

# Die Bedrohung durch stille Erdbeben

Nicht immer muss der Boden erzittern, wenn sich die Spannung an einer Scherzone plötzlich entlädt. Gefahr droht dennoch; denn obwohl die lautlosen Beben selbst kaum Schäden anrichten, können sie riesige Flutwellen und schwere Erdstöße auslösen.

Von Peter Cervelli

**A**nfang November 2000 fand auf der Insel Hawaii das stärkste Erdbeben seit mehr als einem Jahrzehnt statt. Rund 2000 Kubikkilometer Gestein am Südhang des Vulkans Kilauea bewegten sich en bloc in Richtung Meer und setzten die Energie eines Bebens der Stärke 5,7 frei. Betroffen war auch das Gebiet unterhalb eines Aussichtspunktes, zu dem täglich Tausende von Touristen strömen, um einen Blick auf einen der spektakulärsten Lavaströme der Insel zu werfen. Doch

den Erdrutsch bemerkte niemand – selbst den Seismologen entging er.

Wie konnte er übersehen werden? Einfach deshalb, weil er ohne jegliche Erschütterung ablief. Tatsächlich weiß man inzwischen, dass der Boden nicht immer erzittern muss, wenn sich – wie bei Erdbeben üblich – Gesteinsblöcke ruckartig an Störungslinien entlang verschieben. Der Vorfall am Kilauea war eines der ersten »stillen« Beben, das sich eindeutig dokumentieren ließ.

Noch bis vor kurzem ahnte niemand etwas von der Existenz solcher Ereignis-

se. Auch ich hätte dieses Beben nicht entdeckt, würde nicht ein Netz hochempfindlicher Instrumente, installiert vom Vulkan-Observatorium des Geologischen Dienstes der USA auf Hawaii, alle Veränderungen am Kilauea kontinuierlich aufzeichnen. Und so erkannte ich, dass die Südflanke des Vulkans um ganze zehn Zentimeter entlang einer Verwerfung im Untergrund verrutscht war. Aber ich sah zugleich, dass diese Bewegung annähernd 36 Stunden gedauert hatte, also geradezu im Schneckentempo abgelaufen war. Bei





Ein riesiger Erdsturz als Folge eines stillen Erdbebens könnte eine mehrere hundert Meter hohe Welle erzeugen, die benachbarte Küsten überflutet (unten).

DAVID FIERSTEIN

normalen Erdbeben schnellen die gegenüberliegenden Seiten der Verwerfungsfläche nämlich in wenigen Sekunden aneinander vorbei – so rasant, dass seismische Wellen entstehen, die den Boden rumpeln und wackeln lassen.

### **Gefahr riesiger Flutwellen**

Nur weil ein Erdbeben langsam und ruhig vonstatten geht, ist es aber keineswegs unbedeutend. Meinen Mitarbeitern und mir war sofort klar, dass das Ereignis

am Kilauea Vorbote einer kommenden Katastrophe sein könnte. Falls derselbe riesige Körper aus Gestein und Schutt sich wieder in Bewegung setzen und zu einem gewaltigen Erdsturz entwickeln würde, bei dem er sich endgültig vom Rest des Vulkans losrisse und ins Meer stürzte, wären die Folgen verheerend.

Wenn Tausende von Kubikkilometern Erde auf einmal ins Wasser plumpsen, erzeugen sie turmhohe Wellen: so

genannte Tsunamis. Diese könnten sich von Hawaii aus über den gesamten Pazifik ausbreiten und die Küstenorte rundum bedrohen. Ein dramatischer Flankenabbruch an einer Vulkaninsel stellt daher eine potenzielle weltweite Gefahr dar. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dafür glücklicherweise gering.

