

# Ein See als Seismograf

Die Schweiz gilt nicht gerade als erdbebengefährdet. Doch wurde sie in der Vergangenheit von starken seismischen Erschütterungen heimgesucht. Das verraten Sedimente am Boden des Vierwaldstättersees.

Von Michael Schnellmann, Flavio S. Anselmetti, Domenico Giardini, Judith A. McKenzie und Steven N. Ward

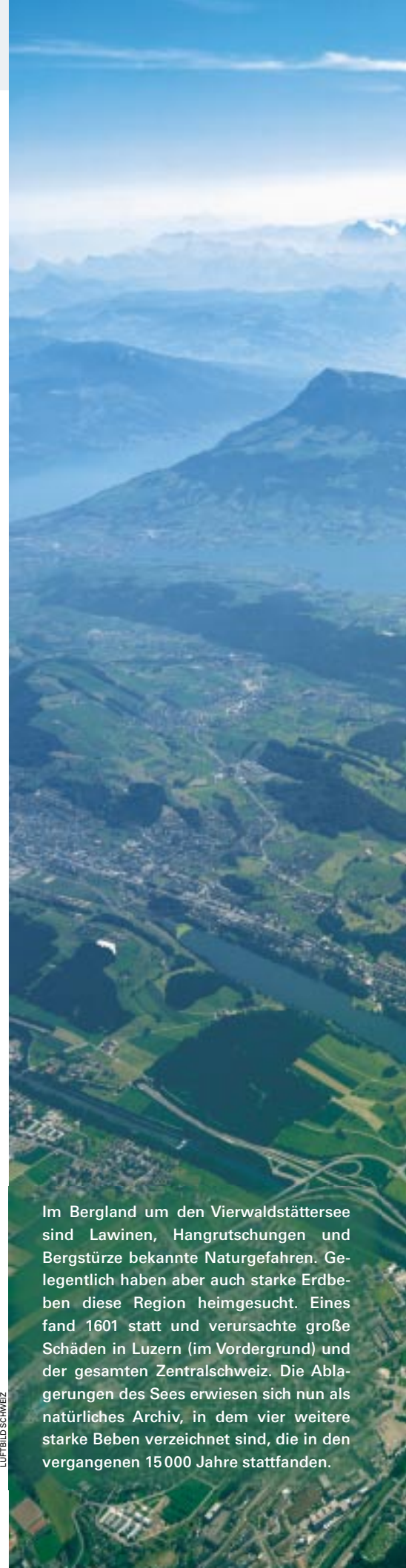
**Z**instags den 18 tag Septembris dess 1601ten jars erhuobe sich nach mittnacht den morgen gegen tag ein wenig vor 2 vhren ein starcker vnd fürwar erschrockenlicher erbidem allhie by vns zuo Lucern, ... derglychen nitt allein sich niemands verdencken mögen, sonder ouch jn allten historien vnd chronicken nitt ze finden, das die statt Lucern derglychen überstanden habe ....« So beginnt der Augenzeugenbericht von Renward Cysat, Stadtschreiber in Luzern, der die katastrophalen Auswirkungen eines der stärksten bekannten Erdbeben in Mitteleuropa eingehend dokumentierte. Der Erdstoß verursachte beträchtliche Schäden in der Zentralschweiz und war noch in Teilen Frankreichs, Deutschlands und Italiens spürbar. Seismologen schätzen, dass er die Stärke 6,2 auf der Richterskala erreicht hätte, wenn er von modernen Instrumenten aufgezeichnet worden wäre. Damit nähme er den gleichen Rang ein wie viele starke Erdbeben, die sich in jüngerer Zeit bei Los Angeles und San Francisco ereignet haben.

Die Kalifornier sind es natürlich gewöhnt, dass der Boden ab und zu wackelt. Doch wer kann sich schon ernsthaft vorstellen, dass Erdbeben die Schweiz bedrohen? Die Eidgenossen ergreifen vielerlei Vorkehrungen gegen

Bergstürze und Hochwässer; mit größeren seismischen Erschütterungen rechnen sie hingegen kaum. Wenn man aber genügend weit zurück in den historischen Berichten blättert, stellt man fest, dass es in der Schweiz tatsächlich einige starke Erdstöße gab. Außer dem von 1601 bei Luzern ereignete sich 1356 ein verheerendes Beben bei Basel. Es war das stärkste jemals in Mitteleuropa beobachtete.

Ein ähnliches Ereignis heute würde zahlreiche Tote und Verletzte fordern sowie großräumig erhebliche Zerstörungen anrichten. Um zu entscheiden, wie viel Zeit und Geld in Vorsorgemaßnahmen gegen Erdbeben fließen sollten, muss man jedoch wissen, wie groß die Gefahr wirklich ist. Deshalb arbeiten wir daran, die seismischen Risiken für die Schweiz besser abzuschätzen. Zunächst einmal gilt es dabei herauszufinden, in welchen Abständen starke seismische Erschütterungen im Mittel auftreten.

Noch bis vor Kurzem basierte der Schweizer Katalog vergangener Erdbeben ausschließlich auf seismografischen Messungen und historischen Dokumenten. Der erste Seismograf in der Eidgenossenschaft wurde 1911 installiert, und die schriftlichen Aufzeichnungen decken nur das letzte Jahrtausend ab. Anhand dieser beiden Informationsquellen, so wertvoll sie sind, lässt sich daher nicht erkennen, ob irgendwo starke Erdstöße im Abstand von, sagen wir, einigen tausend Jahren auftreten. Solche langen Intervalle zwischen großen Beben sind ▷



Im Bergland um den Vierwaldstättersee sind Lawinen, Hangrutschungen und Bergstürze bekannte Naturgefahren. Gelegentlich haben aber auch starke Erdbeben diese Region heimgesucht. Eines fand 1601 statt und verursachte große Schäden in Luzern (im Vordergrund) und der gesamten Zentralschweiz. Die Ablagerungen des Sees erwiesen sich nun als natürliches Archiv, in dem vier weitere starke Beben verzeichnet sind, die in den vergangenen 15 000 Jahre stattfanden.



