

Im Dezember 2004 entstand nach einem schweren Erdbeben im Indischen Ozean eine meterhohe Riesenwelle, die mehrere Hunderttausend Todesopfer forderte. Dieser Tsunami traf die Menschen unvorbereitet. Seit jeher versucht die Wissenschaft, zuverlässige Frühwarnsysteme für Erdbeben, Vulkanausbrüche, Tsunamis und andere Naturkatastrophen zu entwickeln. Auch LMU-Forscher sind mit gutem Grund daran beteiligt – die nächste Katastrophe kommt mit Sicherheit und könnte noch weit größere Auswirkungen haben.

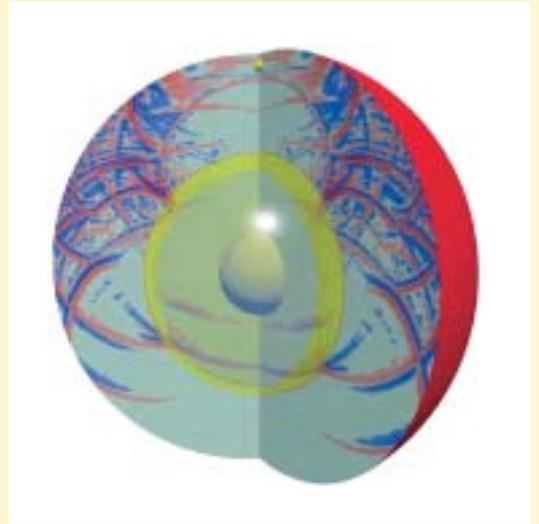
SUSANNE WEDLICH

## DIE GEFAHREN DER ELEMENTE

**W**o Feuer und Wasser zusammenkommen, leben Menschen gefährlich. Auf Island beispielsweise sind einige Vulkane von Gletschern bedeckt. Kommt es zu einer Eruption unter der Eisschicht, können riesige Mengen Schmelzwasser entstehen, die sich als gewaltige Gletscherläufe ihre Bahn suchen. Dr. Ulrich Münzer vom Department für Geo- und Umweltwissenschaften erforscht seit über zehn Jahren die vulkanische Zone Islands. Dabei greifen er und sein Team bei der Überwachung der gefährdeten Gebiete auf Daten zurück, die unter anderem von Fernerkundungssatelliten der europäischen Weltraumorganisation ESA aufgezeichnet wurden. „Bei einem subglazialen Ausbruch vor einigen Jahren hat sich unsere Methode des Monitorings aus dem Weltall bereits bewährt“, berichtet Ulrich Münzer. „Wir konnten die unter der Eisdecke stattfindende Eruption einen Tag vor dem Ausbruch erkennen, weil sich die Eruptionsstelle in nahezu voller Länge durch die etwa 400 Meter dicke, aufliegende Eisdecke pauste.“ Unter der bis zu 1000 Meter mächtigen Eisdecke des Vatnajökulls, Europas größtem Gletscher, war die Eruptionspalte Gjálp aufgebrochen. Aufgrund der enormen Wärmeentwicklung schmolz ein Teil des Gletschereises ab. Das Schmelzwasser sammelte sich in der Grímsvötn-Caldera, einem vulkanischen Einsturzkessel. „Der hydrostatische Druck wurde schließlich zu groß, und ein gigantischer Gletscherlauf bahnte sich schlagartig seinen Abfluss“, so Ulrich Münzer. „Innerhalb von nur zwei Tagen bewegten sich etwa 3,4 Kubikkilometer Schmelzwasser auf die isländische Küste zu – bei einem maximalen Abfluss von 53.000 Kubikmeter pro Sekunde.“ Die gewaltige Flutwelle zerstörte Brücken, etwa zehn Kilometer der Küstenstraße sowie die Überlandleitung.

