denen die Erdoberfläche nicht aufbricht, haben wir oberflächenfaltende Erdbeben oder kurz Faltenbeben genannt. Erst in jüngster Zeit sind sie Gegenstand wissenschaftlicher Forschung geworden.

Schätzungen der Wahrscheinlichkeit und vermutlichen Stärke von Erdbeben beruhen auf der Annahme, daß solche

Ereignisse an aktiven Störungen stattfinden: Schwächestellen in der Erdkruste, die immer wieder plötzlich nachgeben, so daß die benachbarten Gesteinsblöcke sich gegeneinander verschieben (an diesen Stellen ist daher die Schichtfolge gestört, was der Bruchfläche ihren Namen gegeben hat). Starke Erdbeben treten demnach nur an ausgedehnten Störungen auf, und von diesen nimmt man an, daß sie stets bis zur Erdoberfläche hinaufreichen. Geologen betrachten Bruchflächen, an denen auch junge Oberflächenablagerungen versetzt worden sind, als noch aktiv und rechnen damit, daß sie demnächst wieder aufbreißen.

Diese Überlegungen haben tiefe Einsichten in das Verhalten von Erdbeben vermittelt. Infolgedessen kann man heute seismisch gefährdete Orte identifizieren und Wahrscheinlichkeitsaussagen über Stärke und Häufigkeit zu erwartender Erdbeben machen (siehe „Wann kommt das nächste große Erdbeben in Kalifornien?“ von Robert L. Wesson und Robert E. Wallace in Spektrum der Wissenschaft, April 1985). Zugleich ist man dazu übergegangen, kritische Anlagen wie Kraftwerke und Dämme nur noch fern von aktiven Störungen zu errichten.

Falten als Bebenorte

Gleichwohl ereignen sich zum Beispiel in Kalifornien die meisten schwächeren Erdbeben nicht an Störungen, die an der Erdoberfläche erkennbar sind. Noch vor 50 Jahren dachte man,

diese Beben seien wegen der ungenügenden Zahl von Seismometern nur falsch lokalisiert worden; inzwischen aber sind 700 Bebenmesser über Kalifornien verteilt und bilden das weltweit dichteste seismische Meßnetz, Japan vielleicht ausgenommen. Zweifellos ereignen sich viele Mikrobeben an aktiven Störungen – etwa Abschnitten der San-Andreas-Störung. Noch mehr jedoch lassen sich keiner bekannten, oberflächlich erkennbaren Verwerfung zuordnen (Bild 1).

Bei vielen dieser Beben abseits von oberflächlich erkennbaren Störungen liegen die Herde unter Falten: geologischen Strukturen, die entstehen, wenn geschichtete Sedimente zu einem breiten Buckel aufgewölbt werden (Bild 2). Solche sogenannten Antikinalen zeugen davon, daß die Erdkruste infolge der Kollision zweier driftender tektonischer Platten gestaucht wird und sich deshalb wellt – ähnlich wie ein Teppich Falten wirft, wenn man ihn zusammenschiebt.

Daß so viele schwache Erdbeben an Störungen auftreten, die unter Falten verborgen liegen, ist ein unerwartetes Faktum, das für das theoretische Verständnis von Erdbeben große Bedeutung hat. Für die Praxis der Erdbebenvorhersage aber noch wichtiger dürfte die Frage sein, ob unter aktiven Falten ausgedehnte Störungen verborgen sind, von denen auch plötzliche starke Erschütterungen ausgehen können.

Im nachhinein scheint es, daß sich während des letzten halben Jahrhunderts in Japan, Argentinien, Neuseeland, Persien und Pakistan in der Tat

starke Faltenbeben ereignet haben. Doch sind diese Ereignisse nur schlecht dokumentiert und die wenigen Fakten mehrdeutig. Vier größere Beben seit 1980 haben die Realität von Faltenbeben jedoch zweifelsfrei belegt; ein fünftes, dessen Analyse noch nicht abgeschlossen ist, wird die Liste wahrscheinlich demnächst vervollständigen.

Der erste dieser Erdstöße ereignete sich 1980 bei El Asnam in Algerien. Er maß 7,3 auf der Magnitudenskala (einer Fortentwicklung der bekannten Richter-Skala), forderte 3500 Todesopfer in drei nordafrikanischen Städten und staute einen größeren Fluß.

Das zweite und dritte Beben, das in Coalinga (Magnitude M = 6,5) im Jah-

re 1983 und im benachbarten Kettleman Hills (M = 6,1) im Jahre 1985, erschütterten Teile Kaliforniens. Da die betroffenen Gebiete ziemlich abgelegen sind, entstand allerdings nur mäßiger Sachschaden, und es kam lediglich ein Mensch ums Leben. Gleichwohl bestand größere Gefahr; denn im Erdbebengebiet lagen mehrere Giftmülldepo-

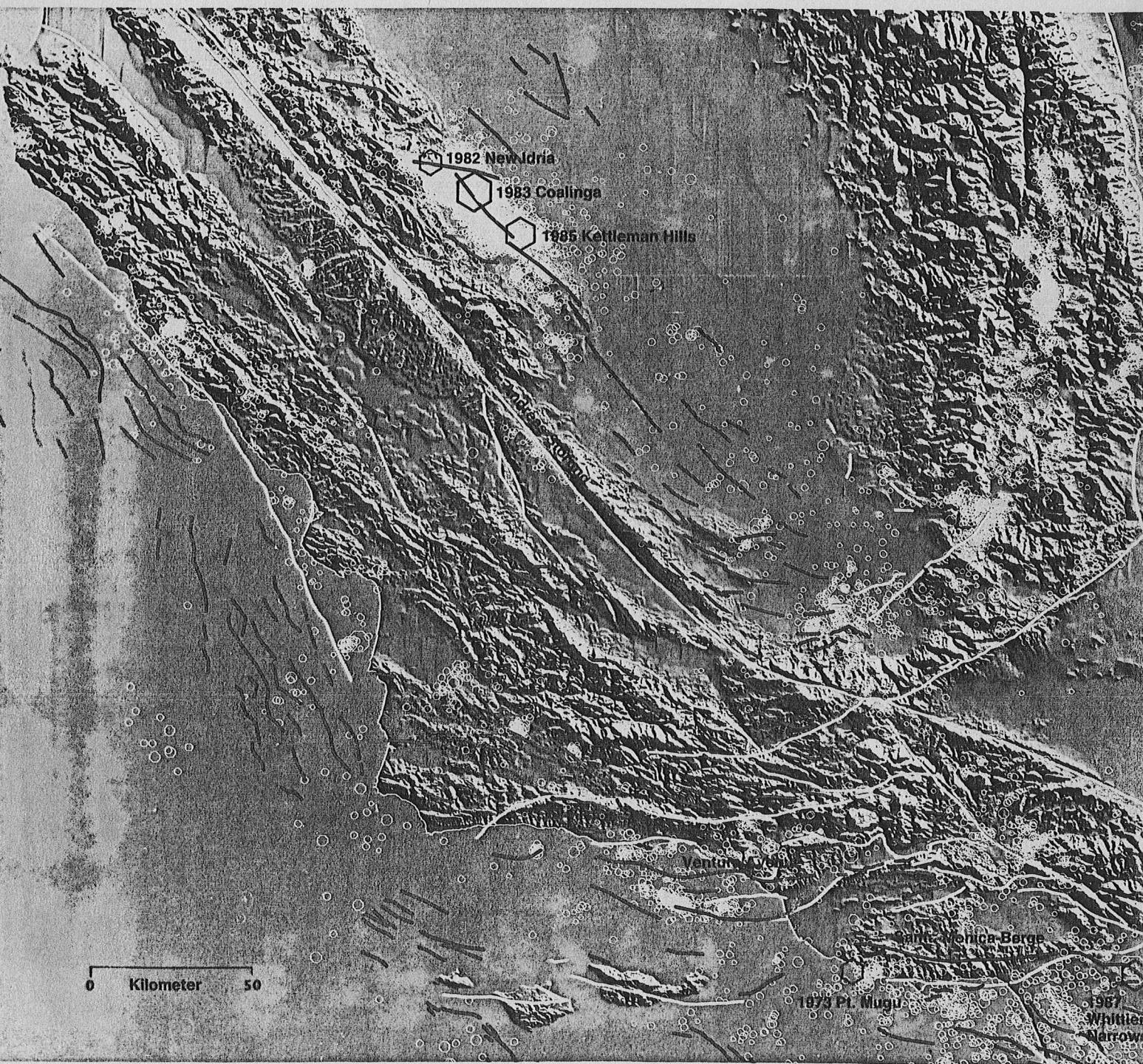


Bild 1: Die in Südkalifornien in der letzten Zeit aufgetretenen Erdbeben mit Magnituden zwischen 1,5 und 6,5 sind auf dieser topographischen Karte dargestellt. Gelbe Achtecke kennzeichnen dabei die 23000 zwischen 1980 und 1986 registrierten Mikrobeben. Viele davon ereigneten sich an oberflächlich erkennbaren Störungen (blaue Linien) – insbesondere der San-Andreas-Verwerfung. Andere scheinen sich dagegen um

Falten (rote Linien) herum zu konzentrieren. Dieser Zusammenhang wird erklärlich, wenn Falten die Lage aktiver blinder Störungen markieren – also solcher Verwerfungen, die nicht bis zur Oberfläche hin-aufreichen. Jüngste stärkere Beben (schwarze Sechsecke), bei denen Falten angehoben wurden, stützen diese Vermutung. Bisher wurde kein vollständiges Verzeichnis aktiver Falten in den Vereinigten Staaten erstellt.