▷ aber typisch für Regionen wie die Schweiz, die weitab von den Rändern tektonischer Platten liegen, wo sich ein Großteil der seismischen Aktivität abspielt.

Um das Risiko starker Erdbeben in solchen Gebieten zu ermitteln, muss man möglichst weit in die Vergangenheit zurückschauen und den Katalog der bekannten Ereignisse bis ins Dunkel der Vorgeschichte ausdehnen. Zwar ist von damals natürlich kein schriftlicher Erdbebenbericht überliefert, doch die Erschütterungen haben in der Natur selbst Spuren hinterlassen. Man muss die versteckten geologischen Archive nur aufspüren und richtig deuten, um Informationen über Erdstöße in ferner Vergangenheit zu gewinnen.

Paläoseismologen haben sich auf diese Detektivarbeit spezialisiert. Um die charakteristischen Spuren zu entdecken, die mittlere bis starke seismische Erschütterungen an der Erdoberfläche oder unmittelbar darunter hinterlassen haben, ziehen sie regelmäßig Gräben quer durch aktive Störungen im Boden, an denen bei früheren Beben Verwerfungen stattgefunden haben. Dabei können sie feststellen, wie weit die benachbarten Schichten gegeneinander verschoben wurden und wann das geschah.

In Gebieten, die weit von Platten-  
grenzen entfernt liegen, funktioniert die-

se Methode allerdings nicht sehr gut; denn dort sind Brüche an der Oberfläche selten und schwierig auszumachen. Hier sucht man besser nach Zeugnissen der Erschütterung statt nach dem ursprünglichen Bruch.

Zum Glück für die Paläoseismologen gibt es viele Sekundäreffekte, wenn die Erde bebt: Stalaktiten in Höhlen können abbrechen, frei stehende Felsblöcke umkippen, steile Hänge ins Rutschen geraten und sandige Böden wie eine Flüssigkeit fließen. Für manche dieser Vorkommnisse sind aber auch andere Ursachen denkbar. So kann ein Stalaktit unter seinem eigenen Gewicht abbrechen oder Starkregen einen Erdbeben auslösen. Hauptaufgabe der Paläoseismologen ist es darum, die Zeichen richtig zu deuten und alternative Erklärungen auszuschließen. Sobald ein seismisches Ereignis dann als Ursache feststeht, ist der nächste Schritt, die von ihm hinterlassenen Strukturen zu datieren.

**Archiv im Untergrund**

Geologen sind sich einig, dass die Ablagerungen am Boden stehender Gewässer eine Fundgrube für Informationen über Umweltbedingungen in der Vergangenheit sind. Glücklicherweise ist die Schweiz für ihre vielen malerischen Seen bekannt. Darin setzen sich kontinuierlich, Jahr für Jahr, Schwebstoffe und an-

dere Sedimente ab. Sie bilden ein vollständiges und oft äußerst detailliertes Archiv der Ereignisse seit der Entstehung des Gewässers.

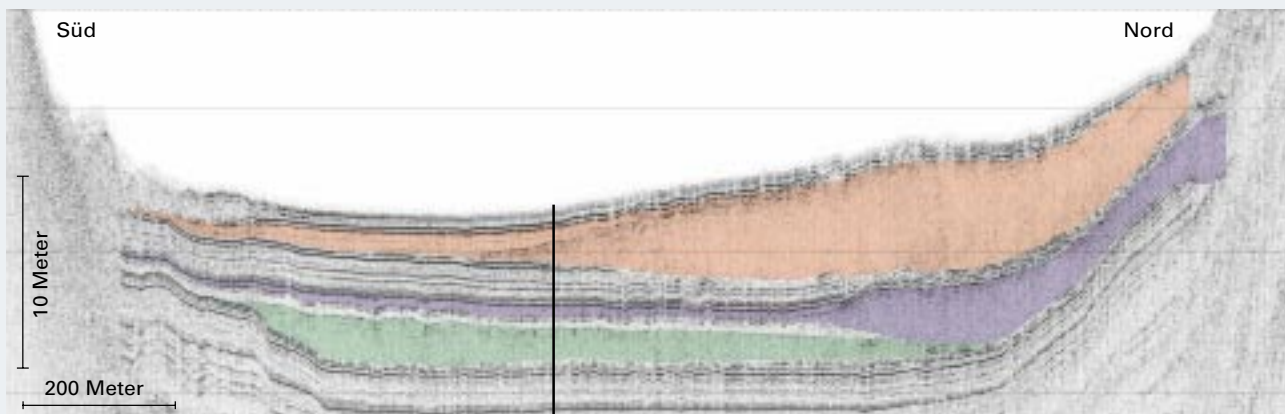
In den von uns untersuchten Bereichen des Vierwaldstättersees häuft sich etwas weniger als ein Millimeter Sediment pro Jahr an – und das seit etwa 15 000 Jahren, als sich gegen Ende der Eiszeit die Gletscher zurückzogen. Die Zusammensetzung des Materials spiegelt in hohem Maße die örtlichen Bedingungen zur Zeit der Ablagerung wider. Zum Beispiel setzen sich Pollen, die in den See geweht wurden, am schlammigen Boden ab und dokumentieren so Änderungen der Vegetation im Umland. Grobkörnige Schichten zeugen dagegen von Zeiten, als Hochwässer sandigen Gesteinsschutt heranschwemmten.

