

# GEO kompakt Nr. 19

Die Grundlagen des Wissens

## NATURGEWALTEN

### Vulkane, Erdbeben, Wirbelstürme

Wie die Urkräfte unseren Planeten prägen



GEO kompakt Naturgewalten



www.GEOkompakt.de

#### HURRIKAN »IKE«

Ein Tropensturm und sein Weg  
der Zerstörung

#### GESCHICHTE DER ERDE

Die erstaunliche Karriere einer  
glühenden Kugel im All

#### FEUERBERG KRAKATAU

Als 20 Milliarden Kubikmeter  
Gestein explodierten

#### DIE MACHT DER LUFT

Wenn Unsichtbares ganze  
Landschaften formt



Tun Sie was für Ihre Menschenkenntnis.  
Und fangen Sie bei sich an.

# GEO WISSEN

DIE WELT VERSTEHEN

[www.geo-wissen.de](http://www.geo-wissen.de)

GEO WISSEN Nr. 43 Lebenslauf-Forschung

## WER BIN ICH? LEBENSlauf-FORSCHUNG: Was die Persönlichkeit prägt



### GROSSER TEST

Lernen Sie  
sich besser kennen!

### AHNENFORSCHUNG

Auf der Spur  
der Vorfahren

### SCHICKSALSSCHLAG

Wie sich ein Trauma  
überwinden lässt

### ELTERN

Die (un)heimliche  
Macht der Familie





Liebe Leserin, lieber Leser,

es sind gewaltige Mächte, die unsere Erde seit Jahrmilliarden formen. Dagegen erscheinen die technischen Errungenschaften der Menschheit mitunter klein und unbedeutend: Selbst die wohl monströseste Kraft, die der *Homo sapiens* zu entfesseln vermag – die Atombombe –, ist tausendfach schwächer als ein Tsunami, eine Riesenwelle, ausgelöst etwa durch ein Seebeben.

Niemand vermag einen Vulkanausbruch, einen Bergsturz, eine Schneelawine zu verhindern. Keine noch so ausgeklügelte Maschine kann Kontinentalplatten aufhalten, die aneinander vorbeigleiten und so die Erde erzittern lassen. Und auch in absehbarer Zukunft wird es wohl nicht möglich sein, einen Hurrikan umzuleiten, einen Tornado zu stoppen, einen Taifun aufzulösen.

Nach wie vor sind all diese Naturgewalten zudem so unberechenbar, dass sie sich nicht exakt vorhersagen lassen: weil Wirbelstürme manchmal noch im letzten Moment vor einer Stadt einen Haken schlagen; weil die Prozesse vor einem Erdbeben so chaotisch ablaufen, dass Prognosen nur auf Jahrzehnte genau abgegeben werden können; weil manche Vulkane vor ihrem Ausbruch vollkommen unauffällig sind.

Dennoch arbeiten Geowissenschaftler in aller Welt an einer weiteren Enträtselung der Vorgänge auf unserem Planeten. Sie versuchen beispielsweise herauszufinden, ob Magma kurz vor der Eruption eines Feuerbergs möglicherweise charakteristische Geräusche von sich gibt. Sie erforschen die Physik von Monsterwellen und prüfen, ob künstliche Riffe und neu angelegte Mangrovenwälder als Schutz vor den Wänden aus Wasser dienen können. Sie studieren die Kristallstruktur des Schnees, um die Risiken von Lawinenabgängen in Zukunft besser abschätzen zu können.



Das Konzept für dieses Heft hat Dr. Henning Engeln erarbeitet

Und es ist für den Laien verblüffend, wie viel die Wissenschaftler über die inneren und äußeren Kräfte herausgefunden haben, die auf den Globus einwirken. Über die gewaltigen Ströme aus heißem Gestein zum Beispiel, die ganze Kontinente bewegen und Gebirge auftürmen. Über das Werden und Vergehen mächtiger Erdplatten. Über die Klimamaschine, die riesige Mengen an Energie rund um den Planeten verteilt.

So wissen die Forscher inzwischen, dass unter dem Yellowstone-Nationalpark in den USA ein glühender Supervulkan liegt, der bei seinem letzten großen Ausbruch weite Teile Nordamerikas verwüstete. Zwar liegt diese Eruption bereits 640 000 Jahre zurück, doch kann niemand ausschließen, dass die unterirdische Magmakammer dieses Feuerkegels noch im Verlauf dieses Jahrhunderts explodiert.

Und vor einiger Zeit haben Geophysiker entdeckt, dass es in den Tiefen der Ozeane scheinbar unsichtbare Wellen gibt, die sich extrem langsam fortbewegen, aber so viel Energie mit sich führen, dass sie in der Lage sind, die für unser Klima enorm wichtigen Meeresströmungen umzuleiten, etwa den Golfstrom, der für ausgeglichene Temperaturen in Mitteleuropa sorgt.

Die Naturkräfte, so viel steht fest, haben die Welt in ihrer Gewalt – freilich auch zum Guten: Denn ohne den Vulkanismus wäre nie eine Atmosphäre entstanden, ohne die Bewegung der Erdplatten gäbe es keine Landflächen, ohne die Hitze aus dem Inneren des Planeten existierte kein Leben.

Das Wissen um diese Vorgänge kann einen demütig machen. Und staunen lassen, immer wieder, über all die Faktoren, die zusammenwirken mussten, damit die Erde so werden konnte, wie sie heute ist.

Mit diesem Heft müssen wir den Preis für eine Ausgabe um 50 Eurocent erhöhen. Die steigenden Druck- und Papierkosten zwingen uns leider dazu. Ich hoffe, Sie haben dafür Verständnis.

Herzlich Ihr

*Michael Steger*





**Die Kraft aus der Tiefe.** Der Kljutschewskoj-Vulkan auf Kamtschatka ist Teil eines riesigen Rings von Feuerbergen rund um den Pazifik. **Seite 10**



**1883 explodierte** der Vulkan Krakatau – und löste eine Jahrhundertkatastrophe aus. **Seite 54**



**Innere Kräfte.** Ohne die Hitze aus der Erdtiefe gäbe es weder Meere noch Kontinente. **Seite 8**



**Im Sog der Wolkenturbine.** Wie Hurrikan »Ike« Texas verwüstete. **Seite 114**

**Der Atem der Erde.** Luft befördert Staubpartikel über die ganze Welt – und düngt sogar den Regenwald in Südamerika. **Seite 98**



**Am Puls des Planeten.** Lawinenforscher studieren Schneekristalle im Labor. **Seite 66**





**Wenn der Himmel explodiert.** Häufig blitzt es, sobald ein Vulkan ausbricht. Geladene Partikel in dessen Aschewolken verursachen elektrische Spannungen. **Seite 106**



**Die Macht der Wogen.** Die Wellen der Ozeane speichern 100-mal so viel Energie, wie die Menschheit pro Jahr verbraucht. Manche sind so gewaltig, dass sie das Klima beeinflussen. **Seite 130**



**Das Rumoren aus der Tiefe.** Wenn die Erdplatten sich gegeneinander verschieben, reißt der Boden auf, so 2008 in China. Wird man solche Beben je vorhersagen können? **Seite 76**