Im letzten Jahr gelang es dem Team um den Geologen, einen Vulkanausbruch mit Hilfe der Satellitendaten vorherzusagen – 35 Stunden vor der eigentlichen Eruption. Mit Hilfe hochauflösender Radarbilder des Umweltsatelliten ENVISAT kündigten die Wissenschaftler am 31. Oktober 2004 die Eruption des Vulkans Grímsvötn an, die schließlich am 1. November tatsächlich erfolgte. Der Ausbruch konnte Dank der Satellitendaten schrittweise nachgezeichnet werden. Der europäische Umweltsatellit ENVISAT umkreist die Erde in etwa 800 Kilometer Höhe auf einem sonnensynchronen, polnahen Orbit. Da es sich um ein aktives Fernerkundungssystem handelt, können unabhängig von Wetter und Beleuchtung Daten von den Testgebieten geliefert werden. Daher eignet sich die Radartechnik besonders gut für ein kontinuierliches Monitoring auf Island mit seinen ungünstigen klimatischen Verhältnissen. „Wir werten die Daten aus und können bei idealen Bedingungen horizontale und vertikale Bewegungsvorgänge im Zentimeterbereich nachweisen“, sagt Ulrich Münzer. „Unser vorrangiges Ziel ist die Erfassung, Identifizierung und Überwachung dynamischer Prozesse und ihrer Folgen auf dem Gebiet des Vulkanismus und der

► Seismisches Wellenfeld im Innern der Erde. Die Wellen laufen in circa 20 Minuten durch den Erdkörper mit Geschwindigkeiten von bis zu 30.000 km/h. Die Wellensimulationen werden auf den Supercomputern des Leibnizrechenzentrums durchgeführt.



Gletscherkunde. Letztlich geht es aber darum, ein Katastrophen-Monitoring aufzubauen, das weltweit zur Anwendung kommen soll.“

Vulkane sind die Ventile des Erdinnern. Die äußerste Schichte der Erde – die Lithospähre – setzt sich zusammen aus mehreren Platten, die die Landmasse und den Ozeanboden bilden. Diese tektonischen Platten schwimmen auf der darunter liegenden Schicht, dem Erdmantel. Dort können sich Schmelzen lösen, die als Magma nach oben steigen und Vulkane bilden.

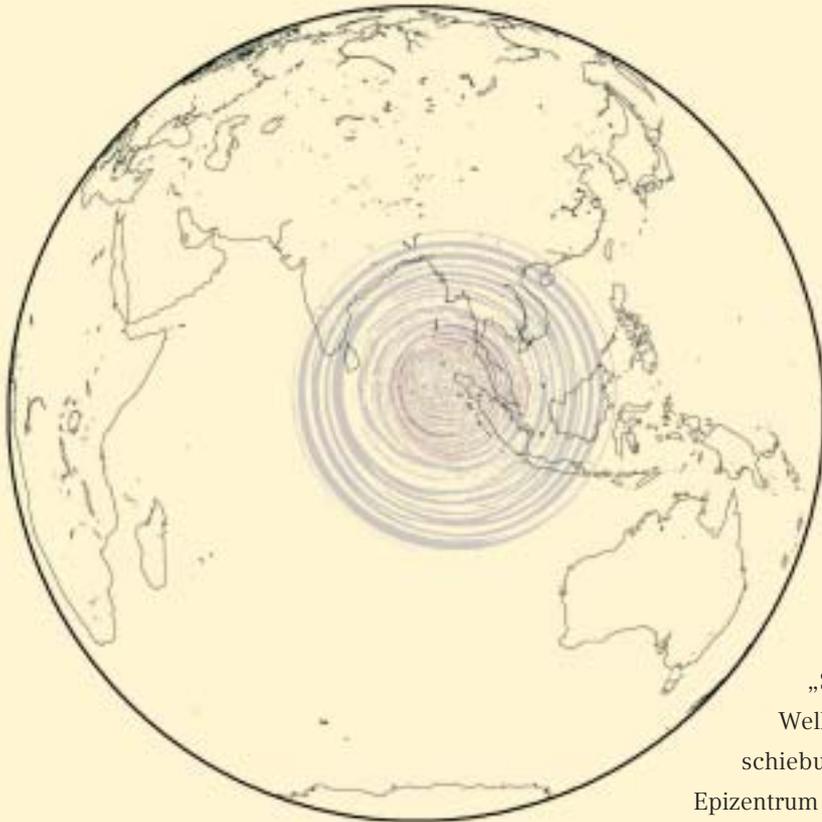
Ob die Vulkane explosionsartig ausbrechen, hängt von der Zusammen-