Tatsächlich sind stille Erdbeben, so beunruhigend ihre Entdeckung auf den ▷



▷ ersten Blick wirken mag, letztlich wohl mehr Segen als Fluch. So sollten die Instrumente zu ihrer Aufzeichnung Frühwarnungen ermöglichen. Detaillierte Erkenntnisse darüber, wie es zu solchen Rutschungen kommt, liefern zudem aussichtsreiche Ansätze für Maßnahmen, einen Flankenabbruch zu verhindern. Und schließlich gibt es stille Erdbeben auch in Gebieten, in denen keine Gefahr besteht, dass eine komplette Vulkanseite wegbriecht. Dort verhelfen sie zu Einsichten, die dazu beitragen sollten, ihre weniger harmlosen Verwandten – die schweren seismischen Erschütterungen – zuverlässiger vorherzusagen.

### Unerwartet schnelle Bodenbewegung

Auf die stillen Erdbeben und ihre Verbindung mit dramatischen Abbrüchen von Vulkanflanken stießen meine Mitarbeiter und ich eher zufällig, als wir andere Naturgewalten erforschten. Zerstörerische Erdstöße und Vulkanausbrüche sind in Japan und an der Pazifikküste im Nordwesten der USA, wo tektonische Platten entlang so genannter Subduktionszonen tief ins Erdinnere abtauchen, eine stete Bedrohung. Zu Beginn der 1990er Jahre fingen Geologen an, ausgedehnte Netze von kontinuierlich aufzeichnenden GPS-Empfängern in seismisch gefährdeten Regionen und an den Hängen aktiver Vulkane wie dem Kilauea zu installieren. Indem diese Instrumente Signale der mehr als dreißig Navigationssatelliten des Global Positioning System auffangen, können sie ihre eigene Position auf der Erdoberfläche zu jeder beliebigen Zeit auf wenige Millimeter genau berechnen.

Als die Wissenschaftler die GPS-Empfänger aufstellten, erwarteten sie zwei Dinge damit zu »sehen«: das langsa-

me, stetige Wandern der tektonischen Platten, aus der die Erdschale besteht, und die ziemlich rasanten Gesteinsverschiebungen bei Erdbeben und Vulkanausbrüchen. Zur allgemeinen Überraschung registrierten die Instrumente aber teils auch geringfügige Bewegungen des Untergrunds, die sich nicht mit einer seismischen Erschütterung oder einem Vulkanausbruch in Verbindung bringen ließen.

Als die Forscher dieses Wandern in einer Karte darstellten, ähnelte das resultierende Muster stark der charakteristischen Verschiebung an Bruchzonen bei Erdbeben: Alle GPS-Stationen auf einer Seite einer hypothetischen Scherlinie bewegten sich einige Zentimeter in die gleiche Richtung. Dies wäre nichts Besonderes gewesen, wenn sich das Muster erst nach ein bis zwei Jahren gezeigt hätte; denn ein derart langsames »Kriechen« einer Verwerfung kannten die Geologen schon länger. Doch die mysteriöse Bewegung war einige hundert Mal so schnell und erreichte Geschwindigkeiten von mehreren Zentimetern pro Tag. Zudem unterschied sie sich durch eine weitere Eigenschaft vom Kriechen der Verwerfungen: Sie erfolgte nicht kontinuierlich, sondern in einzelnen Schüben, die recht plötzlich begannen und endeten. Auch darin glich sie eher einem Erdbeben.

Wenn eine solche relativ schnelle Bewegung am Hang einer Vulkaninsel einsetzt, könnte sie den dramatischen Abbruch einer Flanke einleiten. Erdbeben ereignen sich meist an Störungszonen mit eingebauten Bremsen: Die Bewegung kommt zum Stillstand, sobald die Spannung zwischen den beiden Erdschollen, die aneinander entlangschrammen, abgebaut ist. Dagegen lässt die Gravitation im Verlauf der Bewegung nicht nach. Wenn sie die Haupttrieb-

feder ist, kann also im schlimmsten Fall der Teil des Vulkans oberhalb der schrägen Bruchfläche so instabil werden, dass die einmal begonnene Rutschung nicht mehr aufhört und die gesamte Seite des Berges von der Schwerkraft nach unten gezogen wird, ins Meer stürzt und an dessen Grund schließlich zu einem riesigen Schuttfächer zerfällt.