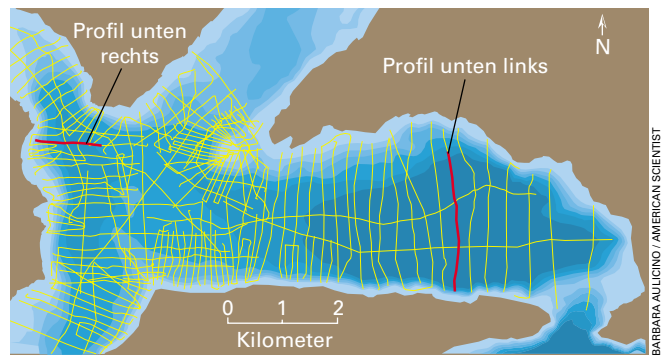
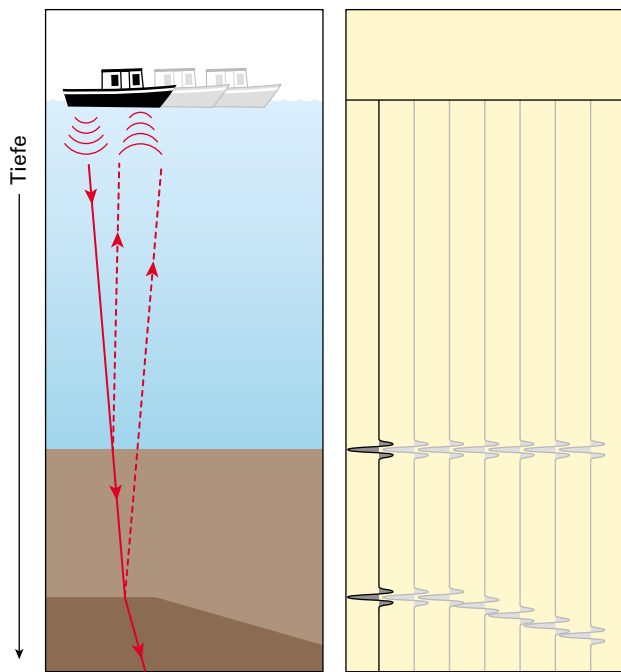
Auch Erdbeben können bleibende Spuren am Grund von Seen – oder Ozeanen – hinterlassen; denn die Erschütterung des Bodens bewirkt oft, dass sich an Unterwasserhängen Sedimente lösen und lawinenartig abrutschen. Das berühmteste Beispiel ist wahrscheinlich das Grand-Banks-Erdbeben aus dem Jahre 1929. Es hatte eine Stärke von 7,2 auf der Richterskala und verursachte eine gewaltige Rutschung am Meeresgrund vor Neufundland. Der plötzlich den Kontinentalhang hinabgleitende Sedimentstrom – eine gewaltige, breiige Schlammwalze – zerriss

**Durchleuchtung des Seebodens**

**Bestimmte Ablagerungen** (farbige Flächen) in diesen reflexionsseismischen Profilen (Positionen siehe Zeichnung rechts oben) zeugen von Rutschungen an Abhängen am Seeboden. Ihr Erscheinungsbild ähnelt dem Rauschen auf einem gestörten Fernsehschirm und hebt sich deutlich von dem der umgebenden, geschichteten Sedimente ab, die ein Muster aus streng

parallelen hellen und dunklen Streifen bilden. Nur ein einziges Erdbeben hat in beiden Profilen zugleich Spuren hinterlassen (violette Flächen), und ein Rutschkörper (grüne Fläche) stammt vermutlich nicht von einem Erdstoß. Die schwarze senkrechte Linie im Diagramm unten zeigt an, wo ein Bohrkern zur Datierung der weggebrochenen Sedimente gezogen wurde.





Mit reflexionsseismischen Messungen durchleuchteten die Autoren den Boden des Vierwaldstättersees. Dabei sendete ein akustischer Wandler, der am Rumpf eines sich langsam bewegenden Forschungsboots befestigt war, in regelmäßigen Abständen Schallsignale aus und registrierte die Echos von den diversen Schichten im Boden (ganz links). Daraus ließ sich ein Abbild der inneren Struktur der Sedimente am Seegrund gewinnen (links). Auf diese Weise legten die Autoren über den Westteil des Sees ein dichtes Netz seismischer Profile mit einer Gesamtlänge von etwa 300 Kilometern (oben).

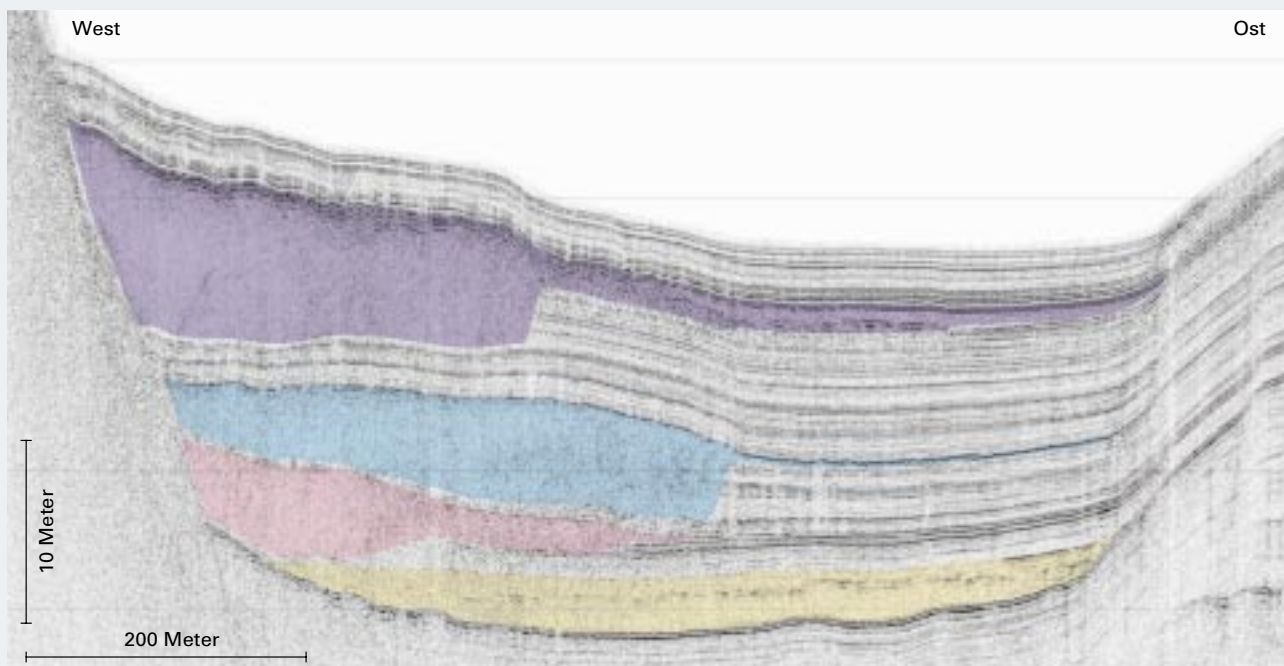
nacheinander mehrere untermeerische Telefonkabel und unterbrach so Teile der transatlantischen Kommunikation.