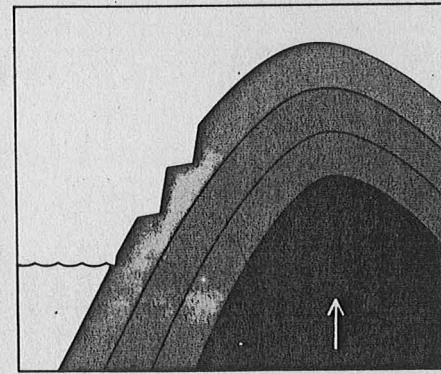
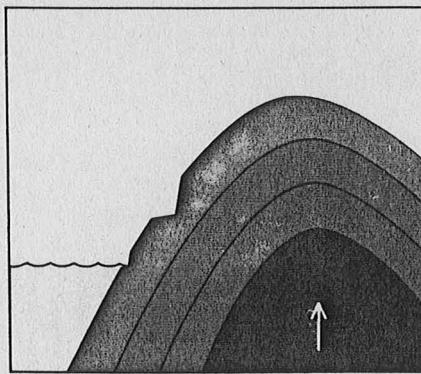
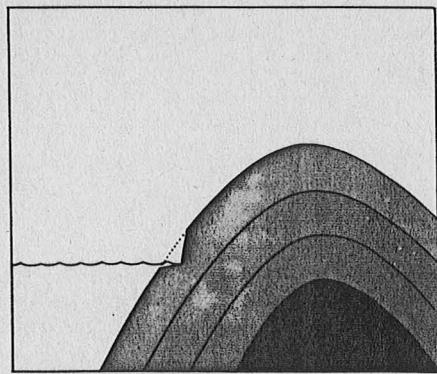
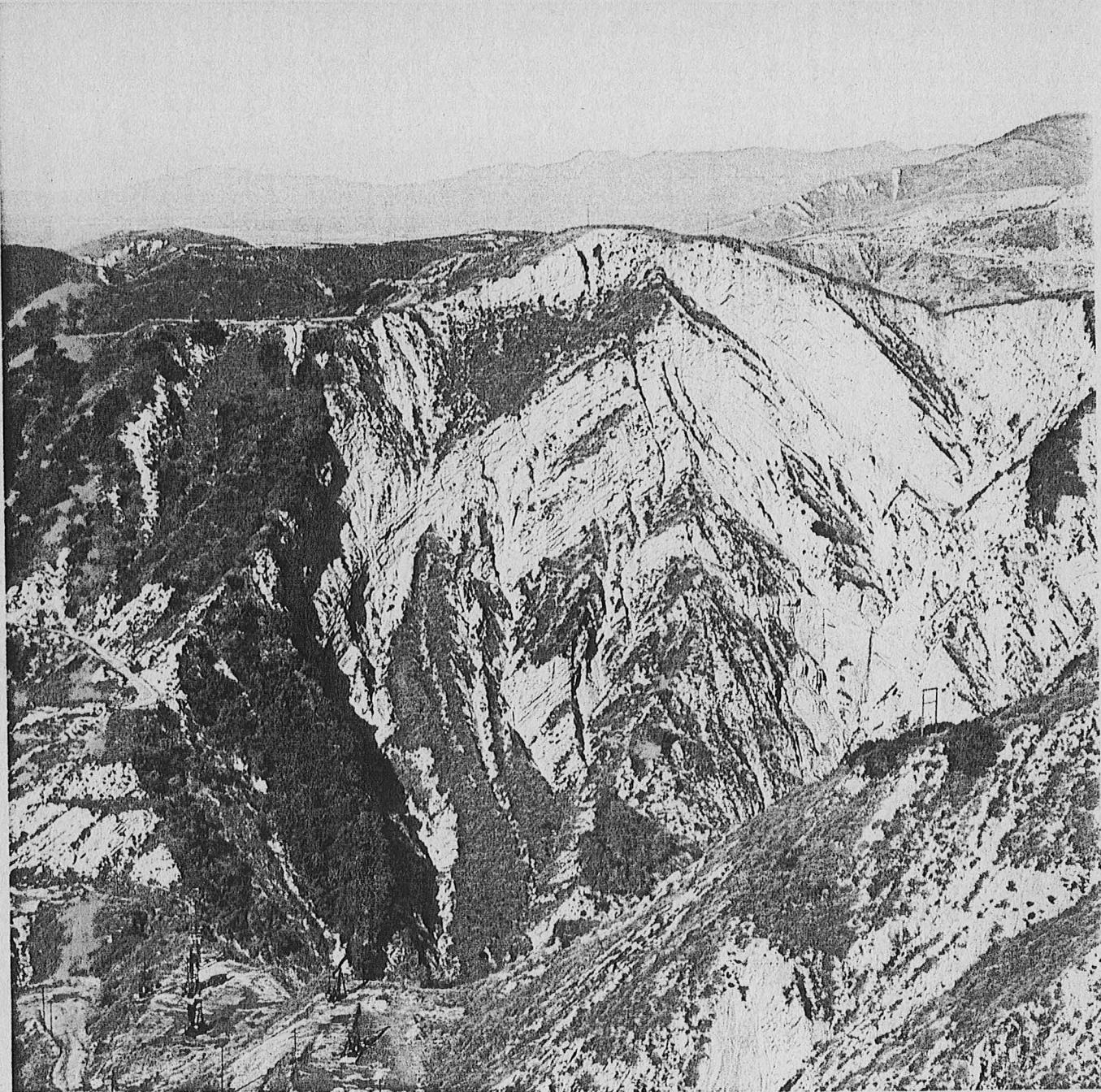


Bild 2: Die Ventura-Avenue-Antiklinale bei der Ortschaft Ventura in Kalifornien ist eine der am schnellsten wachsenden tektonischen Falten auf der Erde. Solche geologischen Strukturen entstehen durch Aufwölbung geschichteter Sedimente, die von den Seiten her zusammengedrückt werden. Auf der Photographie (oben) sind die gebogenen Schichten deutlich erkennbar. Sturmwellen haben insgesamt neun Terrassen in

die Flanke der Antiklinale eingeschnitten. Nach Radiokohlenstoff-Datierungen von darauf abgelagerten Muscheln beträgt das Alter der Terrassen 1800 bis 5600 Jahre. Da der Meeresspiegel während dieser Zeit nicht nennenswert geschwankt hat, ist die einfachste Erklärung für das beobachtete Treppenmuster, daß Erdbeben in Abständen von rund 600 Jahren die Falte und damit auch die Terrassen angehoben haben (unten).

nien, und in der kleinen Stadt Coalinga wurden 75 Prozent der nicht bebengesicherten Gebäude beschädigt.

Der nächste Erdstoß am 1. Oktober 1987 traf Kaliforniens dichtbesiedeltes Los-Angeles-Becken. Obwohl dieses Whittier-Narrows-Beben mit einer Magnitude von 6,0 nur ein Zehntel der Stärke des Coalinga-Bebens hatte, richtete es zehnmal soviel Schaden an – in Höhe von etwa 350 Millionen Dollar – und forderte acht Menschenleben..

Das fünfte Ereignis, das wahrscheinlich auch in diese Liste gehört, ist das katastrophale Erdbeben in Armenien letztes Jahr. Ihm fielen mindestens 25000 Menschen zum Opfer.

Augenfälligste Gemeinsamkeit der drei kalifornischen Beben war, daß keine der beteiligten Störungen bis zur Erdoberfläche reichte. Bei dem Erdstoß in Armenien schnitt die Störung zwar die Oberfläche, doch die Versetzung in Bodenhöhe war wesentlich geringer als am Bebenherd in zehn Kilometern Tiefe. Diese Beobachtungen lassen vermuten, daß bei Faltenbeben der Betrag der Versetzung vom Herd- zum Oberflächenniveau abnimmt, so daß die Oberfläche nur wenig oder gar nicht aufgebrochen wird.

Ein zweites Merkmal aller vier Beben war, daß sie sich unter jungen Antikinalen ereigneten, die nur wenige Millionen Jahre alt sind. Hinzu kam als dritte und aufschlußreichste Beobachtung, daß sich in jedem dieser Gebiete die Falte merklich hob. Zusammen läßt das darauf schließen, daß nicht nur junge Antikinalen potentielle Erdbebenzonen, sondern die Falten selbst das geologische Ergebnis einer Folge von Erdstößen sind. Erweist sich die Beobachtung, daß der Versetzungsbetrag vom Herd zur Oberfläche abnimmt, als allgemeingültiges Merkmal, dann könnten Falten dazu dienen, die Geschichte der verborgenen – wir sagen: blinden – Störungen zu rekonstruieren.

Paradebeispiel Coalinga

Ein besonders günstiger Fall in dieser Hinsicht ist das Coalinga-Beben, da eine einzigartige Fülle seismologischer, geologischer und geodätischer (Landvermessungs-)Daten darüber vorliegt. Damit ist es das bestdokumentierte Faltenbeben überhaupt.