## PROLOG

### DIE GEWALTEN, DIE NEUES SCHAFFEN

Weshalb es den Menschen ohne Naturkatastrophen gar nicht gäbe **6**

## DIE INNEREN KRÄFTE

**ANATOMIE UNSERES PLANETEN** Eine glühende Kugel mit hauchdünner Schale **8**

**KRAFT AUS DER TIEFE** Ein Supervulkan bedroht die USA **10**

**DER LANGE WEG ZUR ERDE** Die Geschichte unserer Heimat im All **38**

**DER TAG, AN DEM DIE WELT VERSANK** Der Ausbruch des Krakatau 1883 **54**

**AM PULS DES PLANETEN** Mit welchen Methoden Geowissenschaftler die Geheimnisse der Erde ergründen **66**

**DAS RUMOREN AUS DER TIEFE** Weshalb es so schwer ist, Beben vorherzusagen – und wie man sich dennoch schützen kann **76**

## DIE ÄUSSEREN KRÄFTE

**NATURGEWALTEN** Wie Fluten, Berg-rutsche, Lebewesen, Feuer, Gletscher und Eis den Globus prägen **86**

**DER ATEM DER ERDE** Die Luft – und ihr (meist) unsichtbarer Einfluss **98**

**WENN DER HIMMEL EXPLODIERT** Was Blitze bewirken **106**

**IM SOG DER WOLKENTURBINE** Die kurze Biografie des Hurrikans „Ike“ **114**

**DIE MACHT DER WOGEN** Wie Monsterwellen entstehen **130**

**TOD IM SCHNEE** Die Lawine von Galtür **140**

**DIE ENTRÄTSELUNG DER ERDE** Wie die Menschen nach und nach ihren Heimatplaneten kennenlernten **148**

<b>Bildnachweis</b>	<b>152</b>
<b>Impressum</b>	<b>153</b>
<b>Vorschau: »Liebe und Sex«</b>	<b>154</b>

Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 20. Mai 2009

**Alle Fakten und Daten** in diesem Heft sind vom GEOkompakt-Verifikationsteam auf ihre Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden.

**Informationen** zum Thema und Kontakt zur Redaktion unter [www.geokompakt.de](http://www.geokompakt.de)

Titelbild: Tavorvur-Vulkan in Papua-Neuguinea; Olivier Grunewald



# Die **Gewalten**, die **Neues** schaffen

Erdbeben, Überflutungen, Vulkanausbrüche, Hurrikans: Immer wieder bedrohen Naturkatastrophen das Leben Zehntausender. Doch ohne die Kräfte, die solche Desaster auslösen, gäbe es die Menschheit überhaupt nicht

Text: Henning Engeln

**DER GRIECHISCHE PHILOSOPH** Xenophanes, so ist es überliefert, machte sich bereits vor rund 2500 Jahren Gedanken über ein Phänomen, das damals äußerst verblüffend gewesen sein muss: An vielen Orten im Inland fanden sich versteinerte Reste von Meerestieren. Wie waren sie dorthin gelangt – weit entfernt von jedem Ozean? Der Grieche kam auf eine kühne Erklärung: Weltweite Überflutungen hätten die Meeresbewohner dorthin verfrachtet.

Er konnte nicht ahnen, dass die Wirklichkeit noch viel fantastischer ist. Das erkannten erst Geologen im 20. Jahrhundert, als sie den Mechanismus der Plattentektonik entdeckten: Danach ist die gesamte Erde eine heiße Kugel, auf deren Oberfläche erkaltete Platten mitsamt der kontinentalen und ozeanischen Erdkruste schwimmen, angetrieben von der Wärme im Erdinneren.

In einigen Regionen auf unserem Planeten stoßen diese Platten aneinander, schiebt sich die eine unter die andere und staucht deren Rand zusammen. Die Knautschungen wachsen als Gebirge in den Himmel, und wenn es sich dabei um Meeresgrund handelt, wird er teilweise kilometerweit in die Höhe gestemmt – einschließlich der darin enthaltenen versteinerten Überreste seiner Bewohner.

All dies geschieht in extremer Langsamkeit. Rund zwei Zentimeter rücken Europa und Nordamerika beispielsweise Jahr für Jahr auseinander, während Indien sich mit fünf Zentimetern pro Jahr in die Eurasische Platte rammt und dabei den Himalaya immer weiter auftürmt. Das Wachsen eines Gebirges könnte ein Mensch nur verfolgen, wenn er Millionen Jahre und länger leben würde.

Einem quasi ewig existierenden Wesen zeigte sich ein äußerst dynamischer Planet, der ständig in Bewegung ist: Es erlebte einen Reigen von sich über die Erdoberfläche bewegendem Kontinenten, von sich öffnenden oder schrumpfenden Meeren, von ständig neu wachsenden Gebirgen, die von erodierenden Kräften wie Wasser, Wind

und Frost auch wieder zerbröselt, fortgeschwemmt und letztlich eingeebnet werden.

Doch gelegentlich erleben auch wir die Urgewalten, die unseren Planeten formen. Diese Kräfte sind mit nichts vergleichbar, was der *Homo sapiens* je geschaffen hat.

**IM JUNI 1991 SPUCKTE** der philippinische Vulkan Pinatubo knapp zehn Kubikkilometer Staub, Asche und Geröll aus. In weiten Gebieten der Nordhalbkugel wurde es im Winter darauf um durchschnittlich drei Grad Celsius wärmer, im Sommer dagegen kühler.

Ähnlich mächtig sind andere Urgewalten. Erdbeben können Geländeteile in wenigen Sekunden um bis zu 20 Meter gegeneinander verschieben; Hurrikans und Taifune erreichen Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h, türmen bis zu 20 Meter hohe Wellen auf und werden häufig von sintflutartigen Regenfällen begleitet.

Doch die Urkräfte der Erde bedrohen den Menschen nicht nur, sondern haben ihn letztlich geschaffen. Denn jene Gewalten, die Erdbeben, Wirbelstürme, Vulkanausbrüche und Überflutungen auslösen, haben auch unseren Planeten modelliert und damit unsere Lebensgrundlage. Sie ließen Kontinente wandern, Berge entstehen, schufen Gesteine und Landschaften.

Kurz: Sie schrieben die Geschichte der Erde – und brachten das Leben hervor, das selbst zu einer gestaltenden Kraft des Planeten wurde.

Immer wieder aber haben die Naturgewalten auch massiv in die Evolution des Lebens eingegriffen; allein fünfmal in den vergangenen 600 Millionen Jahren starben nach Großkatastrophen mehr als die Hälfte aller Arten von Lebewesen aus. Zum schlimmsten dieser Massensterben kam es vor rund 250 Millionen Jahren, als etwa 95 Prozent aller Spezies im Wasser und rund 70 Prozent der Landlebewesen vernichtet wurden. Auslöser waren



möglicherweise gigantische Vulkanausbrüche, die eine globale Klimakatastrophe nach sich zogen. Vor 65 Millionen Jahren war es jedoch eine außerirdische Kraft – ein riesiger Meteorit –, welche die Erde traf und wohl den Untergang der Dinosaurier besiegelte. Nach deren Verschwinden war der Weg frei für die Entfaltung der Säugetiere und damit letztlich auch für die Entwicklung des *Homo sapiens*.

So sind die Urgewalten zwar oft bedrohlich für den Menschen, doch sind sie auch der Grund dafür, weshalb unsere Welt so aussieht, wie wir sie heute kennen.