setzung der Magmen ab. Noch aber sind diese komplexen Vorgänge nicht vollständig verstanden. „Eruptionen kündigen sich in der Regel durch erhöhte seismische Aktivität, also Erdbeben, an“, berichtet Professor Heiner Igel, Department für Geo- und Umweltwissenschaften der LMU. „Nur ein multidisziplinäres Monitoring erlaubt, die Gefahr von Ausbrüchen zu erkennen. Dazu gehört neben der Seismologie unter anderem die Messung von Deformationen des Vulkans. Verändert sich dessen Oberfläche, deutet dies auf unterirdische Aktivität hin. Zusätzlich werden auch ausströmende Gase und die sich bildenden Magmen analysiert.“ Auf Hawaii beispielsweise ist Frühwarnung sehr gut möglich, weil ein exzellentes Monitoringsystem eingerichtet wurde. Außerdem sind die Ausbrüche vergleichsweise gutmütig und die Magmen wenig explosiv. In der Regel strömt die Lava also „nur“ die Bergflanken hinab. Bei anderen Vulkanen dagegen, etwa Vesuv und Ätna, sind die Magmen sehr explosiv. Bei dieser Art von Aktivität kann sogar das gesamte Vulkangebäude weggerissen werden, was außerordentlich schwer vorherzusehen ist.

An der LMU nähert man sich diesen Fragen unter anderem mit Rechenkapazität. „Mit Hilfe von aufwändigen Computersimulationen komplexer Vulkanstrukturen versuchen wir, die seismischen Signale von Vulkanen besser zu verstehen“, so Heiner Igel. „Wir wollen deren Bedeutung für die Eruptivität erkennen.“ Erdbeben und Vulkanismus sind oft eng verknüpft. Nicht nur kündigen Beben in vielen Fällen Eruptionen an, sie können selbst auch durch Vulkan- ausbrüche ausgelöst werden. Beide Phänomene sind untrügliche Anzeichen dafür, dass unser Planet noch lange nicht zur Ruhe gekommen ist. Vor allem die Ränder der tektonischen Platten sind geologisch außerordentlich dynamische Bereiche, weil sie sich nicht immer reibungslos aneinander vorbeibewegen. An manchen Stellen kommt es zur so genannten Subduktion, wobei eine Platte unter ihre Nachbarplatte gezogen wird. Dort finden die stärksten Erdbeben auf unserem Planeten statt.

#### DIE ENTSTEHUNG EINES TSUNAMIS

Durch diesen gewaltsamen Prozess werden starke Spannungen aufgebaut, die sich beispielsweise als Erdbeben entladen können. Passiert dies – oder auch ein Vulkanausbruch – unter Wasser, kann unter bestimmten Umständen ein Tsunami entstehen. Diese Riesenwelle bewegt sich in alle Richtungen und unter Umständen über Tausende von Kilometern fort. Ein Tsunami verliert nur wenig seiner Energie und wird im tiefen Wasser schneller. Trifft er auf seichte Gewässer wie etwa an der Küste, stauen sich die Wassermassen auf und können dann mit vernichtender Energie an Land schlagen. Am 26. Dezember 2004 musste die Welt erfahren, welche katastrophale Auswirkungen das haben kann. Ein Tsunami mit bis zu 30 Metern Höhe traf auf den Küstenstreifen rund um den Indischen Ozean. In den Tagen und Wochen nach der Katastrophe stieg die Zahl der Toten unaufhaltsam an. Mehr als 300.000 Opfer wurden schließlich offiziell festgestellt, wobei die tatsächliche Anzahl wahrscheinlich sehr viel höher liegt. Millionen Menschen blieben verletzt, ohne Obdach und Besitz zurück. Die betroffenen Landstriche waren und sind zum Teil immer noch zerstört.