Eine 750 Meter hohe Falte – von Erdölgeologen, die dort 1898 Öl entdeckten, passenderweise Anticline Ridge (Antikinalenrücken) genannt – hat sich während des Bebens um 75 Zentimeter gehoben (Bild 6). Die jüngsten gefalteten Sedimente des Rückens sind weniger als zwei Millionen Jahre

alt, was zeigt, daß der Auffaltungsvorgang erst später eingesetzt hat. Wenn eine Anhebung um 75 Zentimeter typisch für Beben bei Coalinga ist, dann müßte der Anticline Ridge durch rund tausend Erdbeben mit Magnituden zwischen 6 und 7 aufgewölbt worden sein, die alle 1000 bis 2000 Jahre auftraten.

Das Coalinga-Beben unterschied sich von Erdstößen an bis zur Oberfläche reichenden Störungen auch im Muster der Nachbeben. Diese ereignen sich normalerweise entlang der Verwerfungsfläche. Beim Coalinga-Beben waren sie dagegen – wie auch bei anderen Faltenbeben – viel diffuser verteilt: Ihre Herde lagen teils über und teils unter der Bruchfläche. Was läßt sich daraus schließen?

Carl M. Wentworth jr. vom Geologischen Dienst der USA und Mark D. Zoback von der Stanford-Universität in Kalifornien haben die geologische Tiefenstruktur bei Coalinga untersucht. Sie benutzten dazu Daten von Erdbohrlochern sowie aus seismischen Refraktionsprofilen (erschlossen aus der Laufzeit von Schallwellen einer kontrollierten Explosion, welche die oberen Krustenschichten durchqueren und dabei an den Schichtgrenzen gebrochen werden) und aus seismischen Reflexionsprofilen (errechnet aus dem Laufzeitmuster von Schallwellen, die mit koordinierten Stößen auf den Boden erzeugt und an den Schichtgrenzen reflektiert werden). Die Untersuchungen deuten darauf hin, daß der Kern der Coalinga-Antikinalen von Störungen durchzogen ist – viele davon mit geringfügigen Versetzungen der Gesteinsschichten gegeneinander, die einen Bruchteil der Gesamtversetzung entlang der tieferliegenden großen Störung ausmachen.

Die meisten der sichtbar gemachten Strukturen sind Aufschiebungen: steile Verwerfungen, an denen eine Gesteinscholle an der anderen emporgedrückt wird. Wenn Aufschiebungen flacher einfallen, heißen sie Überschiebungen, da nun ältere über jüngere Schichten geschoben werden, was die normale Schichtung auf den Kopf stellt.

Der Hauptstoß des Coalinga-Bebens scheint von einer der größeren blinden Überschiebungen ausgegangen zu sein. Dagegen rührten viele der Nachbeben offenbar von Versetzungen an den kleineren Aufschiebungen her. Dies steht in krassem Gegensatz zur Situation bei Verwerfungserdbeben an einer bis zur Oberfläche reichenden Störung. In diesen Fällen liegen die Herde auf einer einzigen Bruchfläche (wie man an der San-Andreas-Störung in Bild 1 sehen kann).

Wie mißt man den Versetzungsbetrag an verborgenen Störungen? Tatsächlich

lassen sich Ort und Ausmaß der Rutschung nicht direkt beobachten, aber sie können aus Messungen am Erdboden mit Hilfe eines einfachen elastischen Modells der Erdkruste abgeleitet werden. Dabei behandelt man die Kruste als eine Art Hartgummiblock mit Einschnitt (Bild 4). Wenn die beiden Schnittflächen gegeneinander verschoben werden, entstehen Spannungen im Gummi, und seine Oberfläche verformt sich. Ursprünglich entwickelt, um das Verhalten von weniger als ein millionstel Millimeter großen Gitterfehlern in Kristallen zu beschreiben, ist diese Elastizitätsanalyse inzwischen auf 1000 Kilometer lange Störungen ausgedehnt worden.

Vordringende Störungen

Mit dieser Methode haben wir herausgefunden, daß die Versetzung bei Coalinga, die am Bebenherd in neun Kilometern Tiefe 3,5 Meter betrug, nach oben hin geringer wurde – wodurch es in den höheren Krustenschichten zu Faltungen kam – und in einer Tiefe von sechs Kilometern ganz verschwand. Auch nach dem Beben verschoben sich die Gesteinskörper an der Störungslinie noch gegeneinander: In den nächsten vier Jahren verformte sich die Falte an der Oberfläche um weitere 10 Prozent, und die Aufwölbungsachse verschob sich um mehrere Kilometer nach Osten (Bild 6).

Die einfachste Erklärung dafür ist, daß sich die Spitze der Störung schräg nach oben in östlicher Richtung in den Kern der Falte hineinschiebt. Dieses Vordringen der Verwerfung röhrt daher, daß die vom Erdbeben erzeugte Spannung dicht hinter dem Ende der Störung am größten ist.

Jeder Besucher der Independence Hall in Philadelphia (Pennsylvania) kennt dieses Phänomen: Die Konservatoren der amerikanischen Freiheitsglocke waren gezwungen, am Ende des berühmten Risses ein zylindrisches Loch zu bohren, um die Spannung gleichmäßig zu verteilen und so diesen nationalen Schatz der Vereinigten Staaten vor dem Zerspringen zu bewahren.

Angesichts der Ausweitungstendenz von Störungen mag man sich fragen, warum die große Mehrzahl der Überschiebungen – wie die unter dem Anticline Ridge bei Coalinga – nicht längst bis zur Oberfläche vorgedrungen ist. Durch Analyse der Protokolle von Ölbohrungen in Taiwan hat John Suppe von der Princeton-Universität in New Jersey aktive Falten ausgemacht, die durch Versetzungen an blinden Störungen entstanden sind. Des weiteren hat

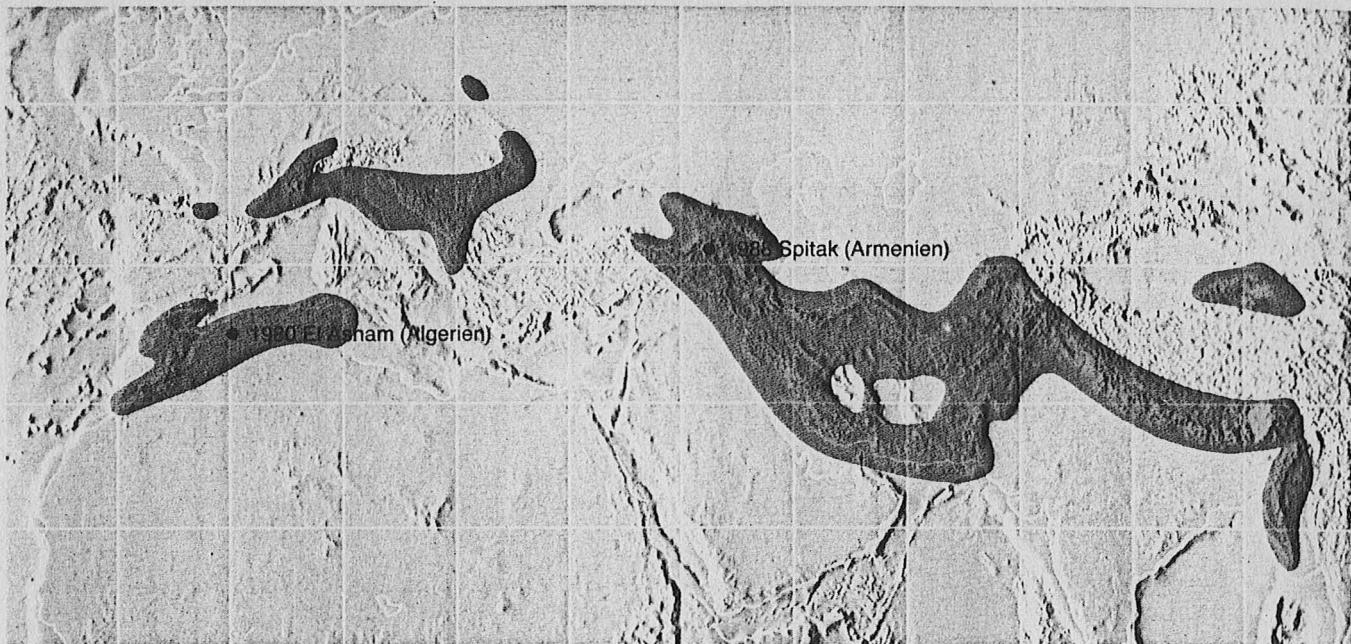


Bild 3: Aktive Faltengürtel überspannen den Erdball. Meist handelt es sich um Gebirgsregionen an Stellen, wo die Kruste komprimiert wird, weil kontinentale tektonische Platten kollidieren. Ein großer Prozentsatz der Weltbevölkerung lebt in diesen Gebieten, zu denen Teile Italiens,

Jugoslawiens, Persiens, Afghanistans, Pakistans, Indiens, Nepals, Burmas, Japans, der USA, Perus und Chiles gehören. Diese Karte beruht auf Untersuchungen von Albert W. Bally von der Rice-Universität in Houston (Texas) und Hervé Philip von der Universität Montpellier.

er alte Falten untersucht, bei denen durch natürliche Abtragung die darunter verborgene Störung freigelegt worden ist.