In Kenntnis solcher Ereignisse vermuteten wir, dass auch die Sedimente am Boden Schweizer Seen Spuren einstiger seismischer Erschütterungen bergen sollten. Für die Probe aufs Exempel wählten wir den Vierwaldstättersee, der in Cysats Bericht über das Erdbeben von 1601 eine so große Rolle spielt. Es kostete uns eine Menge Gelände- und Laborarbeit, die Tiefen dieses Gewässers im Detail zu ergründen. Doch als Ergebnis

konnten wir schließlich am Seegrund die Spuren des Erdbebens von 1601 und vier bisher unbekannter prähistorischer Erdbeben dokumentieren.

Bei der Ausarbeitung unseres Forschungsprogramms war Cysats Bericht von unschätzbarem Wert. Am Morgen nach dem Erdbeben ritt er zusammen mit weiteren Würdenträgern der Stadt am Seeufer entlang, um den Schaden zu begutachten. In bewegten Worten beschrieb er das allgemeine Durcheinander (in hochdeutscher Übertragung): »Wir sahen Schiffe, Bauholz, Planken,

Schilfrohr und anderes Material, das nicht nur im See schwamm, sondern auch fünfzig Schritte von der normalen Wasserlinie entfernt und bis zu zwei Hellebarden [drei bis vier Meter] hoch ans Gestade geworfen worden war ... Näher bei der Stadt beobachteten wir Leute, die ans Ufer gespülte Fische aufblasen ... In Luzern waren die Schiffe vom Pier gerissen und ohne Menschenhand, Wind, Ruder oder Segel weit in den See hinausgetrieben worden ... Die Reuss [der Abfluss des Vierwaldstättersees] floss sechsmal in der Stunde vor und zurück.«

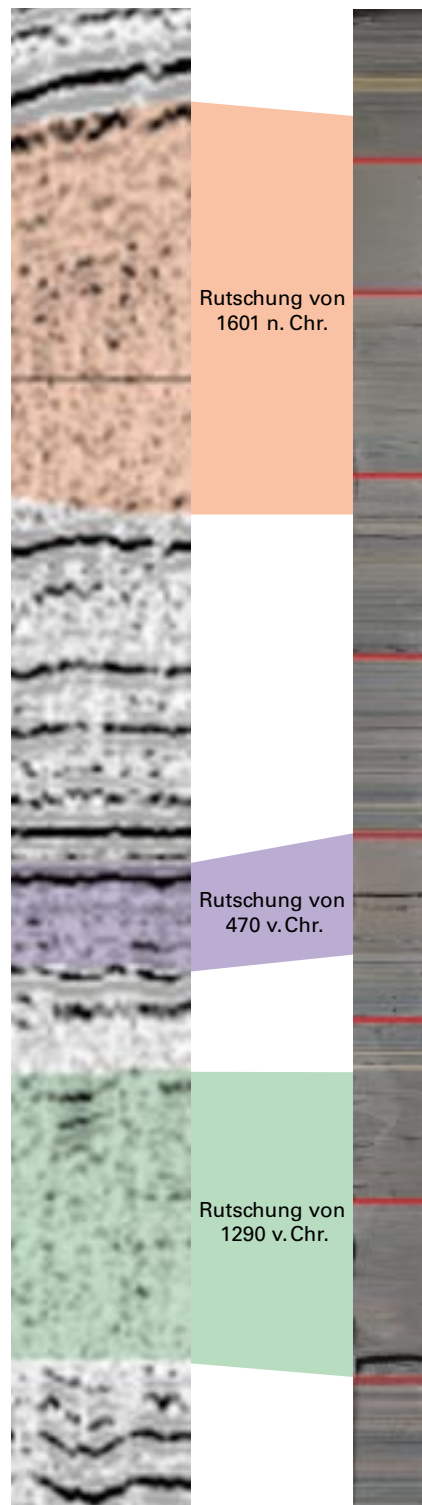


▷ Cysat notierte weiter, dass das Wasser aus dem Fluss, der die Stadt in zwei Hälften teilt, mehrfach fast vollständig verschwand, so »das man (also ze reden) schier trochens fuosses von dem büchsenhuss zuo den mülinen herüber hette gan mögen, wie es dann etliche junge lüt zur gedächtnuss söllent gethan haben«. Außerdem seien Erhebungen am Seeboden, die man bei niedrigem Wasserstand sehen und mit Stangen erreichen konnte, auseinander gerissen und in die Tiefe gezogen worden. Wiesenstücke befänden sich mehr als einen Steinwurf weit von ihrer ursprünglichen Position entfernt, und tiefe Spalten hätten sich im Boden aufgetan.

Dieser Bericht bestärkte uns in der Annahme, dass die dramatischen Ereignisse bleibende Spuren auf dem Boden des Sees hinterlassen haben müssten. Wir waren dessen sogar ziemlich sicher, weil zu Beginn der 1980er Jahre Mitglieder des Limnogeologie-Labors an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich zwei große Rutschkörper am Boden des Sees entdeckt hatten – die Folge von Unterwasser-Schlammlawinen, als deren Ursache die Forscher das Erdbeben von 1601 vermuteten.