### Reibung als Notbremse

Für diese Art von Kollaps müssen die Hänge ziemlich steil sein. Vulkane können stark geneigte Flanken entwickeln, wenn wiederholte Ausbrüche relativ zähflüssiger Lava den Kegel schneller auftürmen, als die Erosion ihn abflachen kann. Am Kilauea trifft dies offenbar zu. Die Entdeckung eines stillen Erdbebens beweist, dass sein Südhang in Bewegung ist – und vielleicht irgendwann abreißt.

Noch wirkt die Reibung entlang der Bruchfläche wie eine Notbremse. Doch die Frage ist, ob sie der Schwerkraft auf Dauer standhält. In vielen anderen Fällen in der Vergangenheit hat sich die Gravitation letztlich durchgesetzt. So liefern Sonaraufnahmen riesiger Schuttfächer im Flachwasser rund um Vulkaninseln in aller Welt – darunter auch die Kanaren – schon seit langem Hinweise auf einstige Flankenabbrüche. Mehr als 25 solcher Bergstürze gab es auf der Inselkette von Hawaii in den vergangenen fünf Millionen Jahren – geologisch gesehen ein Augenblick.

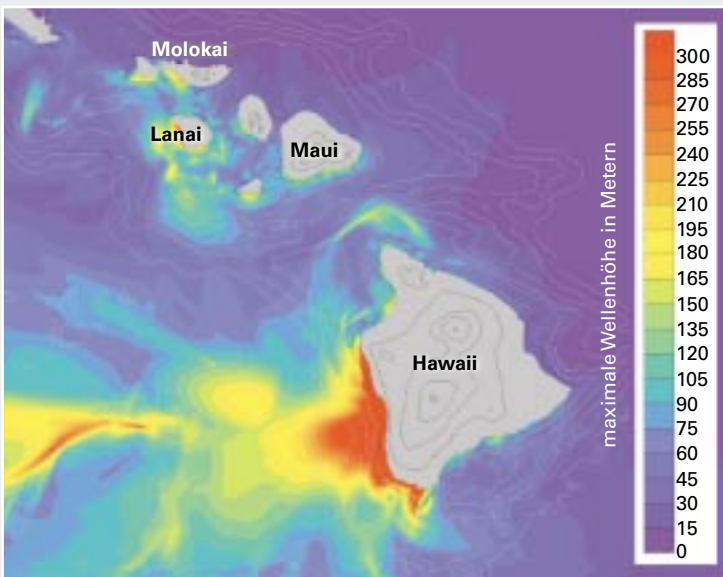
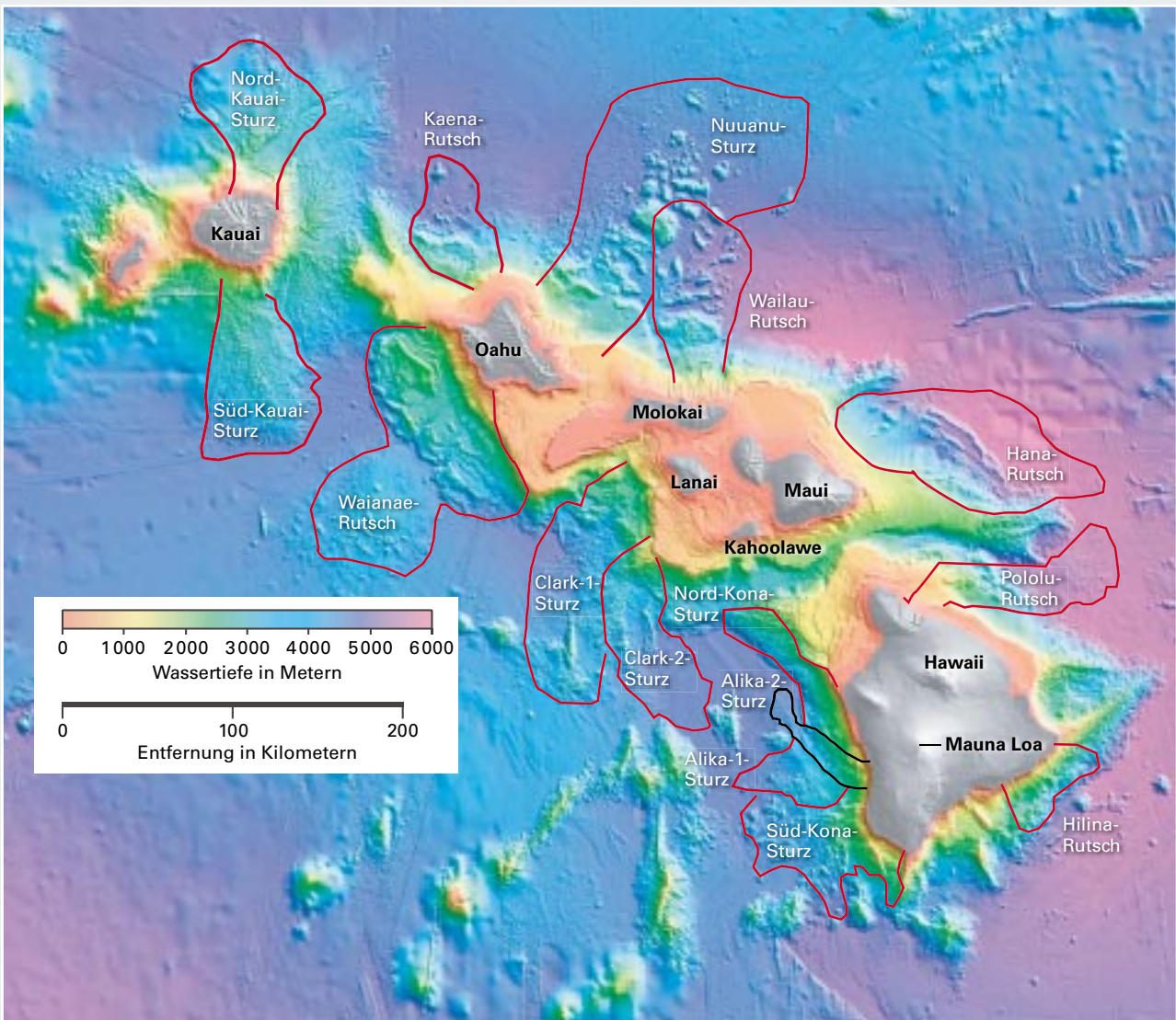
Im typischen Fall stürzt dabei vielhundertmal so viel Gestein ins Meer, wie bei der Eruption des Mount St. Helens im Mai 1980 vom Gipfel abbrach und sich zu Tal wälzte – mehr als genug für verheerende Tsunamis. Auf der Hawaii-Insel Lanai entdeckten Geologen 325 Meter über dem Meeresspiegel