Suppes Untersuchungen ergaben, daß sich diese Störungen in zehn bis zwanzig Kilometern Tiefe bilden und sich nur äußerst langsam – im Verlauf von Jahrtausenden – zur Oberfläche durchfressen. Folglich existieren zweifellos viele Verwerfungen, die noch nicht weit genug nach oben vorgedrungen sind, um sich bemerkbar zu machen.

Andere, inaktiv gewordene Störungen bleiben dagegen für immer unsichtbar, sofern sie nicht irgendwann durch Erosion der darüberliegenden Gesteinsschichten zum Vorschein kommen.

Diese Situation ist ganz anders als bei den bekannteren Verwerfungen, wo man die Bruchstelle unmittelbar sieht. Solche Störungen sind schnell zur Oberfläche vorgedrungen und vertiefen sich jetzt allenfalls noch.

Mit einem mathematischen Modell für das Vordringen einer Störung fand

Suppe außerdem heraus, daß mit der Störung zugleich auch die Falte wandert und sich dabei weiter aufwölbt und ihre Form ändert (Bild 5). Die in Bild 6 gezeigte Verformung des Anticline Ridge im Gefolge des Coalinga-Bebens bietet eine bemerkenswerte Momentaufnahme dieses aus dem Modell abgeleiteten Vorgangs: Mit der Spitze der Störung bewegte sich auch die Falte nach Osten.

Ein einzelnes Beben an einer Falte begründet natürlich noch keine neue

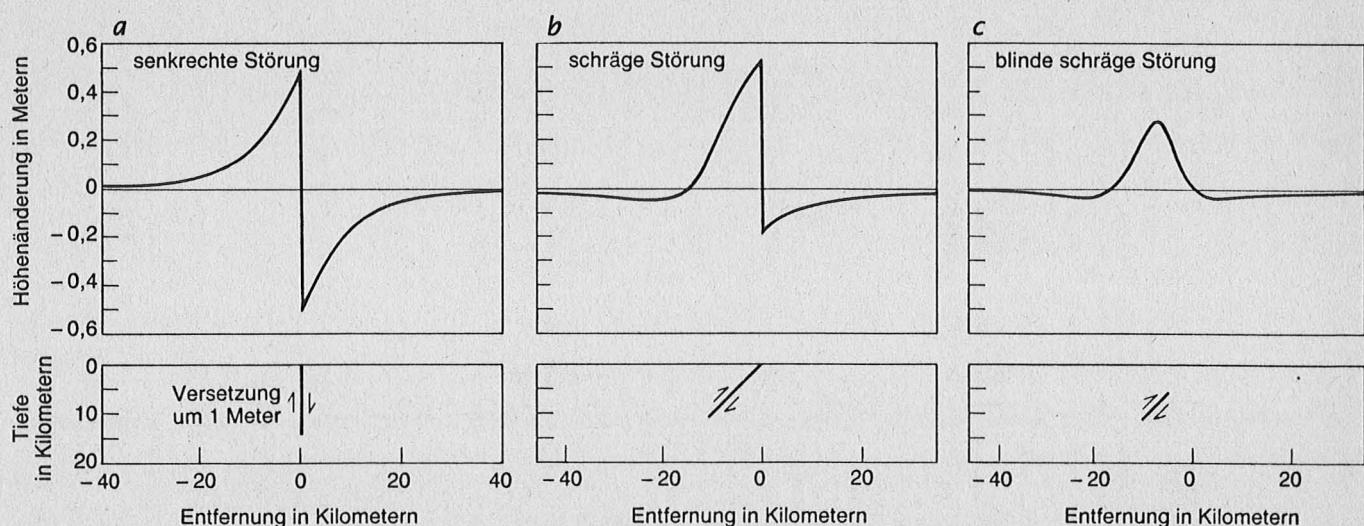


Bild 4: Anhand eines elastischen Modells der Erdkruste läßt sich zeigen, wie Störungen im Untergrund (untere Diagramme) die Erdoberfläche verformen können (obere Diagramme). Die Störungen enden in 15 Kilometern Tiefe und ähneln Einschnitten in einem Gummiblock. In diesem Beispiel soll sich die linke Hälfte des Blocks relativ zur rechten um einen Meter verschieben. Wenn die Störung senkrecht verläuft und bis zur

Oberfläche reicht, wird das Gelände so verformt, daß am Ort der Störung eine genau einen Meter hohe Stufe entsteht, an deren Seiten sich der Boden asymptotisch dem Umgebungsniveau anpaßt (a). Bei um 45 Grad geneigter Störung ist die gebildete Stufe nur 70 Zentimeter (1 Meter mal dem Cosinus von 45 Grad) hoch (b). Bei einer Störung, die nicht bis zur Oberfläche reicht, entsteht eine Falte an der Oberfläche (c).

Erdbebenklasse. Wie gesagt, ist das Coalinga-Beben jedoch kein Einzelfall, sondern das zweite in einem Trio verwandter Ereignisse, die entlang derselben blinden Überschiebung auftraten. Das erste fand am 25. Oktober 1982 weiter nördlich in New Idria statt, und bei dem dritten handelt es sich um das schon erwähnte Beben im weiter südlich gelegenen Kettleman Hills vom 4. August 1985. Die drei Beben waren sämtlich abrupte Reaktionen auf einen kontinuierlichen Vorgang: eine Stauung in nordöstlich-südwestlicher Richtung an einer rund 100 Kilometer langen regionalen Störung.

Das Fortschreiten der Beben von Norden nach Süden läßt vermuten, daß eine Versetzung an einem Abschnitt die Spannung im jeweils südlich benachbarten Abschnitt erhöhte, so daß dieser als nächstes brach. Obwohl in der Südhälfte dieser Kette von Antiklinalen in historischer Zeit kein größeres Beben stattfand, ist für die Zukunft durchaus mit einem Erdstoß dort zu rechnen. Schließlich müssen wiederholte Beben längs der Gesamtlänge der blinden Störung diese lange Faltenkette aufgeworfen haben.

Der schrittweise Aufbau einer Falte

Noch stärker untermauert wird diese Einschätzung durch das Beben mit der Magnitude 7,3 bei El Asnam in Algerien im Jahre 1980. Dessen Ursache war eine Versetzung um drei bis sechs Meter längs einer Aufschiebung in einer Tiefe von mehreren Kilometern. Nur im zentralen Abschnitt der Störung erreichte ein nennenswerter Teil dieser Versetzung (zwei Meter) die Oberfläche.

Geoffrey C.P. King, der inzwischen beim Geologischen Dienst der USA arbeitet, Claudio Vita-Finzi vom University College in London sowie J.C. Ruegg und seine Mitarbeiter am Institut für Geophysik der Universität Paris haben festgestellt, daß sich während des Bebens eine Antiklinale im Bereich der Störung um fünf Meter hob und das benachbarte Tal um einen Meter absackte (Bild 7). Dadurch wurde der Fluß Chéliblockt, der sich tief in die wachsende Antiklinale eingeschnitten hatte. Innerhalb weniger Tage nach dem Erdbeben bildete sich daher vor der Schlucht ein See.

Bevor sich der Chéliblockt wieder durch die Falte hindurchgefressen hatte und der See abgeflossen war, hatten sich darin 40 Zentimeter Schlacke abgesetzt und ein bleibendes geologisches Zeugnis der Stauung hinterlassen. Mustapha Meghraoui von der Universität Paris

und seine Mitarbeiter haben die tieferen Sedimentschichten ergraben und herausgefunden, daß während der letzten 6000 Jahre insgesamt sechs solche Seen für kurze Zeit bestanden haben, deren jeder den Beginn einer plötzlichen Überflutung markiert.

Am besten läßt sich dies damit erklären, daß Faltenbeben jeweils den Chéliblockt stauten. Im Gebiet von El Asnam findet sich also nicht nur der Beweis für ein einzelnes Faltenbeben — das von 1980 —, sondern gleich ein ganzes Archiv solcher Ereignisse. Dies dokumentiert einmal mehr, daß Antiklinale in einzelnen Schüben schrittweise aufgebaut werden.

Es gibt weitere Belege dafür, daß El Asnam wiederholt Schauplatz von Erdbeben war. Auch an kleinen sekundären Störungen am Kamm von Falten können während eines Bebens, bei dem die Falte weiter aufgewölbt und damit stärker gebogen wird, Gesteinsblöcke sich

gegeneinander verschieben. Solche Versetzungen sind gleichfalls auswertbare Zeugnisse früherer Beben; der Zeitpunkt der Versetzung läßt sich durch Radiokohlenstoff-Datierung der benachbarten Sedimente bestimmen. Meghraoui und seine Mitarbeiter haben solche Datierungen an sekundären Störungen in der Region von El Asnam vorgenommen, und die Ergebnisse stehen in Einklang mit dem, was die Seesedimente über die Geschichte der Falte aussagen.