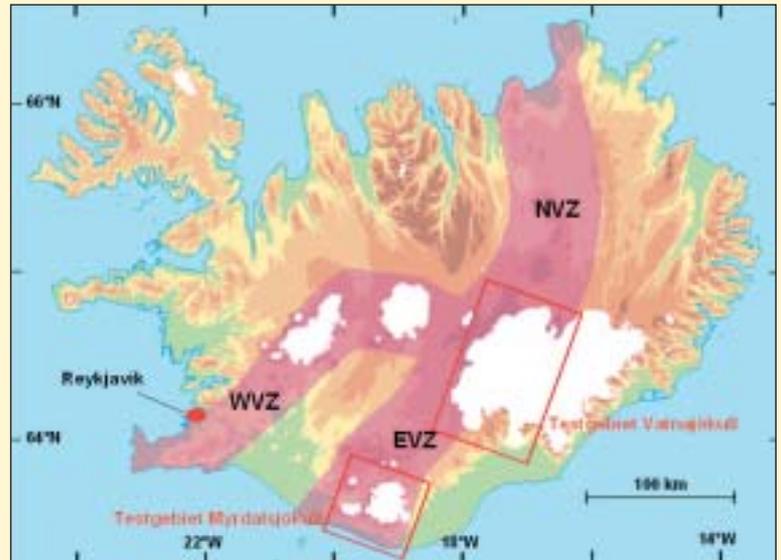
◀ Snapshot einer Computersimulation des Sumatrabebens, welches das Wellenfeld ein paar Minuten nach dem Erdbeben zeigt.

Ausgelöst wurde die Katastrophe durch das zweitstärkste je gemessene Seebeben. Es fand westlich der indonesischen Insel Sumatra statt – mit wahrlich globalem Ausmaß. Die Masse der Erde wurde umverteilt, eine leichte Schwankung der Erdrotation trat auf, und die Tageslänge wurde um etwa drei Mikrosekunden verkürzt. „Das Ereignis regte die ganze Erde zu Eigenschwingungen an, die wochenlang anhielten“, berichtet Heiner Igel. „Sogar hier in Bayern kam es durch seismische Wellen zu 2,5 Zentimetern horizontaler Bodenverschiebung, obwohl wir mehr als 9000 Kilometer vom Epizentrum entfernt sind.“

Die Riesenwellen konnten ungehindert Zerstörung über ganze Landstriche bringen, weil im Indischen Ozean – anders als im Pazifik – kein Frühwarnsystem installiert ist. „Ein Frühwarnsystem für Tsunamis muss als erstes erkennen, dass es sich um ein großes Seebeben handelt oder ein anderes Phänomen, welches Tsunamis anregen kann“, so Heiner Igel. „Daran anschließend muss die Tsunamogenität eines Ereignisses eingeschätzt werden, sodass gegebenenfalls gewarnt werden kann. Frühwarnung bedeutet aber immer, dass das Ereignis bereits stattgefunden hat und unter Umständen wenig Zeit bleibt.“ Bei einem Erdbeben pflanzen sich seismische Wellen vom Erdbebenherd mit Geschwindigkeiten von bis zu 20.000 km/h fort. Nicht aber die zuerst ankommenden, so genannten P-Wellen sind so gefährlich. Den größten Schaden richten die nachkommenden Scher- oder Oberflächenwellen an, die nur etwa halb so schnell sind. Erkennt ein Erdbebennetz nahe der Quelle, dass es sich um ein großes, gefährliches Erdbeben handelt, kann diese Information fast mit Lichtgeschwindigkeit mit elektromagnetischen Wellen weitergeleitet werden. „Wenn man rund 200 Kilometer vom Erdbebenherd entfernt ist, hat man also etwa eine Minute Zeit, um zu erkennen, dass es sich um ein großes Beben handelt, und die Information weiterzugeben“, erklärt Heiner Igel. „Das ist sehr wenig Zeit! Auf diesem Prinzip basieren allerdings zum Beispiel die Frühwarnsysteme in Japan, wo oft wirklich nur ein bis zwei Minuten Zeit bleiben, weil immer wieder große Beben vor der Küste stattfinden. Das reicht aber wenigstens, um zum Beispiel große Gasleitungen abzustellen, Hochgeschwindigkeitszüge anzuhalten und auch kleinere Gebäude zu evakuieren. Größere Gebäude wie Wolkenkratzer sind kurioserweise meistens sicher, weil sie aus Stahlgerüsten gebaut sind und Schwingungen aufnehmen können.“