**UNSEREN VORFAHREN ERSCIEN** diese Erde einst als solider, fester Grund und als Zentrum des Universums. Inzwischen ist aber bekannt, dass wir auf einem Feuerball leben, den eine hauchdünne, erkaltete Kruste umgibt: Unter den Ozeanen ist diese Haut gerade mal zehn bis 15 Kilometer, in den Kontinenten bis zu 65 Kilometer dick; bei einem Erddurchmesser von rund 12 750 Kilometern sind das gerade mal 0,1 bis 0,5 Prozent.

Und die Kruste ist nicht fest auf der Erde verankert, vielmehr ist sie die obere Schicht sich ständig bewogender und in viele Teile zerfallener Platten. In manchen Regionen versinken diese Teile in der Tiefe des Erdinneren und lösen sich auf, an anderen Stellen brechen sie entzwei, quillt glutflüssiges Magma aus den dabei entstehenden Spalten und erkaltet zu neuer Kruste.

Das alles haben Naturwissenschaftler herausgefunden und damit ein neues Bild unserer Erde geprägt. Sie haben ihr Inneres „durchleuchtet“, ihre Geschichte enträtselt und dabei ihre äußerst bewegte Vergangenheit erkannt. Dieses Wissen ermöglicht es ihnen, sich die Zukunft unseres Planeten auszumalen. Und die wird kaum weniger dramatisch verlaufen als die Vergangenheit.

serer Atmosphäre (jenem Treibhausgas also, das gegenwärtig noch eine Erwärmung der Erde verursacht) wird in Zukunft immer mehr sinken, weil der Kohlenstoff in Gesteinen gebunden wird. Irgendwann wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration möglicherweise so gering sein, dass keine höheren Pflanzen mehr existieren können.

Die Folge: Der Tierwelt werden dann die Nahrung und vor allem die Sauerstoffproduzenten fehlen. Der Gehalt des Sauerstoffs in der Atmosphäre könnte von heute 21 Prozent auf weniger als ein Prozent fallen.

Parallel dazu wird die Sonneneinstrahlung im Lauf der Äonen immer mehr zunehmen, da die Energieproduktion in der Sonne langsam ansteigt, und in 800 bis 900 Millionen Jahren eine Durchschnittstemperatur von über 30 Grad Celsius auf der Erde erzeugen, bei der keine höheren Organismen mehr überleben können.

In jedem Fall wird das Leben auf unserem Planeten so enden, wie es einst begonnen hat: mit einfachen, bakterienähnlichen Wesen. Eine Evolution quasi im Rückwärtsgang.

Zudem kühlt das Innere der Weltkugel langsam ab, da die radioaktiven Zerfallsprozesse im Erdmantel nicht genügend Energie erzeugen, um den Wärmeverlust des Planeten an seiner Oberfläche auszugleichen. Irgendwann gerät der Motor der Plattentektonik ins Stocken.

Fortan werden keine neuen Gebirge mehr gebildet, Erosion und Sedimentation aber werden weiterhin alle noch vorhandenen Berge weiter abschleifen, bis die kontinentale Erdkruste nur noch wenige Meter über dem Meeresspiegel liegt. Dem Auge eines außerirdischen Beobachters würde sich dann eine trostlose Einöde darbieten.

In etwa 3,5 Milliarden Jahren wird die Sonne um 40 Prozent heller scheinen als heute. Die Hitze wird alles Wasser verdampfen und spätestens jetzt die verbliebenen

## Schon mehrfach haben Naturkräfte einen Großteil des Lebens vernichtet

Zunächst werden sich die Kontinente weiter bewegen – mal voneinander weg, mal aufeinander zu. So wird beispielsweise Afrika entlang des Ostafrikanischen Grabenbruchs auseinanderbrechen, und ein neuer Ozean wird entstehen.

Zudem nähert sich der afrikanische Kontinent im Verlauf der nächsten 50 bis 80 Millionen Jahre von Süden her dem europäischen immer weiter an, bis schließlich das Mittelmeer verschwindet. Auch Australien treibt in Richtung Norden und wird nach ähnlich langer Zeit mit den Inseln Südasiens verschmelzen.

In rund 250 Millionen Jahren schließlich werden vermutlich sämtliche Landmassen zu einem einzigen Superkontinent verschmolzen sein. Fraglich ist allerdings, ob dann noch höheres Leben existiert, geschweige denn die Menschheit. Denn der Gehalt an Kohlendioxid in un-

Reste von Leben auslöschen. In fünf bis sieben Milliarden Jahren schließlich beginnt sich unser Zentralgestirn in seinem Toteskampf zu einem Roten Riesenstern aufzublähen. Er wird die Erde erst aufschmelzen und sie vielleicht am Ende gar verschlingen.

Wie jeder Roter Riese wird die Sonne schließlich ihre Hülle ins All abstoßen (während ihr Kern am Ende zu einem weißen Zwergstern zusammenstürzt). Die atomisierten, von der Sonne aufgenommenen Bestandteile der Erde werden dann mit der Hülle des Sterns hinauskatapultiert und anschließend durch das Weltall wabern.

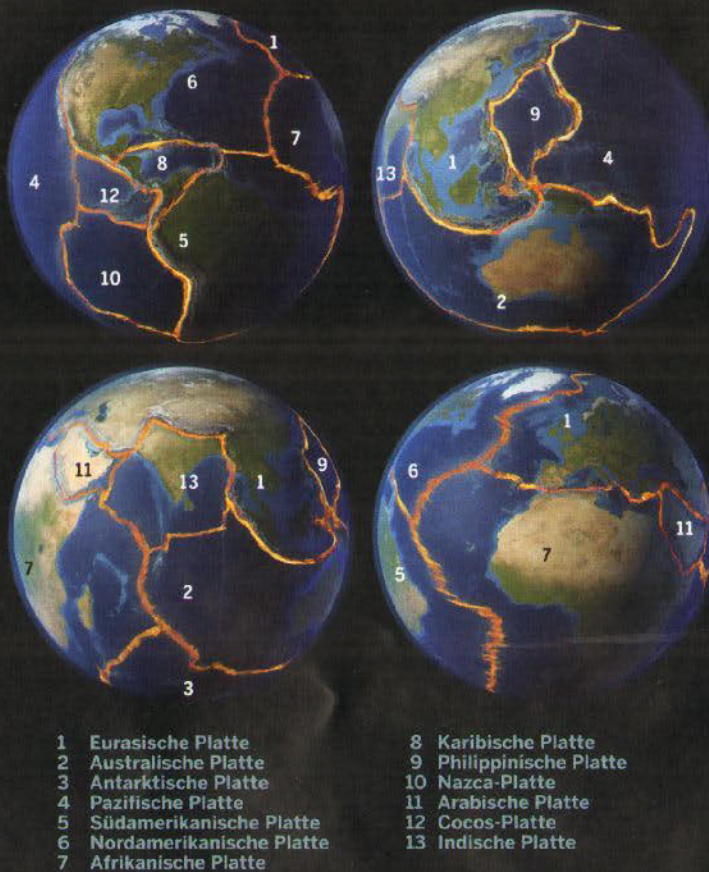
Und irgendwann werden sie möglicherweise zum Baustoff eines neuen Planeten. □

Der Biologe **Dr. Henning Engeln**, 55, ist GEOkompakt-Redakteur. Er hat das Konzept zu diesem Heft erarbeitet.