Ein weiterer Mosaikstein: Whittier Narrows

Das schwache, aber folgenschwere Whittier-Narrows-Beben von 1987 im Großraum von Los Angeles rundet das Bild der jüngsten Faltenbeben ab. Wie seine stärkeren Vorgänger scheint es auf das Zerreißen eines Sedimentstapels

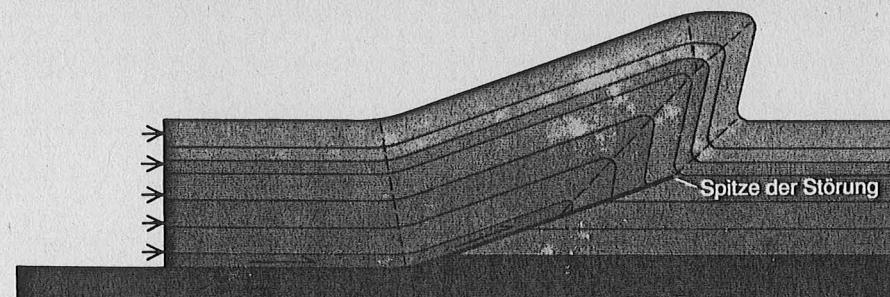
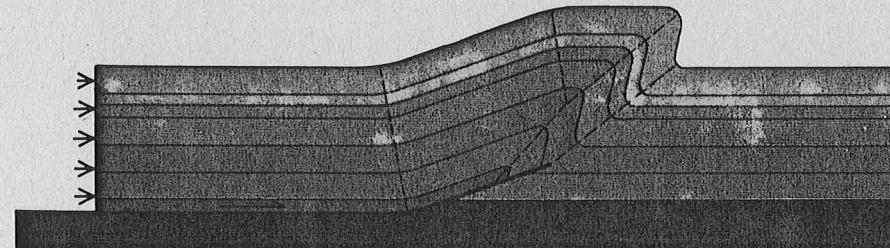
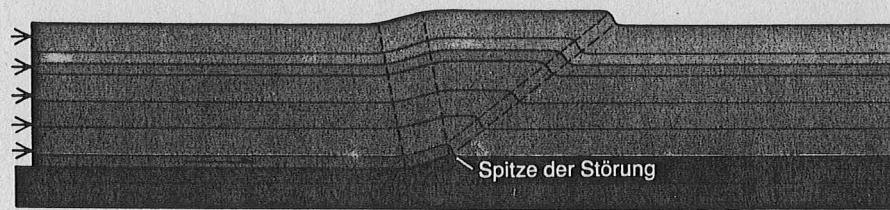


Bild 5: Wie sich eine Falte entwickelt, wenn die Spitze der blinden Störung darunter weiter schräg nach oben vordringt, hat John Suppe von der Princeton-Universität in New Jersey mit einem Computermodell analysiert. Das Gestein gleitet zunächst an einer horizontalen Störung — Überschiebung genannt — in einer weichen Schicht entlang und verformt sich (oben). Die entstehenden Spannungen bewirken, daß sich die Spitze der Störung nach oben umbiegt und in die darüberliegenden Schichten hineinbohrt (Mitte). Während bei fortlaufender Versetzung entlang der Störung diese weiter vordringt, wird die Falte immer höher aufgewölbt; zugleich verbreitert sie sich und ändert ihre Gestalt. Ein derartiger Vorgang könnte bei der Coalinga-Falte stattfinden (siehe Bild 6). Diverse andere Effekte, welche die Geometrie der Falte gleichfalls beeinflussen und zu denen der Auftrieb und die Elastizität der Kruste sowie Sedimentations- und Erosionsprozesse gehören, sind hier vernachlässigt.

zurückzugehen, der in einer Art geologischem Schraubstock zwischen zwei gegeneinander vorrückenden Krustenplatten zusammengepreßt wird.

In einer graphischen Simulation haben Thomas L. Davis und Jay Namson, Inhaber eines geologischen Beratungsunternehmens in Los Angeles, die Verformung dieser Schichten rückgängig gemacht; sie meinen damit nachweisen zu können, daß sich das Becken während der letzten 2,2 Millionen Jahre um etwa einen Zentimeter pro Jahr verengt hat. Damit würden sich 20 Prozent der gesamten Plattenbewegung auf einen nur 50 Kilometer breiten Streifen konzentrieren. Los Angeles verliert also möglicherweise durch geologische Faltenprozesse jährlich ein zehntel Hektar Land – was das Rätsel lösen würde, warum dieser Raum ein Brennpunkt seismischer Aktivität ist.

Auch beim Whittier-Narrows-Beben hob sich die zugehörige Antiklinale: die Santa-Monica-Falte. Und wie die Erdstöße von New Idria, Coalinga und Kettleman Hills scheint dieses Beben gleichfalls von einer ausgedehnten blinden Störung verursacht zu sein.

Egill Hauksson von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles und Lucile M. Jones vom Geologischen Dienst der USA haben die Verteilung leichter bis mittlerer Erdstöße in der Region ermittelt. Danach ist das Whittier-Narrows-Beben nur eine von mehreren Erschütterungen, die sich längs einer 150 Kilometer langen blinden Störung unter der Küste Kaliforniens ereignet haben.

So fand am 21. Februar 1973 bei Point Mugu – am westlichen Ende der mutmaßlichen Störung – ein Beben der Magnitude 5,6 statt, das viele Merkmale mit den größeren Faltenbeben gemeinsam hatte: Es war die Folge von Kompressionsvorgängen, hob das Santa-Monica-Gebirge um 35 Millimeter, wies diffus verteilte Nachbeben auf und erzeugte keine Versetzung an der Erdoberfläche.

Aufschlüsse aus Bohrlöchern

Die bisher diskutierten Hinweise auf Faltenbeben waren weitgehend indirekter Natur. Um direktere Belege beizusammensetzen, muß man Zugang zum Inneren der Antiklinale haben. Das aber ist nur dort möglich, wo eine Falte auf der Suche nach Erdöl an vielen Stellen anbohrt worden ist.

Die Ventura-Avenue-Antiklinale, die von mehr als 1400 bis zu 6600 Meter tiefen Bohrungen geradezu durchlöchert ist, zählt zu den am besten untersuchten und sich am schnellsten hebenden Falten der Welt. Sie eignet sich daher ideal für genauere Untersuchungen.

An der Südküste Kaliforniens beim Ort Ventura gelegen, hat diese Antiklinale ehemalige Tiefseesedimente angehoben und die gefalteten Schichten in Klippen auf dem Küstenstreifen freigelegt (Bild 2). Obwohl an ihr keine stärkeren Erdstöße registriert worden sind, verraten uns ihre Struktur und ihre vorgeschichtlichen Zeitmarken vieles, das auf die anderen besprochenen Erdbebengebiete übertragbar ist.

Wie zahlreiche Antiklinale speichert die Ventura-Avenue-Falte Öl und Gas, die sich unter ihr angesammelt haben. Anhand der Protokolle der Erdbohrungen, die in sie niedergebracht wurden, läßt sich ein Profil von ihr zeichnen (Bild 8). Danach schwingt die Falte an der Oberfläche weit aus, verengt sich aber nach unten hin, während die Krümmung der Schichten zunimmt. In etwa vier Kilometern Tiefe ist sie schließlich zu einem scharfen Knick geworden, unter dem sich relativ lockeres

Gestein befindet. Eine 6,6 Kilometer tiefe Suchbohrung ist weit genug in dieses Gestein vorgedrungen, um zu belegen, daß die Schichten unter dem Knick überhaupt nicht mehr gefaltet sind. Das deutet darauf hin, daß sich unter der Falte eine nahezu horizontale Überschiebung befindet. Zwischen dem Grund der Antiklinale und der Oberfläche liegen zahlreiche kleinere steile Aufschreibungen.

Die Ventura-Avenue-Falte scheint durch Rutschungen längs der Barnard-Überschiebung, die von der Sisar-Störung am Grund der Antiklinale abzweigt, aufgewölbt worden zu sein. Als Nebeneffekt kam es dabei wohl zu den Versetzungen an den internen Aufschreibungen. Weiter im Norden übersteigt die Rutschungsrate längs der Barnard-Störung diejenige entlang der Sisar-Störung, so daß die Gesteinsschichten zusammengequetscht und aufwärtsgegeben werden.