Haufen zertrümmerter Korallen. Nach Gary M. McMurtry von der Universität von Hawaii in Manoa ist die wahrscheinlichste Erklärung dafür eine wahrhaft gigantische Flutwelle, die bis in diese Höhe vordrang und die Kalkschalen dort deponierte. Die gewaltigsten Tsunamis, die in historischer Zeit registriert wurden, waren nur ein Zehntel so hoch.

So erschreckend diese Aussagen auch wirken mögen, ist die Gefahr, nüchtern und aus der angemessenen Perspektive betrachtet, doch relativ gering. Der dramatische Abbruch von Vulkanhängen kommt im Zeitrahmen eines Menschenlebens praktisch nicht vor. Allerdings ▷

## IN KÜRZE

- ▶ Nicht alle Erdbeben lassen den Boden schwanken. Manchmal löst sich die Spannung an einer **Scherzone** nicht ruckartig in Sekunden, sondern durch sanftes Gleiten innerhalb von Stunden bis Tagen.
- ▶ Stille Erdbeben, die am Rand von **Vulkaninseln** auftreten, bergen das Risiko von Flankenabbrüchen, bei denen die Kraterwand ins Meer stürzt und **turmhohe Tsunamis** auslöst.
- ▶ Stille Erdbeben an **Subduktionszonen**, wo eine tektonische Platte unter eine andere abtaucht, können starke Erdstöße nach sich ziehen.
- ▶ An anderen Stellen dürfte das lautlose Gleiten jedoch die **Gefahr verheerender Erdbeben** senken, weil es an Störungszonen, die kurz vor dem gewaltsamen Aufbrechen stehen, Spannung abbaut.