Schon bald nachdem eine von uns (McKenzie) im Jahr 1996 das Limnogeologie-Labor übernommen hatte, verfolgten sie und ein anderer Autor (Anselmetti) diese Spur weiter. Dabei fanden sie im Vierwaldstättersee zahlreiche Ablagerungen von Schlammlawinen, viele davon tiefer und damit älter als die von 1601. Die tiefsten reichten offenbar bis weit in die vorgeschichtliche Zeit zurück. Wenn man also durch Erdbeben ausgelöste Rutschungen von solchen unterscheiden könnte, die andere Ursachen hatten, sollten diese alten Seesedimente die regionale Geschichte schwerer seismischer Erschütterungen in den vergangenen 15 000 Jahren erzählen.

Zur selben Zeit suchte ein anderer von uns (Giardini), Direktor des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED), nach genau einem solchen langfristigen Erdbebenkatalog. Da es zu seinen Aufgaben gehörte, das Erdbebenrisiko für das Alpenland einzuschätzen, wollte er wissen, wo, wann und wie oft dort starke seismische Erschütterungen stattgefunden hatten. Als Anselmetti ihm von den Funden im Vierwaldstättersee berichtete, erkannte Giardini darin sogleich mögliche Zeugen bislang unbekannter Erdbeben in



◀ Das Foto der aneinander gereihten Stücke eines Bohrkerns (rechts) und das zugehörige reflexionsseismische Profil stimmen gut überein. Der Bohrkern bestätigt also die Interpretation der seismischen Ergebnisse. Zudem lieferte er organisches Material für die Datierung. Die eingefärbten Schichten gehören zu Rutschungen von 1601 n. Chr., 470 v. Chr. und 1290 v. Chr. Letztere wurde vermutlich nicht von einem Erdstoß ausgelöst.

Mine zurückgekehrt war. Anselmetti überzeugte ihn während einer Schifffahrt über den Vierwaldstättersee, mit ins Boot zu kommen und zu helfen, die Geheimnisse in den Tiefen des Sees zu lüften. Die Aussicht, die kommenden Jahre damit zu verbringen, auf dem malerischen Vierwaldstättersee zu schippern, anstatt Staub in einer weit entfernten Borax-Mine einzatmen, machte Schnellmann die Entscheidung letztlich leicht.

**Dichtes Netz seismischer Profile**

Im Juni 2001 überführten Schnellmann und Anselmetti also das Forschungsboot MS Tethys der ETH Zürich zum Vierwaldstättersee und begannen mit der reflexionsseismischen Untersuchung der Bodensedimente. Diese Methode ähnelt der in der Medizin angewandten Sonografie: Genau wie Ärzte per Ultraschall einen Blick in den menschlichen Körper werfen, können Geologen die innere Struktur der Sedimente am Grund des Sees sichtbar machen, indem sie Schallwellen von der Oberfläche hinabsenden und das schwache Echo aufzeichnen, das wenig später zurückkommt.

In diesem Fall ist der akustische Wandler (der wie ein Lautsprecher und ein Mikrofon in einem funktioniert) am Bootsrumph angebracht, von wo er ein Schallsignal ins Wasser sendet. Es wird vom Seeboden und von den unterschiedlichen Sedimentschichten im Untergrund jeweils partiell zurückgeworfen. Diese Echos enthalten folglich Informationen über die Struktur der Ablagerungen. Sie werden von demselben akustischen Wandler aufgefangen und an Bord des Forschungsboots gespeichert. Zurück im Labor lässt sich daraus dann ein quasidreidimensionales Bild von den Sedimenten am Boden ableiten.

Während vieler Tage auf dem Schiff erfassten wir reflexionsseismische Daten über eine Gesamtstrecke von mehr als

der fernen Vergangenheit der Zentral-schweiz. Damit begann eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Schweizerischen Erdbebendienst und dem Limnogeologie-Labor der ETH Zürich.

Nachdem McKenzie, Anselmetti und Giardini Ziel und Strategie ihres Forschungsprojekts ausgearbeitet hatten, mussten sie nur noch einen Doktoranden finden, von dem sie hofften, dass er die Hauptarbeit verrichten würde. So wandten sie sich an einen weiteren von uns (Schnellmann), der gerade von einem Praktikum in einer türkischen Borax-

300 Kilometern. Der Vierwaldstättersee besteht aus mehreren Becken. Mit einem Zickzackkurs legten wir ein dichtes Netz seismischer Profile über einige davon. Solche mit angrenzenden Flussdeltas ließen wir absichtlich aus, weil dort, wie wir wussten, wegen der hohen Geschlebefracht der Flüsse Rutschungen vorkommen, die nichts mit Erdbeben zu tun haben.

Am Ende wurden wir für die Mühe reichlich belohnt: Bei der akribischen Sichtung unserer Aufnahmen entdeckten wir viele Belege für Bodenbewegungen unter Wasser – seien es Abrissnarben an Hängen, die anzeigten, wo große Materialmengen weggebrochen waren, oder lawinenkegelartige Ablagerungen am Fuß der Abhänge, wo sich die abgerutschten Schlammmassen angesammelt hatten. Solche Akkumulationen sind in den seismischen Profilen leicht erkennbar, weil normale, ungestörte Seesedimente eine klare horizontale Schichtung aufweisen, während die stark deformierten und zerscherten Rutschkörper als chaotische Bereiche erscheinen, ähnlich dem Rauschen auf einem Fernsehschirm, wenn man das Antennenkabel herauszieht.

Da wir Dutzende eng benachbarter Profile zur Hand hatten, war es leicht, auffällige Schichten zu verfolgen und die Ausmaße der Schuttkegel von einzelnen Hangrutschungen über den von uns aufgenommenen Abschnitt des Gewässers hinweg zu ermitteln. Dabei erkannten wir, dass sich viele der von uns entdeckten Ablagerungen in genau demselben

Niveau befanden wie diejenigen, die das frühere Forscherteam der ETH Zürich schon gefunden und mit dem Erdbeben von 1601 in Verbindung gebracht hatte.

Tatsächlich enthält der Horizont, der diesem Ereignis entspricht, mindestens dreizehn ausgedehnte Schuttkegel. Das damalige Beben löste demnach überall im See Schlammlawinen aus. Außerdem stellten wir fest, dass im Zentrum zweier deutlich voneinander getrennter Teilbecken direkt auf den Rutschkörpern jeweils eine bis zu zwei Meter dicke Schicht aus homogenem Schlamm lagert. Sie besteht zweifelsohne aus Material, das durch die Rutschungen und damit verbundenen Wasserbewegungen aufgewirbelt wurde und sich schließlich im tiefsten Teil der Becken absetzte.