Mit ihrer Überschiebung an der Basis, wo die Rutschungsrate am größten

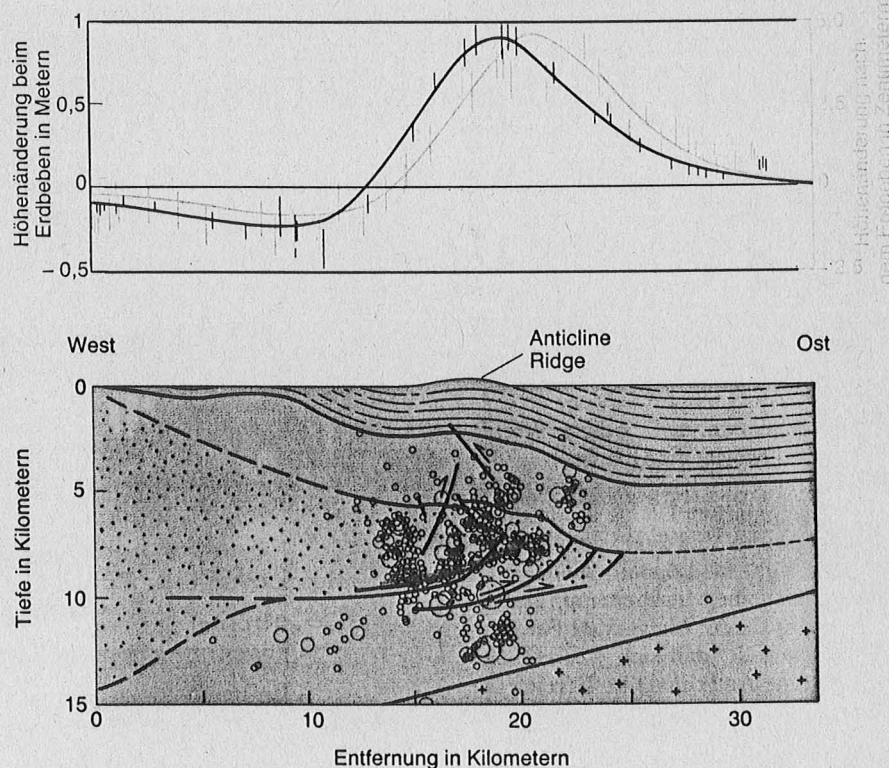


Bild 6: Das Coalinga-Erdbeben mit einer Magnitude von 6,5 traf Kalifornien 1983 überraschend, weil es fern einer oberflächlich erkennbaren Störung auftrat. Die roten senkrechten Striche im oberen Diagramm zeigen die Verformung der zugehörigen Falte (aufgetragen gegen die Entfernung von einem willkürlich gewählten Nullpunkt). Die rote Kurve gibt die Deformation wieder, die nach Modellrechnungen eine im Profilbild darunter rot eingezeichnete blinde Störung hervorrufen würde. Die Deformation in den vier Jahren seit dem Beben ist im oberen Diagramm blau dargestellt. Die fortwährende Verformung deutet

darauf hin, daß die Störung sich – wie durch die blaue Linie im Profilbild angedeutet – weiter ins Innere der Falte hineinschiebt. Seismische Profile lassen zahlreiche Störungen unter der Antiklinale erkennen (kurze schwarze Linien). Kleine Versetzungen an ihnen während des Bebens von 1983 könnten die diffuse Verteilung der Nachbebenherde (kleine rote Kreise) erklären, die auf den Hauptstoß (Herd im größten Kreis) folgten. Dieses Verteilungsmuster unterscheidet sich deutlich von dem eines Bebens an einer oberflächlich erkennbaren Störung, bei dem die Herde der Nachbeben längs der Störungsschicht angeordnet sind.

ist, und den Myriaden kleiner Aufschiebungen in ihrem Inneren hat die Antiklinale bei Ventura eine bemerkenswerte Ähnlichkeit mit dem Bild, das aus seismischen Profilen und geodätischen Vermessungen der Coalinga- und Kettleman-Hills-Falten abgeleitet wurde. Ihre direkt erkundete Struktur kann somit helfen, einige charakteristische Gemeinsamkeiten der Beben bei Coalinga, Kettleman Hills, Whittier Narrows und El Asnam zu erklären.

Das gilt etwa für die diffuse Verteilung der Nachbeben. Für sie könnten Versetzungen an den zahllosen kleinen Aufschiebungen im Innern der Falte verantwortlich sein, die als Folge der primären und wesentlich stärkeren Rutschung längs der Hauptstörung am Grunde der Falte auftreten.

Verzögertes Brechen

Eine weitere Beobachtung an der Ventura-Avenue-Antiklinale bietet zugleich eine mögliche Erklärung für eine Besonderheit der meisten Faltenbeben, die wir noch nicht erwähnt haben: Beim Nachgeben der Störung verschiebt sich das Gestein nicht schlagartig, sondern vergleichsweise langsam. Allgemein gilt, daß zwar nicht alle Faltenbeben zum langsamen Typus gehören; aber fast alle langsamen Erdbeben sind Faltenbeben.

Göran Ekström von der Columbia-Universität in New York hat gezeigt, daß die Rutschung bei Kettleman Hills mit 16 Sekunden etwa viermal so lange dauerte wie bei einem typischen Verwerfungserdbeben derselben Stärke an einer oberflächlich erkennbaren Störung. Außerdem fand John L. Nábelék von der Oregon State University in Corvallis heraus, daß der seismische Bruch im Nordabschnitt des Bebengebiets von El Asnam, wo die Nachbeben am stärksten streuten und nur ein vernachlässigbarer Teil der Aufschiebungen bis zur Oberfläche reichte, doppelt soviel Zeit brauchte wie erwartet.

Beim Coalinga-Beben war die Bruchzeit zwar normal kurz; aber hier hob sich die Falte, bedingt durch eine weiter anhaltende langsame Rutschung und das Vordringen der blinden Überschiebung, auch nach dem Beben noch mit exponentiell abnehmender Geschwindigkeit.

Das verzögerte Brechen könnte von hohen Flüssigkeitsdrücken herrühren, wie sie bei Ventura, New Idris, Coalinga und Kettleman Hills in Bohrlöchern registriert wurden. Robert F. Yerkes vom Geologischen Dienst der USA hat gezeigt, daß in diesen Gebieten ab drei Kilometer Tiefe der Flüssigkeitsdruck

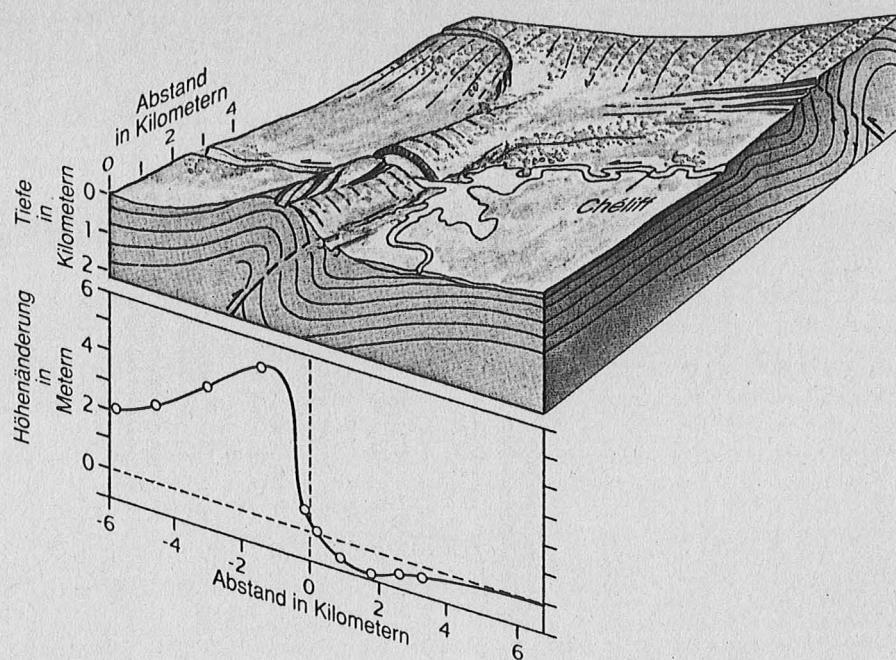


Bild 7: Das Erdbeben der Magnitude 7,3, das im Jahre 1980 bei der algerischen Stadt El Asnam auftrat, staute den Fluss Chélieff (oben). Dieser hatte eine Schlucht durch eine Bodenfalte am Bebenort gegraben. Da sich die Falte während des Bebens um fünf Meter hob, wurde der Flusslauf blockiert. Dadurch bildete sich für kurze Zeit ein See, an dessen Grund sich Schlick ablagerte. Grabungen unter dieser Schlickschicht ergaben, daß während der

vergangenen 6000 Jahren insgesamt sechs solche vorübergehenden Seen entstanden sein müssen – wahrscheinlich infolge von Erdbeben, die sich in Abständen von etwa 1000 Jahren ereigneten. Die Kurve im Diagramm (unten) zeigt die Höhenänderung quer durch die Falte während des Bebens. Die Ähnlichkeit des Hebungsmusters mit der Form der Falte läßt darauf schließen, daß die Falte von Erdbeben wie dem von 1980 aufgewölbt worden ist.