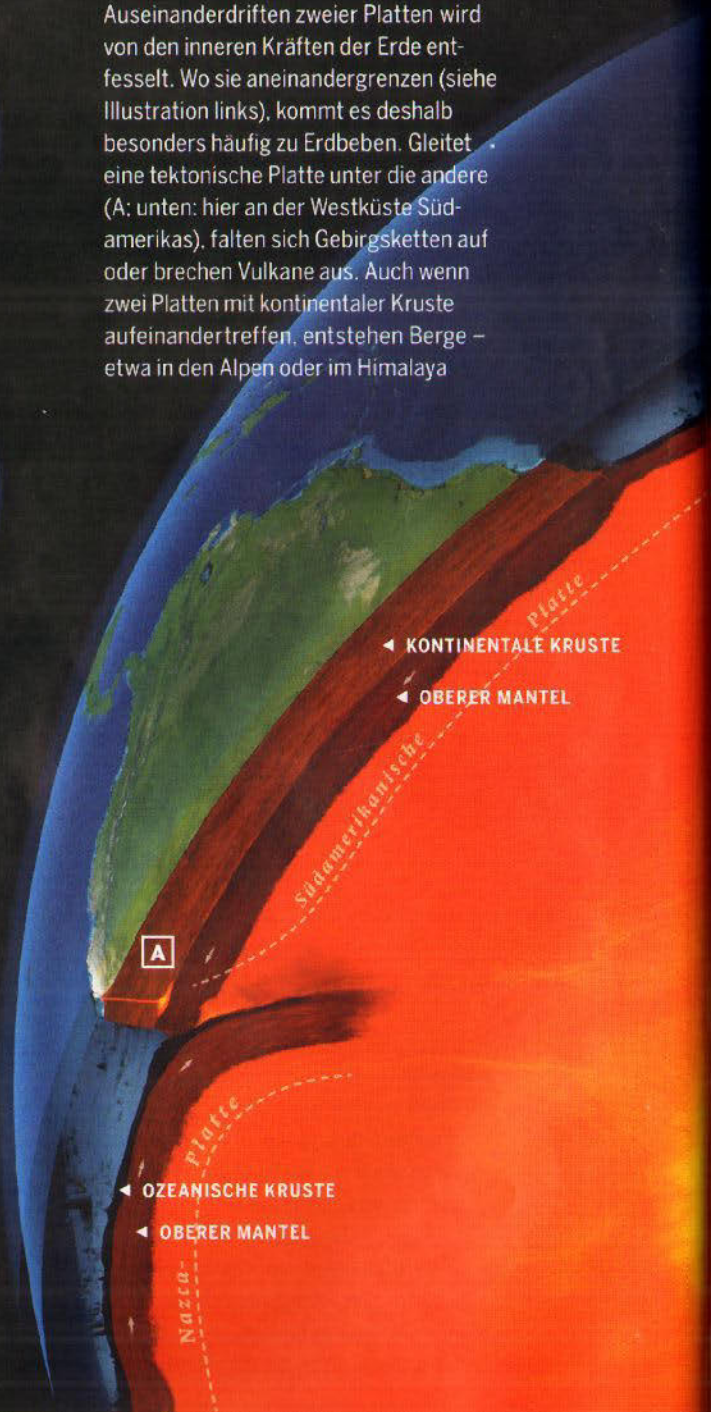
# I. Die inneren Kräfte

Illustration: Jochen Stuhmann



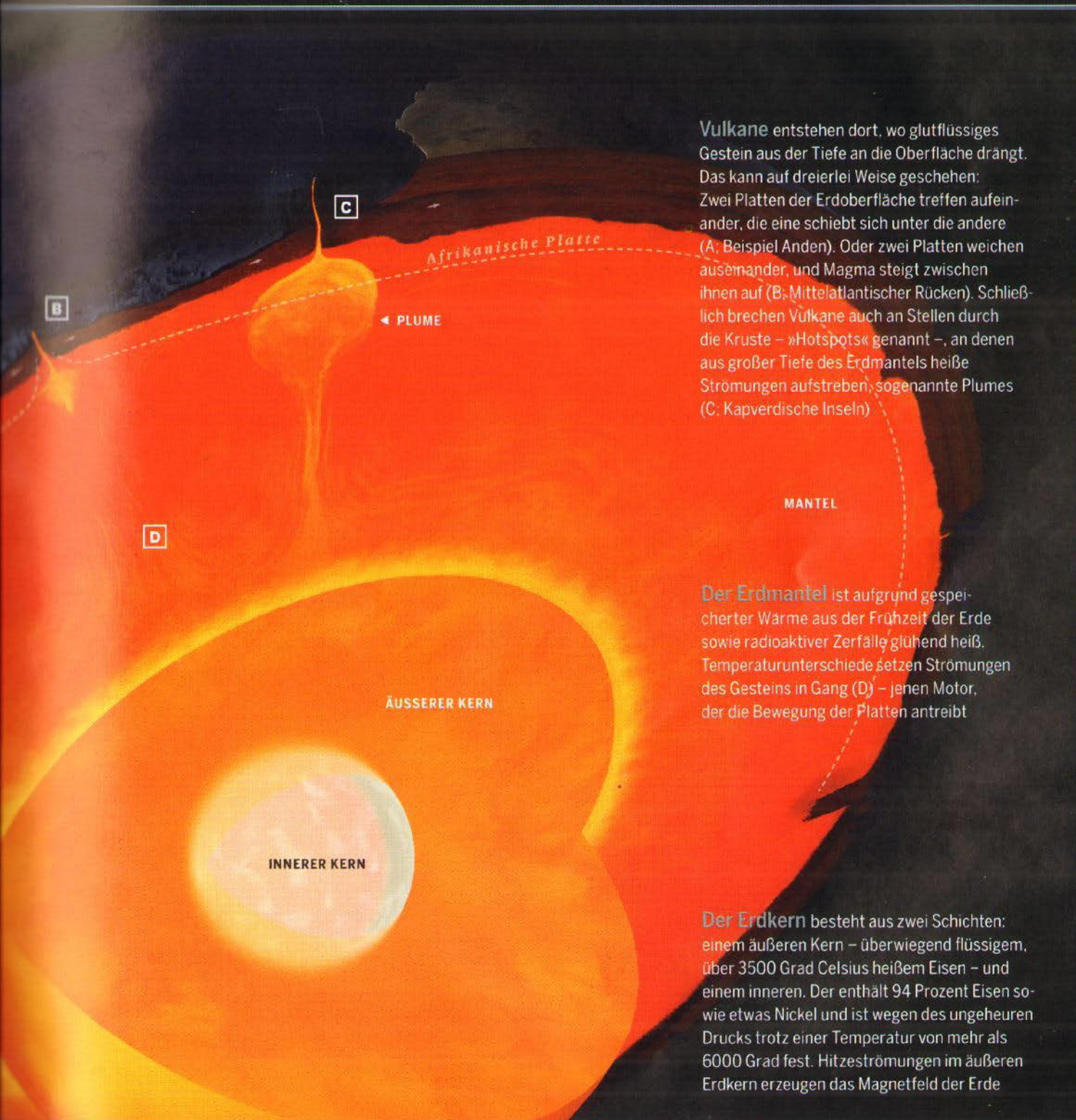
Die Erde ist von einer zehn bis 65 Kilometer dicken Kruste bedeckt. Im Vergleich zum Durchmesser des Planeten von rund 12 750 Kilometern ist sie allerdings hauchdünn (die Illustration rechts stellt sie stark überzeichnet dar). Die Kruste bildet zusammen mit der obersten Schicht des Erdmantels die tektonischen Platten: Das sind 13 große und mehrere kleinere Bruchstücke, in welche die Erdoberfläche zerfallen ist (siehe oben). Manche dieser Platten, etwa die Nazca-Platte, bestehen abgesehen vom oberen Mantel nur aus der schweren ozeanischen Kruste, andere, so die Südamerikanische, enthalten leichtere Anteile: die Kontinente (siehe auch Seite 49). Alle Platten werden von Strömungen des heißen Erdmantels mitgezogen und verschieben sich ständig auf der Oberfläche unseres Planeten. In manchen Regionen wachsen die Platten, weil aus dem Erdinneren zwischen zwei Bruchstücken neues Material hervorquillt (siehe Seite 82), anderswo vergehen sie, weil sie aufeinanderstoßen und sich eine Platte unter die andere schiebt.