### Spuren prähistorischer Erdbeben

Wir waren sicher, dass vorgeschichtliche Erdbeben gleicher oder größerer Stärke als das von 1601 ähnliche Ablagerungen hinterlassen haben müssten. Deshalb suchten wir die seismischen Profile gezielt danach ab. Schon bald entdeckten wir etwa drei Meter unter dem Seeboden einen Horizont, der insgesamt sechzehn Rutschkörper enthält. Auch diese sind in drei verschiedenen Subbecken von mächtigen, homogenen Schlammpaketen bedeckt. Allem Anschein nach hatten wir die Hinterlassenschaft eines starken prähistorischen Erdbebens vor uns.

Zunächst blieben zwar leise Zweifel, ob es nicht vielleicht doch eine banalere Erklärung für all diese Rutschungen

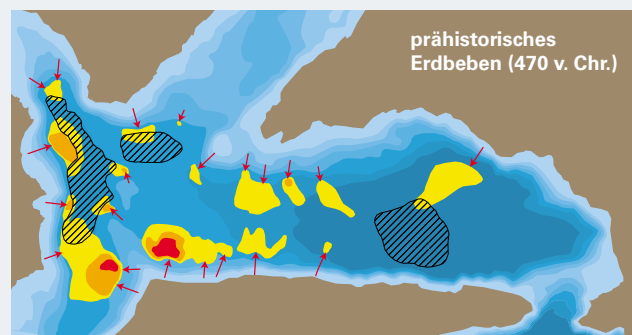
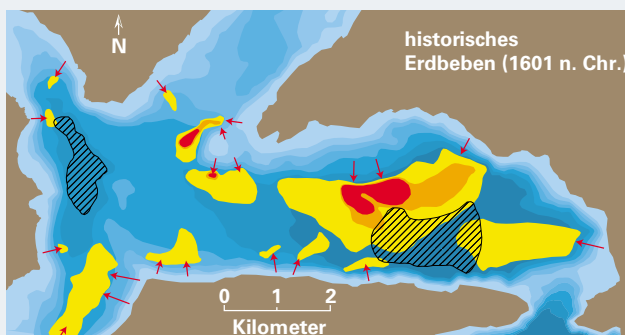
gäbe. Dann aber machten wir eine Beobachtung, die uns zuversichtlich stimmte, dass ausschließlich ein Erdbeben als Auslöser in Frage kam: Überreste dieser alten Schlammrutschungen fanden sich nicht allein am Fuß der ufernahen Böschungen, sondern auch in der Nähe zweier Erhebungen im Wasser, von denen eine nur bis etwa 85 Meter unter dem Seespiegel reicht. Man kann sich zur Not vorstellen, dass gewöhnlichere Ereignisse wie hoher Wellengang im sturmgepeitschten See oder größere Überschwemmungen Rutschungen am Rand des Gewässers auslösen. Doch Hänge am Seegrund weitab vom Ufer und 85 Meter tief unter Wasser würden dadurch nicht instabil.

Die weitere Analyse unserer seismischen Profile ergab rasch Hinweise auf drei weitere prähistorische Beben einer Stärke, die ausreichte, Mehrfachrutschungen auszulösen. Doch wie heftig waren diese Erdstöße wirklich? Das blieb schwierig zu beantworten. Zwar möchte man intuitiv annehmen, dass sich die Stärke eines Bebens daraus ablesen lässt, wie viel Sediment verlagert wurde. Dagegen spricht jedoch ein irritierender Befund: Der größte Rutschkörper, auf den wir bei unseren Untersuchungen stießen, muss trotz der etwa 17 Millionen Kubikmeter Schlamm, die er enthält, bei einem sehr schwachen Erdstoß entstanden sein – oder vielleicht eine völlig andere Ursache gehabt haben. Diese gewaltige Rutschung war nämlich ein singuläres Ereignis; nirgendwo im See fand sich im selben Niveau ein Gegenstück. ▷

## Rutschungen unter Wasser

**Beim historischen Erdbeben von 1601** (links) bildeten sich viele Rutschkörper, deren Mächtigkeit von weniger als fünf (gelb) bis hin zu mehr als zehn Metern (rot) reichte. In den tiefsten Abschnitten des Sees sind sie von einer dicken Schlammschicht bedeckt (Schraffur) – aufgewühltes Material, das sich absetzte,

nachdem der See sich wieder beruhigt hatte. Eine ähnliche, aber ältere Serie von Sedimenten (rechts) zeugt von einem prähistorischen Beben, das gleichfalls Rutschkörper am Fuß diverser Unterwasserhänge hinterließ (Pfeile) – darunter einige an Erhebungen, die weit vom Ufer entfernt liegen.



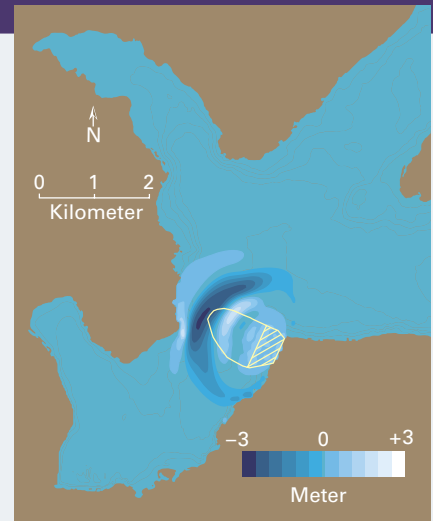
## Simulation der Tsunamiwellen

**Für einen Abbruch am Seeufer** (schraffierter Bereich) und den daraus resultierenden Rutschkörper (gelbe Umrisslinie), der beim Erdbeben 470 v. Chr. entstand, simulierten die Autoren im Computermodell die resultierende tsunamiartige Woge. Diese weist im Unterschied zu normalen, vom Wind aufgeworfenen Wellen die enorme Wellenlänge von fast einem Kilometer auf und ist sehr hoch: Eine Minute nach dem Abbrechen des Seeufers beträgt die Amplitude fast drei Meter (links).