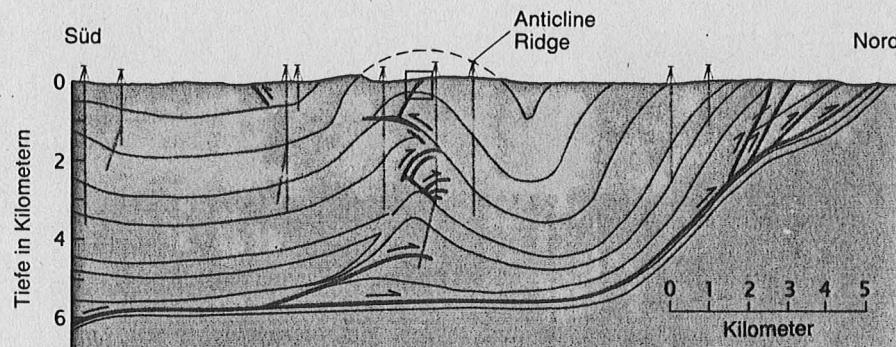


Bild 8: Das Innere der Ventura-Avenue-Antiklinale ist von zahlreichen Brüchen durchsetzt, die beim Verbiegen der Schichten entstanden sind. Entlang der Bruchlinien haben sich viele Störungen (rote Linien) gebildet. Protokollen von Erdölbohrungen, die in die Antiklinale niedergebracht wurden (grün), ist zu entnehmen, daß die Falte in einer Tiefe von etwa

sechs Kilometern abflacht. Dies läßt sich am besten damit erklären, daß sich am Grunde der Falte eine nahezu horizontale Störung, also eine Überschiebung, befindet. Versetzungen entlang von Störungen, die von dieser Hauptbruchfläche abzweigen, wölben die Falte wie in dem Modell in Bild 5 weiter auf. Das Quadrat markiert die in Bild 2 gezeigte Region.

den hydrostatischen Druck übersteigt. Der Grund ist wohl, daß Falten Flüssigkeiten in ihrem Inneren festhalten, während bis zur Oberfläche reichende Störungen ihnen ein Leck zum Entwichen bieten.

Hoher Flüssigkeitsdruck in Klüften im Gestein vermindert den Reibungswiderstand gegen Scherung, so daß das Gestein nicht nur schneller bricht, sondern sich auch leichter biegen läßt. Die

Diffusion von Porenflüssigkeit nach dem Bruch verändert die Reibungskräfte an den Störungen, wodurch die Rutschung an einigen Bruchflächen erschwert und an anderen erleichtert wird. Daraus ergibt sich ein breiteres Spektrum von Bruchzeiten, das sich in einem verlängerten, also „langsamem“ Erdbeben äußern kann.

Wir behaupten, daß Falten nicht durch langsame, stetige Verformung,

sondern – zumindest teilweise – diskontinuierlich durch wiederholte Erdbeben über Hunderttausende bis Millionen von Jahren aufgewölbt werden. Die Ventura-Avenue-Antiklinale liefert auch für diese Annahme überzeugende Belege (Bild 2).

Diese Falte ist nur 200000 bis 300000 Jahre alt und so schnell gewachsen wie sonst kaum eine anderswo auf der Welt. Kenneth R. Lajoie und Andrei M. Sarna-Wojcicki vom Geologischen Dienst der USA haben neun marine Terrassen an der Flanke der Antiklinale ausgemacht, von denen die jüngste zwei und die älteste 20 Meter über den Meeresspiegel herausragt. Alle sind etwa in Wasserhöhe von Sturmwellen in die Falte eingeschnitten worden und mit Muschelschalen übersät. Radiokohlenstoff-Datierungen der Muscheln ergaben Alter zwischen 1800 Jahren für die jüngste Plattform und 5600 für die älteste.

Da der Meeresspiegel, wie man auf Grund unabhängiger Befunde weiß, während der letzten 7000 Jahre um höchstens einen Meter geschwankt hat, scheidet ein erhöhter Wasserstand als Erklärung für die Lage der Terrassen aus; vielmehr muß das Land sich gehoben haben. Die Bildung von neun getrennten Terrassen läßt darauf schließen, daß diese Hebung nicht allmählich, sondern abrupt vor sich ging. Wie bei den El-Asnam-Seen sind wiederholte ruckartige Hebungen auf Grund von Erdbeben die einfachste Erklärung für diese gigantische Freitreppe.

Ausnahme oder Regelfall?

Wie wir gezeigt haben, machen die Erdbeben bei El Asnam, Coalinga, Kettleman Hills und Whittier Narrows unwiderleglich klar, daß Falten während starker Erdstöße angehoben werden. Zugleich belegen prähistorische Zeugnisse bei El Asnam und Ventura, daß sich solche bebenbedingten Hebungen mehrfach wiederholt haben. Dennoch betrachten die meisten Erdwissenschaftler Falten bisher als Beleg für eine stetige, allmähliche Deformation, die ganz ohne Erdbeben vonstatten gehen kann.

Die schwierige Frage lautet daher: Sind die von uns diskutierten Fälle die Ausnahme oder die Regel? Konkreter: Wachsen Falten überwiegend stetig und aseismisch, oder verbergen sich unter den meisten eben doch seismisch aktiven Störungen?

Würde man sich dasselbe bei oberflächlich erkennbaren aktiven Störungen fragen, wäre die Antwort, daß nur an wenigen ein stetiges Gleiten oder

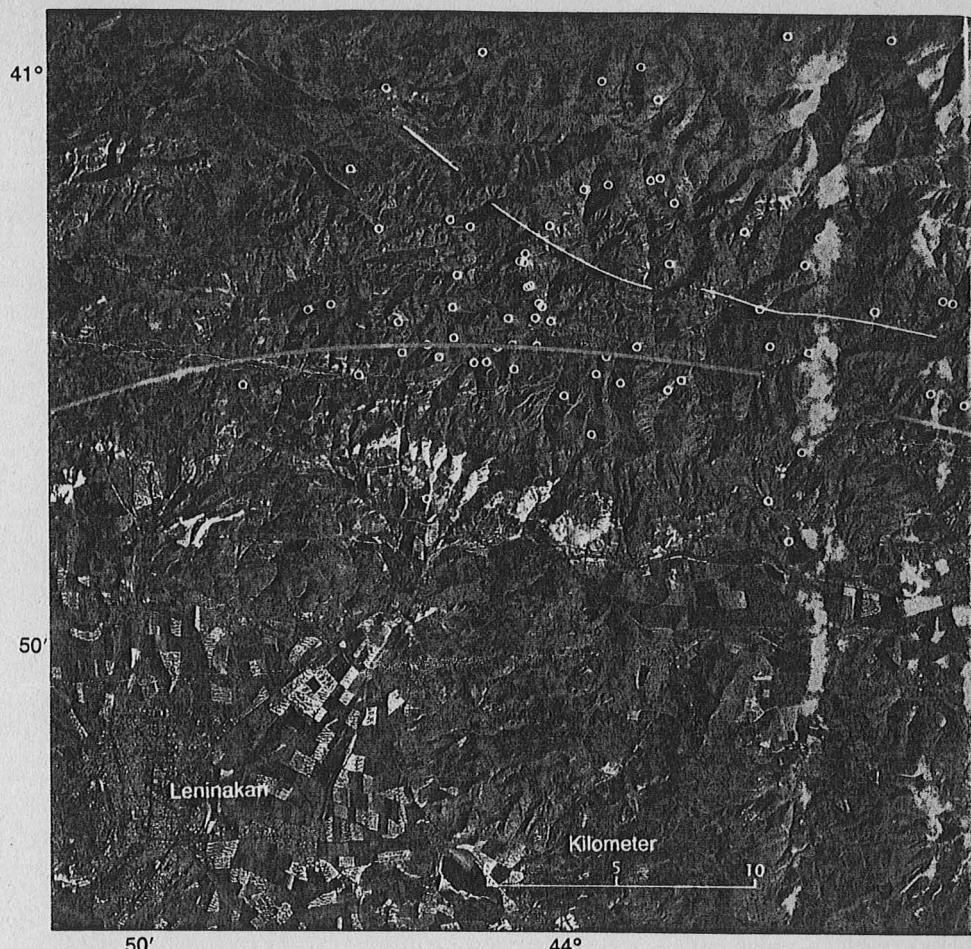


Bild 9: Der Schauplatz des Erdbebens in Armenien im Dezember 1988 wurde 1987 von einem Landsat-Satelliten aufgenommen und das Photo später für die sowjetische Botschaft in Washington farbverstärkt. Der Hauptstoß des Bebens (großer weißer Kreis) ereignete sich in

der Nähe einer kurzen bis zur Oberfläche reichenden Verwerfung (dicke blaue Linie) unweit der Stadt Spitak. Ein Seismologen-Team der Akademie der Wissenschaften und des geologischen Dienstes der USA war auf Einladung der sowjetischen Akademie der Wissenschaften

Kriechen zu beobachten ist; in der Regel finden in den obersten 15 Kilometern der Kruste keine Kriechvorgänge statt. Wohl gibt es beachtenswerte Ausnahmen, zu denen etwa das 300 Kilometer lange Mittelstück der San-Andreas-Störung gehört; weltweit betrachtet aber zeigen die meisten Störungen jenes wiederholte Steckenbleiben und ruckartige Verrutschen von Gesteinsblöcken, das Erdbeben auslöst.