**Das Aufeinandertreffen** oder Auseinanderdriften zweier Platten wird von den inneren Kräften der Erde entfesselt. Wo sie aneinandergrenzen (siehe Illustration links), kommt es deshalb besonders häufig zu Erdbeben. Gleitet eine tektonische Platte unter die andere (A; unten: hier an der Westküste Südamerikas), falten sich Gebirgsketten auf oder brechen Vulkane aus. Auch wenn zwei Platten mit kontinentaler Kruste aufeinandertreffen, entstehen Berge – etwa in den Alpen oder im Himalaya





Ihr Aufbau macht die Erde zu einem besonderen Himmelskörper und bringt eine Vielzahl geologischer Phänomene hervor, die unserem Globus seine typische Oberflächengestalt geben: Der metallene Kern erzeugt ein schützendes Magnetfeld, Hitzeströme aus der Tiefe bewegen die Platten der Erdkruste, lassen Vulkane ausbrechen, Gebirge in die Höhe wachsen und die Erde beben. Diese Vorgänge haben die heutige Verteilung von Kontinenten und Meeren bewirkt und dafür gesorgt, dass wir nicht in flachen Einöden leben, sondern auf einem Planeten voller Höhen und Tiefen



**Vulkane** entstehen dort, wo glutflüssiges Gestein aus der Tiefe an die Oberfläche drängt. Das kann auf dreierlei Weise geschehen: Zwei Platten der Erdoberfläche treffen aufeinander, die eine schiebt sich unter die andere (A: Beispiel Anden). Oder zwei Platten weichen auseinander, und Magma steigt zwischen ihnen auf (B: Mittelatlantischer Rücken). Schließlich brechen Vulkane auch an Stellen durch die Kruste – »Hotspots« genannt –, an denen aus großer Tiefe des Erdmantels heiße Strömungen aufstreben, sogenannte Plumes (C: Kapverdische Inseln)

**Der Erdmantel** ist aufgrund gespeicherter Wärme aus der Frühzeit der Erde sowie radioaktiver Zerfälle glühend heiß. Temperaturunterschiede setzen Strömungen des Gesteins in Gang (D) – jenen Motor, der die Bewegung der Platten antreibt

**Der Erdkern** besteht aus zwei Schichten: einem äußeren Kern – überwiegend flüssigem, über 3500 Grad Celsius heißem Eisen – und einem inneren. Der enthält 94 Prozent Eisen sowie etwas Nickel und ist wegen des ungeheuren Drucks trotz einer Temperatur von mehr als 6000 Grad fest. Hitzeströmungen im äußeren Erdkern erzeugen das Magnetfeld der Erde



Vulkane

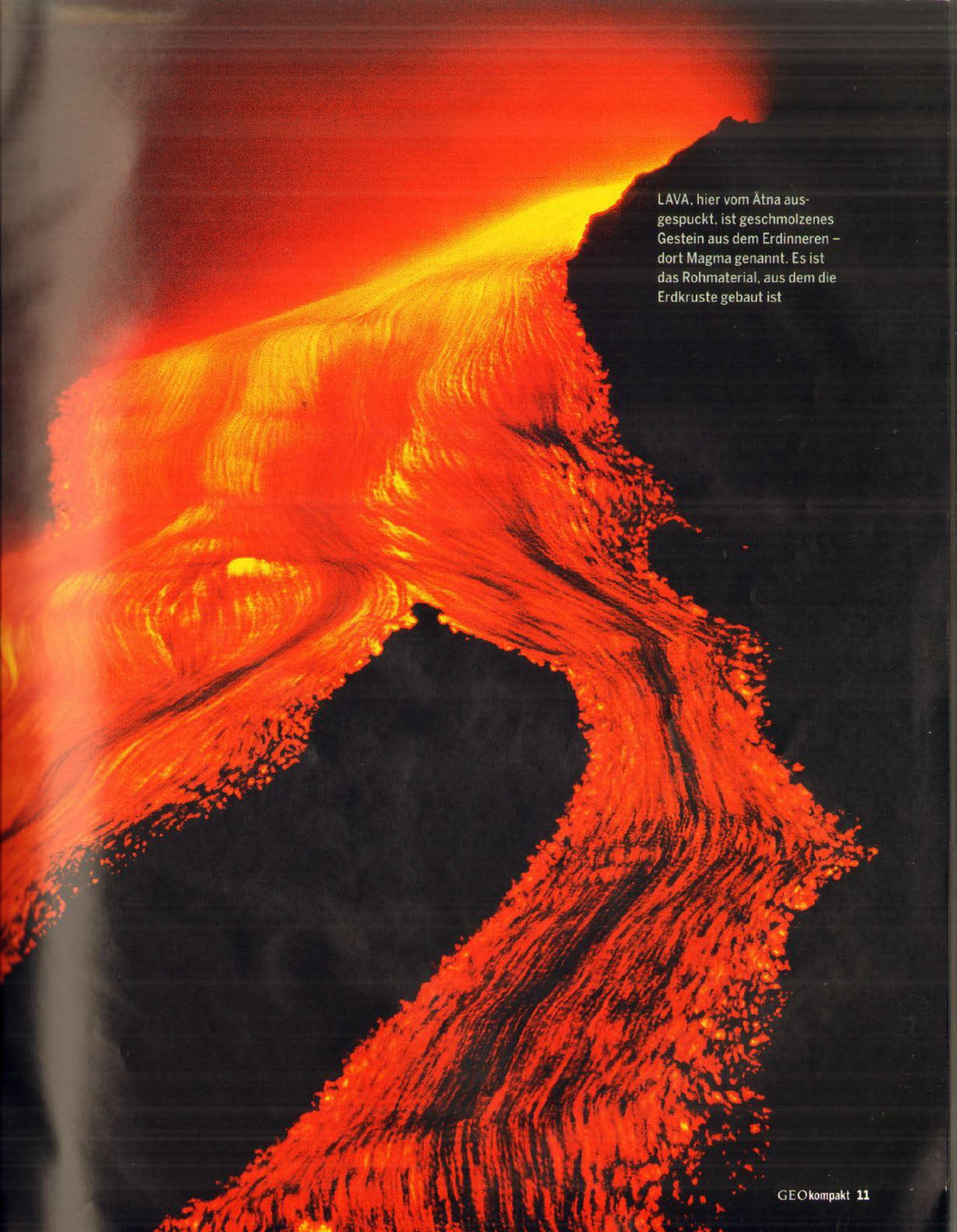
# DIE KRAFT aus der TIEFE

Feuerberge sind Fenster in das Innere der Erde. Auf dramatische Weise zeigen sie, dass wir auf einer Kugel aus glühendem Gestein und geschmolzenem Eisen leben, die nur von einer hauchdünnen, zerbrechlichen Kruste bedeckt ist. Die Vulkane erlauben den Forschern einen Blick unter diese Oberfläche – und damit auf jene Prozesse, die unser Schicksal bestimmen: Denn heiße Gesteinsströme verschieben ganze Kontinente, türmen Gebirge auf, lassen die Erde beben, Supervulkane explodieren. Sie sind die mächtigsten aller Naturgewalten, die den Blauen Planeten prägen – und damit auch unser Leben