In dieser Zeit hat die Welle bereits ungefähr zwei Kilometer zurückgelegt –

was der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen in der Schweiz entspricht – und sich in zwei der Arme des Vierwaldstättersees hinein ausgebreitet (Mitte). Drei Minuten nach dem simulierten Beginn beschränkt sich der größte Teil der Unruhe dann auf den Nordwestrand des Gewässers (rechts).

**In Wirklichkeit müssen** die zahlreichen Rutschungen, die sich an verschiedenen Stellen im See ereigneten, mehrere Wellen dieses Typs ausgelöst haben, die sich überlagerten – ein wahrhaft Furcht einflößender Anblick.



▷ Obwohl sich die Intensität dieser Beben also nicht quantitativ bestimmen lässt, können wir davon ausgehen, dass sie recht heftig waren. Immerhin gab es in der Zentralschweiz im vergangenen Jahrhundert viele schwächere Erdstöße – darunter eine Hand voll der Stärke 5 oder mehr. Doch keiner verursachte Mehrfachrutschungen in unserem Untersuchungsgebiet. Unsere seismischen Profile spiegeln also mit ziemlicher Sicherheit starke Erdbeben wider.

Aber wann fanden sie statt? Diese Frage erwies sich als leichter zu beantworten. Allerdings mussten wir dafür noch einmal auf den See hinaus. Zur Datierung der verschiedenen Rutschkörper galt es, Proben daraus zu entnehmen – keine einfache Sache bei Sedimenten, die mehrere Meter unter dem Boden eines etwa 150 Meter tiefen Gewässers begraben sind.

Wir lösten die Aufgabe mit einem kleinen Ponton-Boot – eigentlich nur ein Floß – sowie einem speziellen Instrument namens Kullenberg-Kerngerät: in unserem Fall ein zwölf Meter langes Stahlrohr mit einem 300 Kilogramm schweren Bleigewicht am oberen Ende. Dieses unhandliche Gerät befestigten wir an einem Stahlkabel und senkten es mit einer kräftigen Winde langsam ab.

Sobald sich der Bohrer mit seiner Spitze nur noch zehn Meter über dem Seeboden befand, gab ihn ein Auslösemechanismus frei, sodass er das letzte Stück frei fiel. Die ohnehin schon schwere Sonde drang, vom Bleigewicht zusätzlich getrieben, dann tief in die Sedimentschicht ein und füllte sich mit Schlamm. Eine Art Schnappverschluss am unteren und ein

Vakuum am oberen Ende des Kernrohrs verhinderten, dass das erbohrte Material wieder herausrutschte, während wir das Rohr schließlich mühsam hochhievten.

Uns an unseren zahlreichen seismischen Profilen orientierend, zogen wir Proben aus verschiedenen Rutschkörpern sowie aus ungestörten Ablagerungen. Nach sieben Tagen harter und manchmal schmutziger Arbeit kehrten wir mit acht Sedimentbohrkernen aus zwei verschiedenen Subbecken – jeder acht bis zehn Meter lang – in unser Labor in Zürich zurück. Dort inspizierten wir die Beute.

### Zeitreise in die Vergangenheit

Das Öffnen der Rohre und Zerteilen der Kerne ist stets ein spannender Moment. Auch diesmal wurden wir nicht enttäuscht. Es war wie eine Zeitreise zurück in die Vergangenheit, auf die uns die Ablagerungen entführten. Sie offenbarten Klimaschwankungen und Veränderungen der örtlichen Vegetation, lieferten den greifbaren Beweis für alte Hochwässer – und natürlich für Erdbeben. Diese verrieten sich durch charakteristische Pakete aus chaotisch gefaltetem Material und darüber liegender Schicht homogenen Schlammes, die sich deutlich von den sauber horizontal geschichteten Ablagerungen anderswo im Bohrkern abhoben.

Um das Alter der Rutschkörper zu ermitteln, entnahmen wir Blätter und kleine Holzstücke aus dem ungestörten Sediment direkt darüber – organisches Material, das sich mit Hilfe der Radiokarbonmethode datieren ließ. Weitere Zeitmarken lieferten zwei Schichten vulkanischer Asche, die wir in den Ablage-

rungen fanden. Es gelang uns, sie mit prähistorischen Vulkanausbrüchen in der Eifel und im französischen Zentralmassiv in Verbindung zu bringen. Durch Kombination all dieser Daten konnten wir schließlich das Alter der Rutschkörper ziemlich genau eingrenzen. Demnach fanden die vier Erdbeben, bei denen sie entstanden, vor ungefähr 2470, 9820, 13 960 und 14 610 Jahren statt.

Dadurch kam eine lange Historie starker Erdbeben in diesem Gebiet ans Licht. Doch eine wichtige Frage blieb offen: Warum schwappte bei dem Ereignis von 1601 der See gleichsam hin und her, wie Cysat das in seinem Bericht schildert? Können Schlammrutschungen der von uns beobachteten Größenordnung so viel Wasser verlagern, dass bis zu vier Meter hohe Wellen entstehen? Und geht von diesen eine ernsthafte Gefahr für die Ortschaften am Seeufer aus?

Auf der Suche nach Antworten wandten sich Schnellmann und Anselmetti an einen weiteren von uns (Ward), den sie als Experten für die Simulation von Tsunamis kannten. Das sind verheerende, langwellige Wogen, die im Allgemeinen bei der plötzlichen Umlagerung großer Mengen Sediment am Grund eines Gewässers entstehen. Ihr Auftreten im Meer ist relativ gut erforscht. Über ähnliche Wasserbewegungen in Seen gibt es dagegen kaum Untersuchungen.