# Gigantische Erdrutsche und verheerende Tsunamis



**Gewaltige Schuttfächer** (oben, rot umrandet) vor den Küsten der Hawaii-Inseln machen deutlich, dass in der Vergangenheit mehrfach große Teile der dortigen Vulkane abgebrochen und ins Meer gestürzt sind. Nach Meinung einiger Geologen erzeugte der Bergsturz Alika 2 eine enorme Flutwelle, die an den benachbarten Küsten noch in über 300 Meter Höhe Gesteinstrümmen und zerbrochene Muschelschalen abgelagerte.

**Nach den Ergebnissen einer Computersimulation** (links) könnte die Tsunami-Woge bis zu 300 Meter hoch gewesen sein. Für kurze Zeit teilte sie wahrscheinlich die Insel Maui in zwei Hälften.

UNTEN: NACHDRUCK AUS: GARY M. MCMURTRY, MARINE GEOLOGY, VOL. 202, 2002, MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON ELSEVIER; OBEN: USGS, ZUSAMMEN MIT DEM JAPAN MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTER, DER UNIVERSITY OF HAWAII UND DEM MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE

▷ tritt er viel öfter auf als der verheerende Einschlag eines großen Asteroiden oder Kometen. Zu einem Flankenabbruch, der gewaltig genug ist, um eine gefährliche Flutwelle zu erzeugen, kommt es auf den Hawaii-Inseln etwa alle 100 000 Jahre. Nach Schätzung einiger Wissenschaftler dürfte ein solches Ereignis weltweit durchschnittlich einmal in 10 000 Jahren stattfinden. Dann freilich drohen extreme Zerstörungen. Deshalb erscheinen Überwachungs- und Vorsorgemaßnahmen durchaus angebracht.

Aus diesem Grund installieren Geowissenschaftler derzeit Netze von permanent arbeitenden GPS-Empfängern auf instabilen Vulkaninseln, um kritische Gesteinsbewegungen zu entdecken. Das gilt etwa für Réunion im Indischen Ozean, Fogo innerhalb der Kapverden im Atlantik und alle Galápagos-Inseln im Ostpazifik. Am Kilauea sind mehr als zwanzig GPS-Stationen in Betrieb. Sie haben bereits belegt, dass hier außer großen, zerstörerischen Erdbeben immer wieder auch lautlose Rutschungen stattfinden. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler bewahren mehrere submarine

Haufen aus Schlamm und Gestein – wahrscheinlich Schutt vergangener Flankenabbrüche – den Kilauea momentan vor einem katastrophalen Kollaps, indem sie seinen Südhang abstützen.

**Chance auf Früherkennung**

Sollte das unmerkliche Abrutschen tatsächlich in einen verheerenden Abbruch übergehen, müsste sich die Bewegung des Hanges rasant beschleunigen. Im schlimmsten Fall geschähe das derart schnell, dass keinerlei Chance auf Früherkennung und Warnung bestünde. Im besten Fall jedoch liefe die Beschleunigung ruckweise ab – in Form einer Serie stiller Erdbeben, die sich allmählich intensivieren. Mit einem Netz von GPS-Stationen wären diese sich steigernden Rutschungen leicht zu entdecken – lange bevor sie so stark werden, dass der Boden zu wanken beginnt. Mit etwas Glück käme eine Tsunami-Warnung dann vielleicht noch früh genug.

Dennoch bleibt die Situation kritisch. Bei einem gewaltigen Abbruch würden ein paar Stunden oder sogar Tage Vorwarnzeit vermutlich nicht aus-

reichen, weil es kaum gelingen dürfte, die große Zahl von Betroffenen in so kurzer Frist zu evakuieren. Deshalb stellt sich die Frage, ob sich ein drohender Abbruch vielleicht auch im Vorfeld verhindern ließe. Die Antwort lautet: im Prinzip ja. In der Praxis könnte der Versuch jedoch am zu großen Aufwand scheitern.