Fotos: Olivier Grunewald  
Texte: Henning Engeln

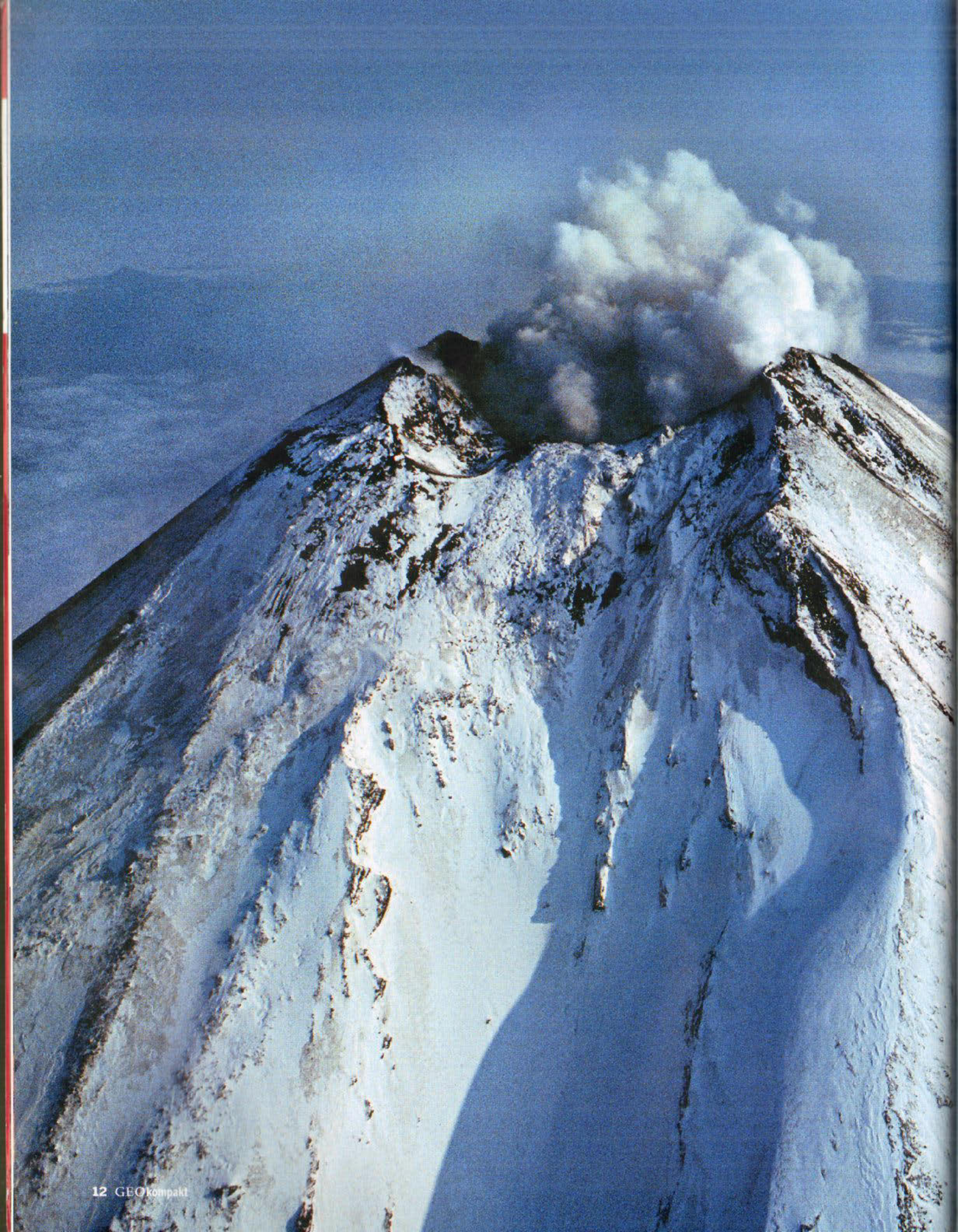






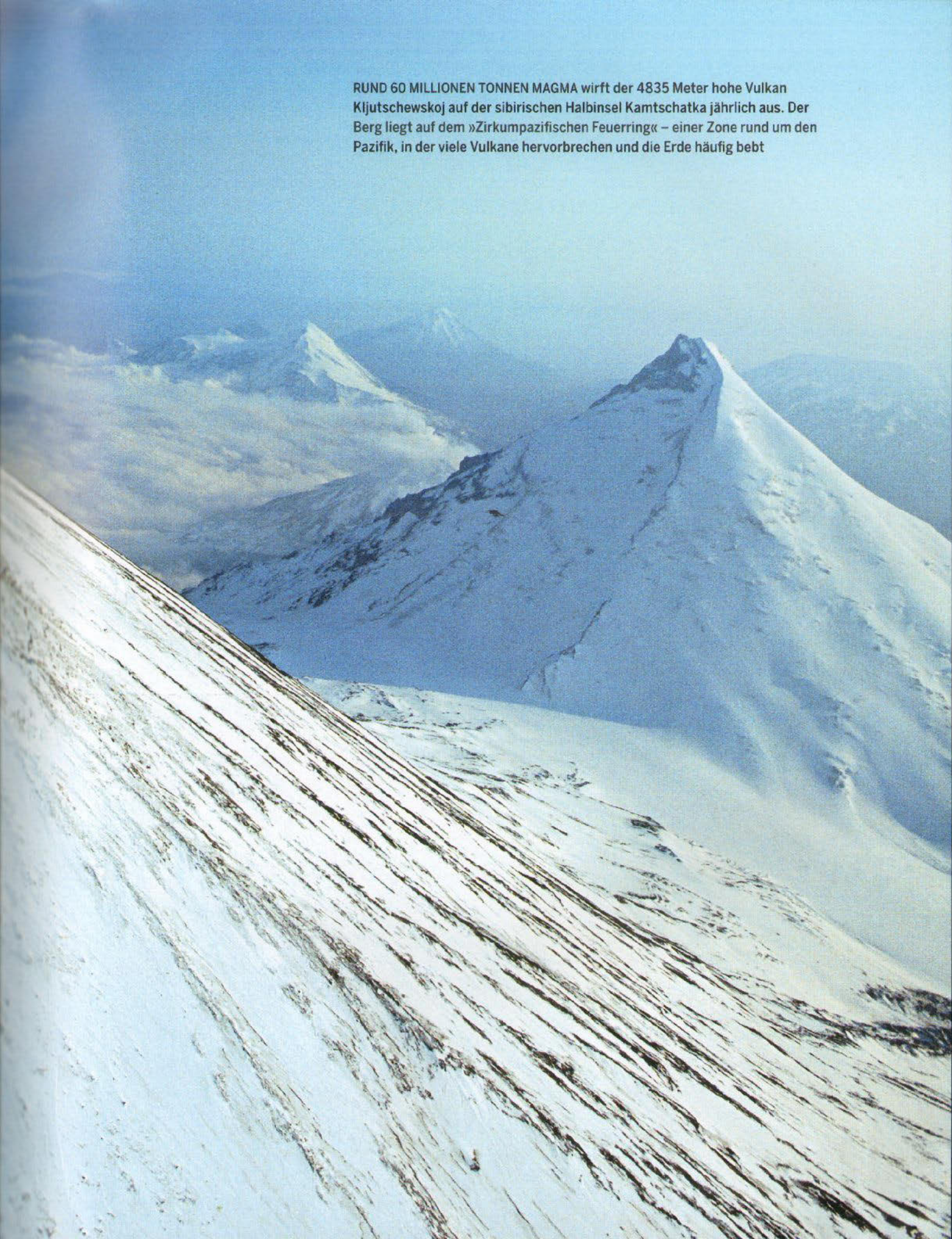
LAVA, hier vom Ätna ausgespuckt, ist geschmolzenes Gestein aus dem Erdinneren – dort Magma genannt. Es ist das Rohmaterial, aus dem die Erdkruste gebaut ist