In den am schlimmsten vom katastrophalen Tsunami betroffenen Gebieten in Indonesien hätte wahrscheinlich auch mit Warnsystem kaum jemand gerettet werden können, weil zu wenig Zeit gewesen wäre. Anders aber ist die Situation in Thailand und im westlichen Indischen Ozean. Zwischen dem Seebeben und dem Auftreffen des Tsunamis lagen mehrere Minuten bis zu mehreren Stunden. Frühwarnsysteme sind also besonders interessant für Länder, die weit weg vom Erdbebenherd sind. Im Pazifik sind das im Grunde alle angrenzenden Staaten, weil auf jeder Seite des Ozeans große Beben möglich sind. Damit hätte jedes Land die Chance auf der davon entgegengesetzten Seite zu liegen. Im Indischen Ozean aber finden die großen Erdbeben fast ausschließlich im östlichen Teil statt. Daher werden die

► Lage der Testgebiete Mýrdalsjökull und Vatnajökull-West mit dem Verlauf der Neovulkanzone durch Island. Die Neovulkanzone ist ein Teil des Mittelatlantischen Rückens und weist deshalb eine sehr hohe seismische und vulkanische Aktivität auf. (WVZ = Western Volcanic Zone; EVZ = Eastern Volcanic Zone; NVZ = Northern Volcanic Zone)



westlichen Bereiche, etwa Indien und die Ostküste Afrikas, am meisten von einem Frühwarnsystem profitieren, sollte es eingerichtet werden. „Hier an der LMU sind wir aber nicht an diesen Aktivitäten beteiligt“, so Heiner Igel. „Wir arbeiten vielmehr an den Möglichkeiten, solch große Beben mit Hilfe von Supercomputern mit größtmöglicher Genauigkeit zu simulieren. So könnten wir deren Auswirkungen im Vorfeld abschätzen. Im Ernstfall wüsste man dann schnell, in welchen Regionen mit größeren Schäden zu rechnen ist. Allerdings ist es noch ein weiter Weg, solche Rechnungen zuverlässig machen zu können.“ In Indonesien wird aber bereits ein in Deutschland entwickeltes und mit Hilfsgeldern finanziertes Tsunami-Frühwarnsystem aufgebaut. Andere Länder der Region sollen diesem Beispiel folgen. In diesem Jahr noch werden die ersten Bojen vor der indonesischen Küste ausgesetzt werden. Sensoren am Ozeanboden, die den Wasserdruck messen, gehören ebenfalls zum System. Tsunamis sollen damit im günstigsten Fall schon kurz nach ihrer Entstehung erfasst werden können. Der Ernstfall könnte bald eintreten.

#### SPANNUNG STEIGT AN DEN RÄNDERN DER BRUCHFLÄCHEN

Denn die Gefahr von Erdbeben und Tsunamis ist nach einer derartigen Katastrophe sogar besonders groß. Das haben zahlreiche Nachbeben in den Wochen nach dem Tsunami und beispielsweise ein großes Beben Ende März 2005 gezeigt. „Ein Erdbeben baut nämlich nicht die ganze vorhandene Spannung ab“, sagt Heiner Igel. „An den Rändern der Bruchflächen steigt sie sogar an. Sie wird dann durch Nachbeben abgebaut, die aber wiederum an ihren Rändern zu Spannungserhöhungen führen. Damit lassen sich Migrationen von Erdbeben erklären, die mehrere Jahre lang anhalten können.“ Starke Nachbeben aus Sumatra sind seit dem 26. Dezember 2004 an der Tagesordnung. „Das Seebeben wird die seismische Aktivität im indonesischen Raum und darüber hinaus noch sehr lange beeinflussen“, meint Heiner Igel. Damit nimmt der Bedarf für Katastrophenfrühwarnsysteme in dieser Region eher noch zu – auch weil potentiell mehr Menschen betroffen sind. Ein entscheidender Faktor ist, dass die gefährdeten Gebiete oft sehr dicht besiedelt sind. Traditionell haben Menschen nahe am Meer gesiedelt, weil es ihre Versorgung beispielsweise durch Fischfang garantiert. Aber auch Vulkane haben ihre besondere Anziehungskraft. Ihre Hänge sind so fruchtbar, dass sich Menschen dort niederlassen. Wo früher aber möglicherweise nur ein paar Dörfer waren, könnten aufgrund des Bevölkerungswachstums und der zunehmenden Siedlungsdichte in Ballungsräumen jetzt schon Tausende leben. „Ein besonderes Risiko tragen immer die Ärmsten“, meint Professor Ray Rees, Lehrstuhlinhaber für Versicherungswissenschaft. „Sie leben in der Regel in den gefährlichsten Gebieten, weil es am billigsten ist. Gerade in Entwicklungsländern können sich viele Leute, die ein hohes Risiko tragen, gar keine Versicherung leisten. Während bei Katastrophen die reichen Länder natürlich höhere Eigentumsverluste hinnehmen müssen, haben die armen Länder mehr Menschenleben zu beklagen.“ Beides macht nach wissenschaftlicher Definition erst eine Katastrophe aus. „Dabei handelt es sich um ein einzelnes Ereignis, das in großem Maßstab Vernichtung von Eigentum und/oder Leben bewirkt“, so Ray Rees. „Erstaunlich ist der relativ geringe Anteil der Schäden, der auch in entwickelten Ländern bei Katastrophen von Versicherungen abgedeckt wird. Denn eigentlich ist eine Versicherung die wichtigste Möglichkeit, die wir haben, um mit unvorhergesehenen Verlusten umzugehen.“ Dennoch werden Katastrophen für die Versicherer