Denkbar wäre, in einem Mammut-einsatz einfach den oberen Bereich einer instabilen Vulkanflanke so weit abzutragen, dass die Reliefenergie unter den kritischen Schwellenwert sinkt. Viel billiger, aber auch riskanter wäre es, mit einer Serie kleinerer künstlicher Erdbeben zu versuchen, den Hang kontrolliert abrutschen zu lassen, bevor er steil genug für einen katastrophalen Abbruch geworden ist. Dabei würden sich die Forscher, um einem Kollaps vorzubeugen, dieselben Kräfte zu Nutze machen, die derzeit die stillen Erdbeben am Kilauea auslösen.

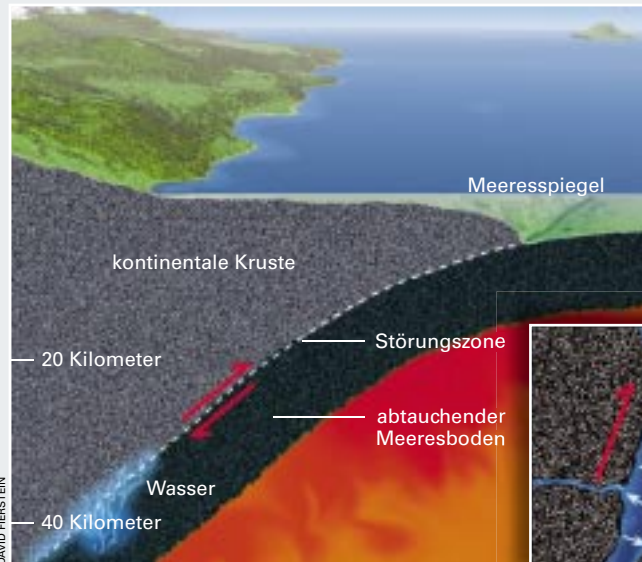
Neun Tage vor dem jüngsten Abrutschen dort fielen bei einem wolkenbruchartigen Regenguss in weniger als 36 Stunden mehr als tausend Millimeter Niederschlag. Schon lange weiß man, dass in Störungszonen einsickerndes

Wie stille Erdbeben entstehen

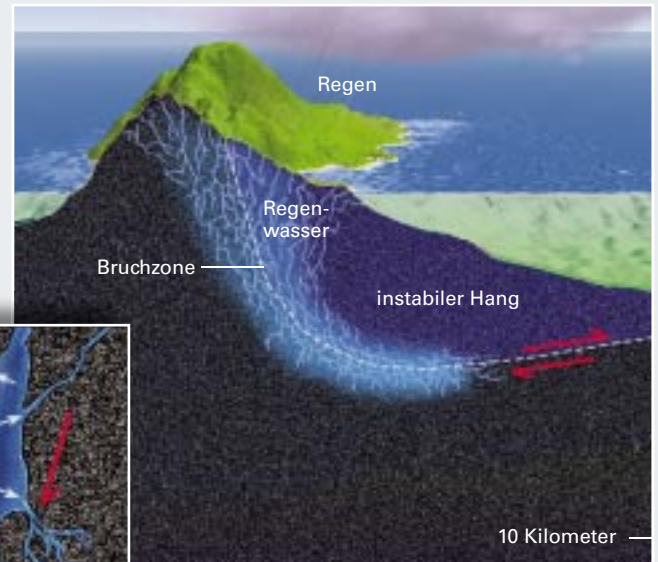
**Wasser könnte stille Erdbeben auslösen**, wenn es in eine anfällige Störungszone vordringt. Da es durch die Last des darüber liegenden Gesteins unter hohem Druck steht, kann es sich in den Spalt

an der Bruchfläche zwängen und ihn erweitern (kleines Bild). So verringert es die Haftreibung zwischen den benachbarten Gesteinsblöcken und erleichtert ihnen, aneinander vorbeizugleiten.