RUND 60 MILLIONEN TONNEN MAGMA wirft der 4835 Meter hohe Vulkan Kljutschewskoj auf der sibirischen Halbinsel Kamtschatka jährlich aus. Der Berg liegt auf dem »Zirkumpazifischen Feuerring« – einer Zone rund um den Pazifik, in der viele Vulkane hervorbrechen und die Erde häufig bebt









VON DER WÄRME eines gigantischen Magma-Reservoirs unter dem Yellowstone-Nationalpark wird der Morning Glory Pool gespeist. Hitze liebende Mikroben geben der heißen Quelle ihre unwirklichen Farben. Vorfahren solcher Einzeller, die Temperaturen zwischen 40 und 80 Grad Celsius bevorzugen, waren wahrscheinlich die ersten Lebensformen auf der Erde





DIE VULKANGRUPPE DES TOLBATSCHIK auf Kamtschatka besteht aus mehreren riesigen Feuerbergen sowie einem Lavafeld mit kleineren Schlackenkegeln. Sie liegen auf einer Bruchlinie zweier Erdplatten, der Pazifischen und der Nordamerikanischen



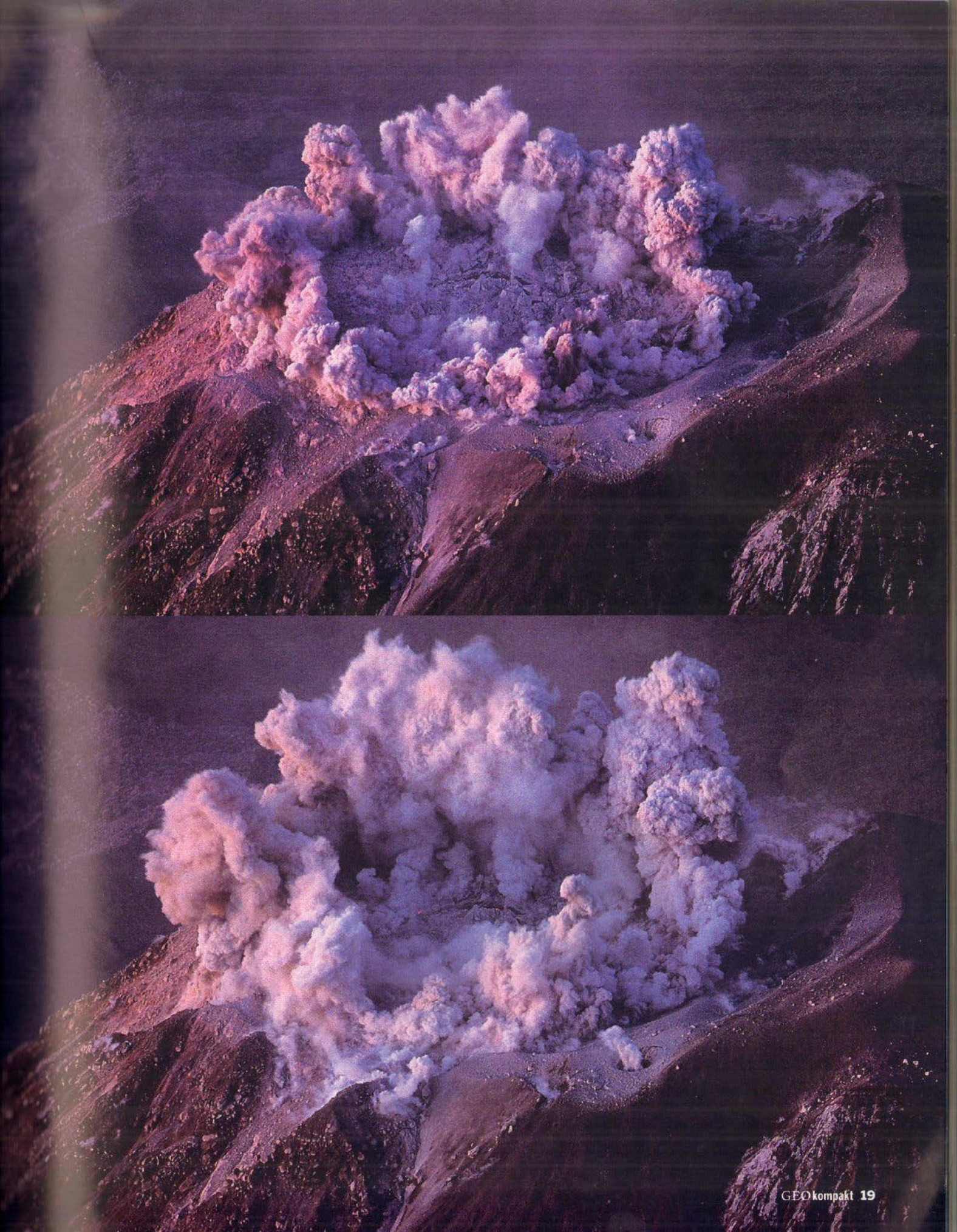




DER SANTIAGUITO IN GUATEMALA, hier bei einem Ausbruch im Jahr 2007, erwuchs aus der Flanke des Vulkans Santa María, der 1902 in einer der größten Eruptionen des Jahrhunderts explodierte. Weite Teile des Landes und auch Südmexikos wurden damals verwüstet. Vulkanausbrüche werden besonders explosiv, wenn der Druck auf das Magma kurz unter der Oberfläche abnimmt und dann Bestandteile wie Wasser oder Kohlendioxid plötzlich ausgasen – ähnlich wie beim Öffnen einer geschüttelten Seltersflasche