Per Computersimulation suchten wir also herauszufinden, ob und wie von Erdbeben ausgelöste Massenbewegungen im Vierwaldstättersee gefährlich hohe Wellen erzeugen können. Für die Modellierung wählten wir eine der Unterwasser-



BARBARA ALLICINO / AMERICAN SCIENTIST

rutschungen vor 2470 Jahren; denn für sie ließen sich die Abrisskante, die Bahn des weggebrochenen Materials sowie die Geometrie des resultierenden Schuttkegels besonders gut kartieren – Informationen, die für die Rekonstruktion des Vorgangs nötig sind. Gemäß unseren reflexionsseismischen Daten hinterließ die Rutschung am Rand des Sees eine neun Meter tiefe Narbe, verlagerte so viel Sediment, wie in einen riesigen Würfel von hundert Meter Kantenlänge passt, und transportierte das Material bis zu 1,5 Kilometer weit (in Luftlinie gemessen).

Mit diesen Vorgaben lieferte die Simulation tatsächlich mehr als drei Meter hohe Wogen, die schon nach einer Minute auf das gegenüberliegende Ufer trafen. Mit Wellenlängen von mehr als einem Kilometer unterschieden sie sich völlig von den normalen Oberflächenwellen, die der Wind hervorruft. Vielmehr ähnelten sie Wasserbergen, die sich im Zentrum der Subbecken auftürmten – genau wie die Augenzeugen des Erdbebens von 1601 das beobachtet und beschrieben hatten. Man stelle sich den aufgewühlten Zustand des Sees damals vor, als an verschiedenen Stellen an seinem Rand gleichzeitig große Sedimentpakete abrutschten und die resultierenden Tsunamiwellen sich überlagerten und aufschaukelten. Der Anblick der gewaltigen, hin- und herrollenden Wogen muss wahrlich Furcht einflößend gewesen sein.

Laut Bericht von Cysat kehrte sich die Strömung am Abfluss des Sees mehrfach um: Sechsmal in einer Stunde soll die Reuss vor- und zurückgeflossen sein. Demnach wechselte das Wasser etwa alle

fünf Minuten die Strömungsrichtung. Auf den ersten Blick scheint das dem Ergebnis der Simulation zu widersprechen, die für die virtuellen Tsunamis eine Periode von nur knapp einer Minute ergab.

### Gigantische Wasserschaukel

Wir vermuten jedoch, dass die im Takt von zehn Minuten auftretenden Oszillationen des Seespiegels erst mit einiger Verzögerung einsetzen, als das im See hin- und herschwappende Wasser in Resonanz geriet. Solche Schaukelbewegungen in großen Wasserkörpern heißen nach einem französischen Wort Seiches. Ihre Periode hängt von der Geometrie des Beckens ab. Wind und Luftdruckänderungen können ähnliche Oszillationen verursachen, allerdings mit niedrigeren Amplituden. Sie wurden im Vierwaldstättersee erstmals Ende des 19. Jahrhunderts untersucht und erfolgen dort im Zehn-Minuten-Takt; außerdem gibt es zwei längere Oszillationsperioden. Dass von Rutschungen ausgelöste Seiches die gleiche Schwingungsdauer aufweisen, erscheint plausibel.

Obwohl unsere Untersuchung viel zum Verständnis des Ereignisses von 1601 beitrug und – was weitaus wichtiger ist – die prinzipielle Eignung von Seesedimenten als prähistorische Seismografen unter Beweis stellte, bleibt noch viel zu erkunden. So genügt ein See nicht, die Epizentren und Stärken einstiger Erdbeben mit dieser Methode abzuschätzen. Dazu bedarf es mehr als eines einzigen Paläoseismografen. Zum Glück gibt es in der Zentralschweiz ein ganzes Netz davon – in Gestalt der zahllosen Seen, die als unab-

hängige »Aufnahmegereäte« fungieren. Da aber jeder auf Erschütterungen etwas anders reagiert, muss die Auswirkung von Erdstößen auf ein bestimmtes Gewässer jeweils anhand historischer Ereignisse gecheckt werden. In Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst haben sich Mitglieder der Limnogeologie-Gruppe der ETH Zürich jetzt vier kleinere Seen in der Umgebung des Vierwaldstättersees vorgenommen und suchen darin nach Spuren historischer und prähistorischer Beben. Vom Vergleich der Daten einschließlich der unsrigen erhoffen sie sich verlässliche Aufschlüsse über die Epizentren und Stärken dieser Erschütterungen.

Renward Cysat hat sich bestimmt nicht träumen lassen, dass sein Bericht, vier Jahrhunderte nachdem die Tinte getrocknet war, die Grundlage einer seismologischen Untersuchung bilden würde, die nicht nur das von ihm geschilderte Ereignis näher beleuchtet, sondern auch ältere Erdbeben in der Zentralschweiz aufgedeckt hat. Andererseits wäre er vielleicht auch gar nicht so erstaunt darüber gewesen. Nach allem, was er von den Nachwirkungen des Erdbebens sah, mag er durchaus eine dunkle Ahnung gehabt haben, dass ein aufgewühlter See als ein Messgerät für die Stärke der Erschütterung dienen könnte – das Beste, das es damals für diesen Zweck gab. ◁

**Michael Schnellmann** hat gerade seine Promotion in Geologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) abgeschlossen. **Flavio S. Anselmetti**, sein Doktorvater, leitet dort das Limnogeologie-Labor, während **Domenico Giardini** Professor für Seismologie und Geodynamik sowie Direktor des Schweizerischen Erdbebendienstes ist. **Judith A. McKenzie** hat eine Professur für geologische Kreisläufe und Erdsystem-Modellierungen an der ETH inne. **Steven N. Ward** forscht an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz über Themen aus theoretischer Seismologie und Geophysik.

© American Scientist Magazine  
([www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org))

Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. Von M. Schnellmann et al. in: *Geology*, Bd. 30, S. 1131 (2002)

Landslide tsunami. Von S. N. Ward in: *Journal of Geophysical Research*, Bd. 106, S. 11201 (2001)

Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. Von C. W. Siegenthaler et al. in: *Eclogae Geologicae Helvetiae*, Bd. 80, S. 241 (1987)

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