immer wichtiger, weil ihre Häufigkeit zuzunehmen scheint. „Bei einer Katastrophe müssten die Versicherer Reserven haben, die dem maximalen Schaden entsprechen“, meint Ray Rees. „Das ist aber sehr teuer, und die Reserven sind üblicherweise nicht groß genug. Außerdem ist bei Naturkatastrophen oft die ganze Bevölkerung auf einmal betroffen, was das so genannte *risk pooling* verhindert, das sonst die Grundlage einer bezahlbaren Versicherung ist.“

Im Normalfall ist unbekannt, welches Individuum welches Risiko trägt. Es versichern sich mehr Leute, als tatsächlich geschädigt werden. Mit Hilfe der Beiträge jener, die nicht betroffen sind, wird die Auszahlung an die Geschädigten finanziert. Das funktioniert aber nur, wenn tatsächlich nur ein Teil der Versicherten zu Schaden kommt. Für Katastrophenfälle gibt es die Möglichkeit der Rückversicherung, die Versicherer versichert und damit gewissermaßen weltweites *risk pooling* betreibt. „Auch der Staat kann nach einer Katastrophe Hilfe leisten“, so Ray Rees. „Die Geldmittel sind natürlich willkommen. Es besteht aber die Gefahr, dass Leute anfangen, sich auf dieses Sicherheitsnetz zu verlassen. Sie glauben, dass der Staat nach einer Katastrophe eingreifen wird. Das macht den Anreiz einer Versicherung noch geringer – wobei sich die Ärmsten den Beitrag aber wahrscheinlich sowieso nicht leisten könnten. Das Problem mit den oft beeindruckenden Geldspenden nach Katastrophen wie dem Tsunami von 2004 ist, dass in der Regel doch nur ein kleiner Teil des Schadens abgedeckt werden kann. Es wäre also möglicherweise eine gute Idee, wenn beispielsweise die Weltbank eine Versicherungsagentur einrichten würde, die mit Katastrophen in Entwicklungsländern umgeht.“



Prof. Dr. Heiner Igel ist seit 1999 Professor für Geophysik an der LMU und leitet das Seismologische Observatorium München und den Erdbebendienst Bayern.  
heiner.igel@geophysik.uni-muenchen.de  
[http://www.geophysik.uni-muenchen.de/people/faculty.php?user\\_id=igel](http://www.geophysik.uni-muenchen.de/people/faculty.php?user_id=igel)



Dr. Ulrich Münzer ist seit 1974 wissenschaftlicher Angestellter an der LMU und leitet seit 1992 diverse Fernerkundungsprojekte für die Weltraumorganisationen NASDA, CSA und ESA.  
ulrich.muenzer@iaag.geo.uni-muenchen.de  
<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/forschung/agf/mit/umue/umue.html>



Prof. Ray Rees leitet seit 1993 das Seminar für Versicherungswissenschaft am Institut für Volkswirtschaft der LMU.  
ray.rees@lrz.uni-muenchen.de  
[http://www.vwl.uni-muenchen.de/lr\\_rees/](http://www.vwl.uni-muenchen.de/lr_rees/)