Subduktionszone



Vulkaninsel



**Kristallwasser**, das aus Mineralen in dem abtauchenden ehemaligen Meeresboden herausgepresst wird, kann entlang der Grenze zwischen den beiden tektonischen Platten nach oben wandern.

**Regenwasser** kann in eine dicht unter der Oberfläche gelegene Bruchzone einsickern, die beispielsweise die instabile Flanke eines Vulkans von seinem Zentralbereich trennt.

Wasser Erdbeben auslösen kann. Nach Schätzungen der Geologen braucht Regenwasser auf dem Kilauea ungefähr neun Tage, um sich seinen Weg durch die Risse und Poren des zerklüfteten Basaltgesteins bis zu einer Tiefe von fünf Kilometern zu bahnen – wo die Gleitbewegung bei stillen Erdbeben stattfindet. Dort schmiert die Flüssigkeit dann gleichsam die Bruchfläche und verringert die Reibung zwischen den benachbarten Gesteinsblöcken.

### Heikle Maßnahme zum Entschärfen der Gefahr

Der offenkundige Zusammenhang zwischen Wolkenbruch und stillem Erdbeben bestärkt die Verfechter der umstrittenen Idee, Wasser oder Dampf in Störungszonen an der Basis einer instabilen Flanke zu pressen, um gezielt Rutschungen auszulösen, durch die sich der Hang langsam absenkt und seine potenzielle Energie vermindert. Zu solchen induzierten Rutschungen kommt es in sehr kleinem Maßstab ständig bei geothermischen Kraftwerken und anderen Anlagen, die gezielt oder unabsichtlich Wasser in den Boden drücken.

Doch bei Vulkanen gleicht die Methode einer halbsbrecherischen Gratwanderung: Man muss es schaffen, genau die richtige Menge Flüssigkeit an der richtigen Stelle einzuführen, um nicht versehentlich den Kollaps selbst zu erzeugen, den man eigentlich vermeiden will. Einige Geophysiker spielten schon mit dem Gedanken, auf diese Weise kontrolliert Spannung entlang der berühmten San-Andreas-Störung in Kalifornien freizusetzen. Doch letztlich schreckten sie vor dem Risiko zurück.

Obwohl stille Erdbeben eine wichtige Rolle bei Flankenabbrüchen spielen, reicht ihre Bedeutung viel weiter. Ihre Entdeckung zwingt auch dazu, die gängigen Vorstellungen über die Vorgänge an Bruchzonen zu überdenken – was die Beurteilung seismischer Risiken einschließt. Im Nordwesten der USA, nahe der Pazifikküste, haben Forscher inzwischen viele lautlose Rutschungen an der Verwerfungszone der Kaskadenkette beobachtet, die zwischen der Nordamerikanischen Platte und der abtauchenden Juan-de-Fuca-Platte verläuft. Eine seltsame Eigenschaft der stillen Erdbeben dort ist, dass sie in regelmäßigen Abständen stattfinden – weshalb es inzwischen sogar möglich ist, sie vorherzusagen.

Ihr periodisches Auftreten rührt höchstwahrscheinlich daher, dass Wasser, das von unten empordringt, Ort und Zeitpunkt dieser lautlosen Rutschungen entscheidend mitbestimmt. Je tiefer die abtauchende Platte ins Erdinnere vorstößt, desto höheren Temperaturen und Drücken ist sie ausgesetzt. Unter diesen Bedingungen entweicht eine bedeutende Menge Kristallwasser, das in Mineralen eingeschlossen war. Es sammelt sich und bahnt sich dann schwallweise seinen Weg nach oben. Wenn es dabei den Spalt an der Bruchzone ein wenig auseinander drückt, könnte es ein stilles Erdbeben auslösen (siehe Kasten links).