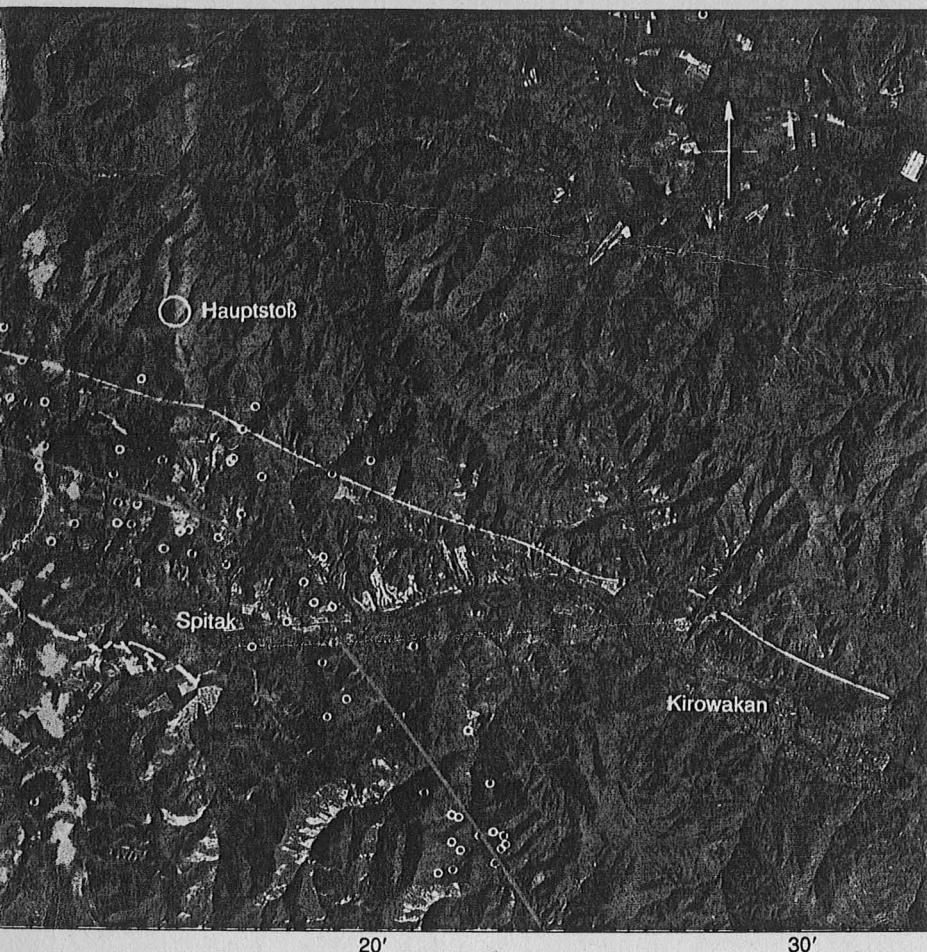
Aber zurück zu Faltungen. Nirgendwo hat die Frage nach ihrem Verlauf größere Bedeutung als im Los-Angeles-Becken. Die 1,5 Kilometer hohe (bei Whittier Narrows allerdings fast völlig von Ablagerungen der San-Gabriel-Berge zugeschüttete) Falte des Santa-Monica-Gebirges ist weniger als 3,3 Millionen Jahre alt. Im Mittel muß sie sich also um etwa einen halben Millimeter pro Jahr gehoben haben. Während des Whittier-Narrows-Bebens wurde sie jedoch um 50 Millimeter auf einmal emporgedrückt. Wird die Aufwölbung allein durch Erdbeben be-

wirkt, kann man sich leicht ausrechnen, daß an dieser Stelle einmal pro Jahrhundert ein Beben stattfinden sollte.

Nun ist der von dem Erdbeben des Jahres 1987 heimgesuchte Abschnitt aber nur fünf Kilometer lang und umfaßt damit lediglich 3 Prozent der insgesamt wahrscheinlich 150 Kilometer langen blinden Störung. Würden also alle Abschnitte der Störung mit gleicher Wahrscheinlichkeit brechen und dabei ein Erdbeben der Magnitude 6 auslösen, müßte alle drei bis fünf Jahre ein Erdstoß das Los-Angeles-Becken und den angrenzenden Küstenstreifen erschüttern.

Das ist offensichtlich nicht der Fall. Seit der Gründung von Los Angeles im frühen 19. Jahrhundert wurde nur alle 25 Jahre ein Beben der Magnitude 6 oder mehr in dem betrachteten Korridor registriert.

Möglicherweise röhrt der Widerspruch wirklich daher, daß die Versetzung an Störungen und die Aufwölbung von Falten größtenteils stetig verlaufen:



in das Katastrophengebiet gekommen und zeichnete die Nachbeben auf (kleine weiße Kreise). Deren Herde liegen entlang einer Kette von Falten (rote Linien), die sowjetische Geologen 25 Jahre vor dem Beben kartiert hatten. Die eng begrenzte Versetzung an der

Oberfläche und die Anordnung der Nachbebenherde entlang der Faltenkette legen nahe, daß es sich um ein Faltenbeben handelte. Es ist noch nicht sicher, ob es an der bisher nicht eindeutig nachgewiesenen Hauptstörung (dünne blaue Linie) zu Versetzungen gekommen ist.

Spannungen können sich nicht aufbauen, da ihnen das Gestein durch kriechende Verformung beständig nachgibt. Die Überschiebungen unter vielen Falten liegen in 12 bis 15 Kilometern Tiefe. Dort herrschen möglicherweise bereits so hohe Temperaturen, daß der Quarzanteil des Gesteins plastisch verformbar wird und Kriechvorgänge ermöglicht. Wenn an den Störungen die Gesteinsschichten glatt aneinander entlanggleiten, verformen sich vielleicht auch die Falten darüber stetig.

Zwar gibt es keine direkten Beweise für ein gleichmäßiges Faltenwachstum, aber immerhin hat man an Gesteinsproben im Labor eine kontinuierliche Scherung simulieren können. Außerdem verlaufen die Verschiebungen zwischen den tektonischen Platten, die am Rand des Pazifik aneinandergrenzen, zur Hälfte aseismisch.

Dennoch halten wir es für wahrscheinlicher, daß Falten stoßweise durch Erdbeben aufgewölbt werden — allerdings durch solche, die stärker als

das bei Whittier Narrows und dafür seltener sind. Beben mit Magnituden über 7, die sich in Abständen von mehreren Jahrhunderten ereignen, könnten sehr wohl für das Wachstum der Santa-Monica-Falte verantwortlich sein. Daß während der kurzen überlieferten Geschichte des Los-Angeles-Beckens nur relativ wenige schwächere Beben aufgetreten sind, hätte dann nichts zu besagen.

Die unerkannte Bedrohung

Es ist verpflichtende Aufgabe von Seismologen, zwischen den beiden rivalisierenden Erklärungsmöglichkeiten zu entscheiden, deren Konsequenzen so dramatisch voneinander abweichen: Falls stärkere Erdbeben als das von 1987 unter der Santa-Monica-Falte möglich sind, dann droht Los Angeles die größte Gefahr nicht von einem Beben der Magnitude 8 an der 50 Kilometer weiter nördlich gelegenen San-An-

dreas-Störung, sondern von einem schwächeren Erdstoß direkt unter der Innenstadt.

Heute verfügen wir über eine Reihe von Hilfsmitteln, um die Bebengefahr im Los-Angeles-Becken wie auch in anderen Faltungsgürteln der Erde zu erkunden. Dazu zählen die Aufnahme seismischer Reflexionsprofile, geodätische Bestimmungen der momentanen Faltungs- und Hebungsrate, Analysen der Protokolle Tausender von Erdölbohrungen sowie geologische Untersuchungen mit dem Ziel, die sich am schnellsten aufwölbenden Oberflächenfalten zu identifizieren.

Obwohl sich die Untersuchungen über Faltenbeben auf Südkalifornien konzentriert haben, gibt es Anhaltspunkte dafür, daß solche Beben überall auf der Welt in aktiven Faltungsgürteln aufgetreten sind und daher weitaus mehr Menschen bedrohen (Bild 3). Außer bei El Asnam in Nordafrika haben sich Beben der Magnitude 7 bis 7,8 an blinden Störungen in Nordindien, Neuseeland, Argentinien, Kanada und Japan ereignet. Hochgradig gefährdet sind auch Länder wie Chile, Jugoslawien, Taiwan, Persien und Pakistan.

Das jüngste — und mit das tragischste — Beispiel eines mutmaßlichen Faltenbebens erregte vor nur acht Monaten weltweit Aufmerksamkeit und Anteilnahme: das Erdbeben der Magnitude 6,8 am 7. Dezember 1988 in der armenischen Stadt Spitak, das mindestens 25000 Menschenleben forderte. Es ereignete sich in einer der am stärksten gefalteten und seismisch aktivsten Regionen der Erde, dem unteren Kaukasus in der Sowjetunion. Der Hauptstoß war die Folge einer Versetzung an einer Aufschiebung unter einer jungen Antiklinale (Bild 9).

Zwar zerriß die Erde längs einer Störung an der Oberfläche, doch nur auf einem acht bis zwölf Kilometer langen Abschnitt, während sich die Nachbeben über eine 50 Kilometer lange Zone unter der Falte erstreckten. Demnach erreichte nur ein kleiner Teil der bebenauslösenden Versetzung die Oberfläche. Genau wie bei den anderen besprochenen Faltenbeben waren die Nachbeben zudem diffus verteilt, statt wie bei einem normalen Verwerfungsbeben entlang der Störungsfläche angeordnet. Diese vorläufigen Befunde legen nahe, daß das Beben bei Spitak auch mit Faltenprozessen zusammenhängt.

Stärke und Zerstörungskraft dieses Bebens hätten sich aus der kleinen oberflächlich erkennbaren Störung nicht vorhersehen lassen, aber die Falte lieferte einen Anhaltspunkt, den zu übersehenden Seismologen sich künftig nicht mehr leisten können.