Vor genau einem Jahr berichteten Garry Rogers und Herb Dragert vom Geologischen Dienst Kanadas sogar über einen Zusammenhang zwischen diesen lautlosen Rutschungen und messbaren, wenngleich sehr schwachen seismischen Erschütterungen. Die stillen Beben ereignen sich in bestimmten Intervallen in großen Tiefen. Dabei bestimmt ihre Häufigkeit und Intensität, wie schnell sich Spannung in den höheren Bereichen der Verwerfungszone aufbaut, die sich dann in ruckartigen Verschiebungen entlädt. Normalerweise dauert es ein Jahr oder länger, bis genügend Spannung für einen messbaren Erdstoß zusammenkommt. Rogers und Dragert meinen jedoch, dass eine lautlose Rutschung diese Zeit auf ein bis zwei Wochen abkürzen könnte. Demnach sollte in den Wochen und Monaten danach die Wahrscheinlichkeit für ein normales Erdbeben deutlich erhöht sein.

### Neubewertung des Erdbebenrisikos

Auch in anderen Teilen der Welt ist das Bebenrisiko neu zu bewerten. Zum Beispiel gibt es in Japan so genannte seismische Löcher, in denen schon ungewöhnlich lange kein Erdstoß mehr stattgefunden hat. Nach gängiger Einschätzung wäre ein verheerendes Erdbeben hier überfällig. Doch falls stille Rutschungen an den betreffenden Scherflächen quasi unbemerkt Spannung abgebaut haben, ist die Gefährdung in Wahrheit vielleicht viel geringer als gedacht. Desgleichen sollte man bisher als inaktiv eingestufte Störungszonen genauestens auf verborgene lautlose Rutschungen untersuchen, um festzustellen, ob an ihnen vielleicht doch bislang übersehene Verschiebungen auftreten, die einmal ein verheerendes Erdbeben auslösen könnten.

Die Erkenntnis, dass Gesteinsblöcke an Bruchflächen mit vielerlei Geschwindigkeiten aneinander entlanggleiten können, stellt die Theoretiker vor eine große Herausforderung. Sie macht es sehr viel schwieriger, den Verwerfungsprozess mit grundlegenden physikalischen Prinzipien zu beschreiben. Nach heutiger Ansicht lassen sich Häufigkeit und Stärke der beobachteten Erdbeben mit einem ziemlich einfachen Reibungsgesetz erklären. Gilt das auch für ihre lautlosen Pendanten? Bislang gibt es darauf keine endgültige Antwort.

Das ist auch nicht verwunderlich – schließlich steckt die Erforschung der stillen Erdbeben erst noch in den Anfängen. Doch die Mühe lohnt sich. Die detaillierte Aufklärung des subtilen Phänomens verspricht eine Fülle neuer Erkenntnisse darüber, wie und warum sich an Störungszonen die Gesteinsblöcke verschieben – eine Frage, deren Bedeutung sich nicht hoch genug einschätzen lässt. Denn je nach Art und Geschwindigkeit der Bewegung an Bruchflächen können – teils auch in großer Entfernung – immense Schäden auftreten. Die Kenntnis der stillen Erdbeben eröffnet einen völlig neuen Blickwinkel auf den Scherprozess und erlaubt, ihn in allen Geschwindigkeitsbereichen detailliert zu erforschen. ◀



**Peter Cervelli** ist Geophysiker und leitet das Krusten-Deformations-Projekt am Vulkan-Observatorium auf Hawaii, das sich am Rand der Caldera des Kilauea befindet. Er ist verantwortlich für die Interpretation der

Messdaten eines Netzes von fast fünfzig Instrumenten, welche alle möglichen Bewegungen und Verformungen des Bodens an den beiden aktivsten Vulkanen der Insel messen: dem Mauna Loa und dem Kilauea. Cervelli entdeckte das stille Erdbeben an der Südflanke des Kilauea während seiner Doktorarbeit, die er 2001 an der Universität Stanford (Kalifornien) abschloss.

Giant landslides, mega-tsunamis, and paleo-sea level in the Hawaiian islands. Von G. M. McMurtry et al. in: *Marine Geology*, Bd. 203, S. 219; 30.1.2004

Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: the chatter of silent slip. Von G. Rogers und H. Dragert in: *Science*, Bd. 300, S. 1942; 20.6.2003

Sudden aseismic fault slip on the south flank of Kilauea volcano, Hawaii. Von P. Cervelli et al. in: *Nature*, Bd. 415, S. 1014; 28.2.2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.