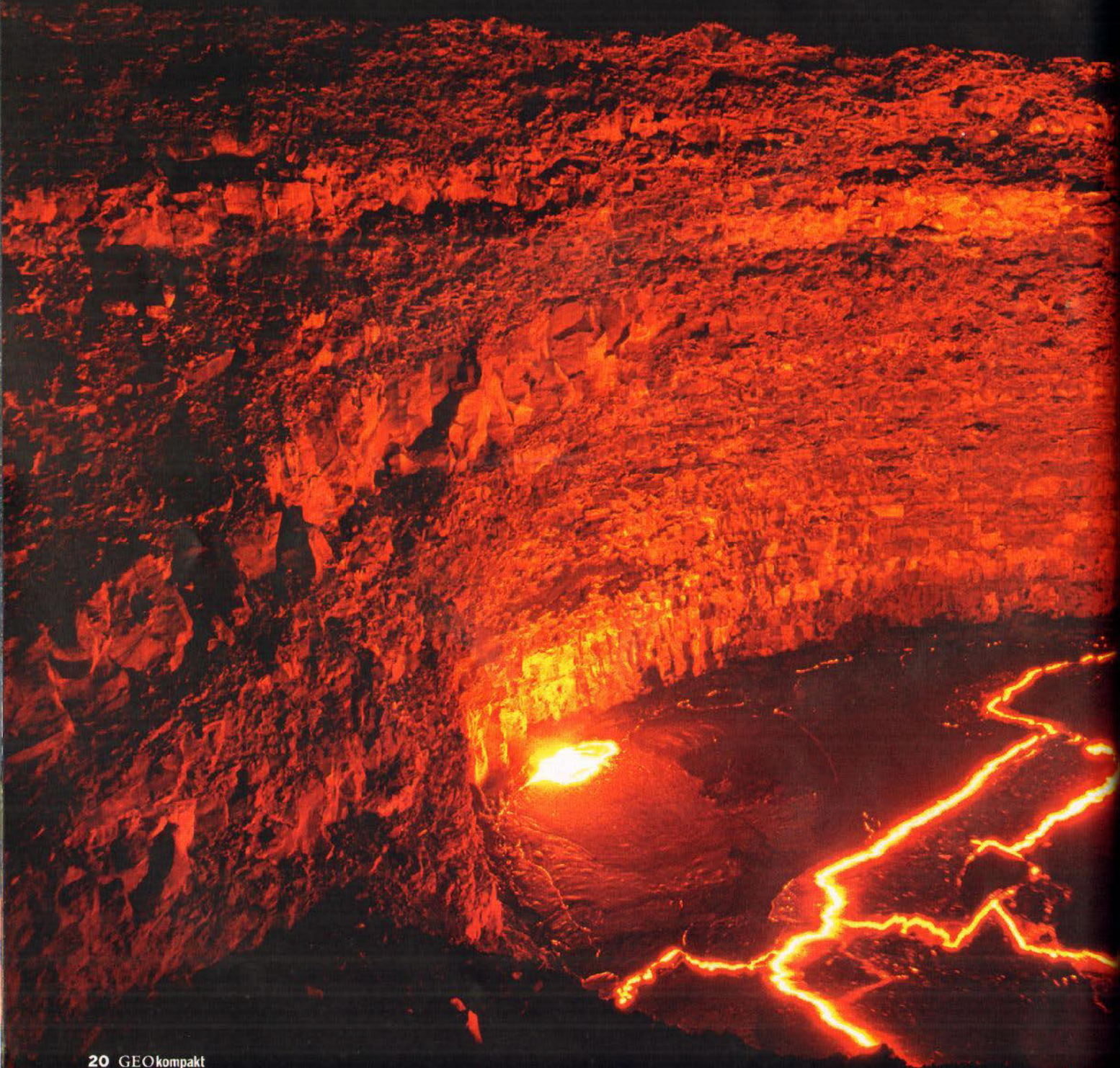




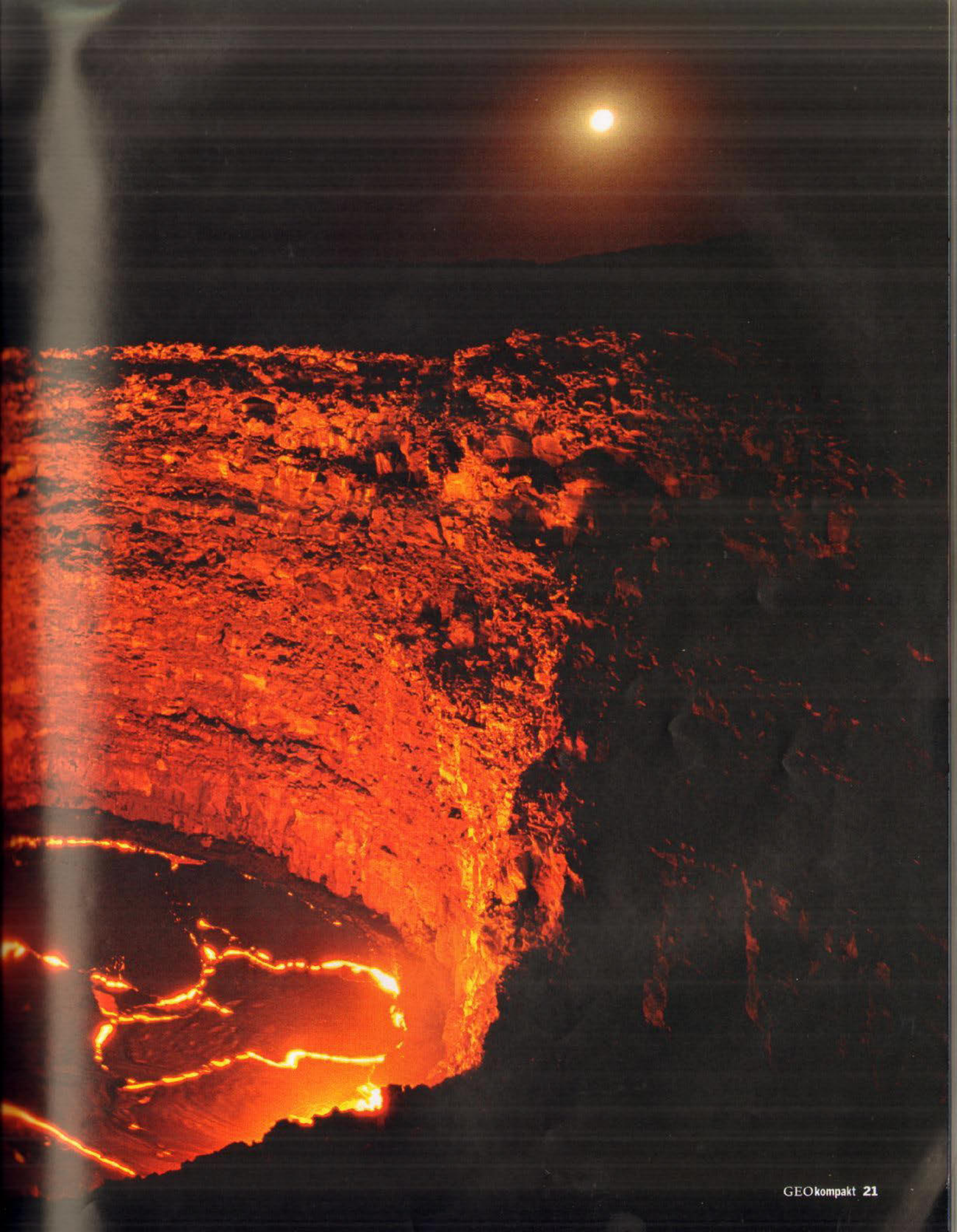




IM LAVASEE des äthiopischen Vulkans Erta Ale steigt glühendes Gestein empor und erstarrt an der Oberfläche zu einer dünnen Kruste. Von unten nachströmende Lava reißt diese Kruste auf, schiebt sie an den Rand des Sees und schließlich in die Tiefe, wo sie in der Hitze wieder schmilzt – und der Kreislauf von Neuem beginnt















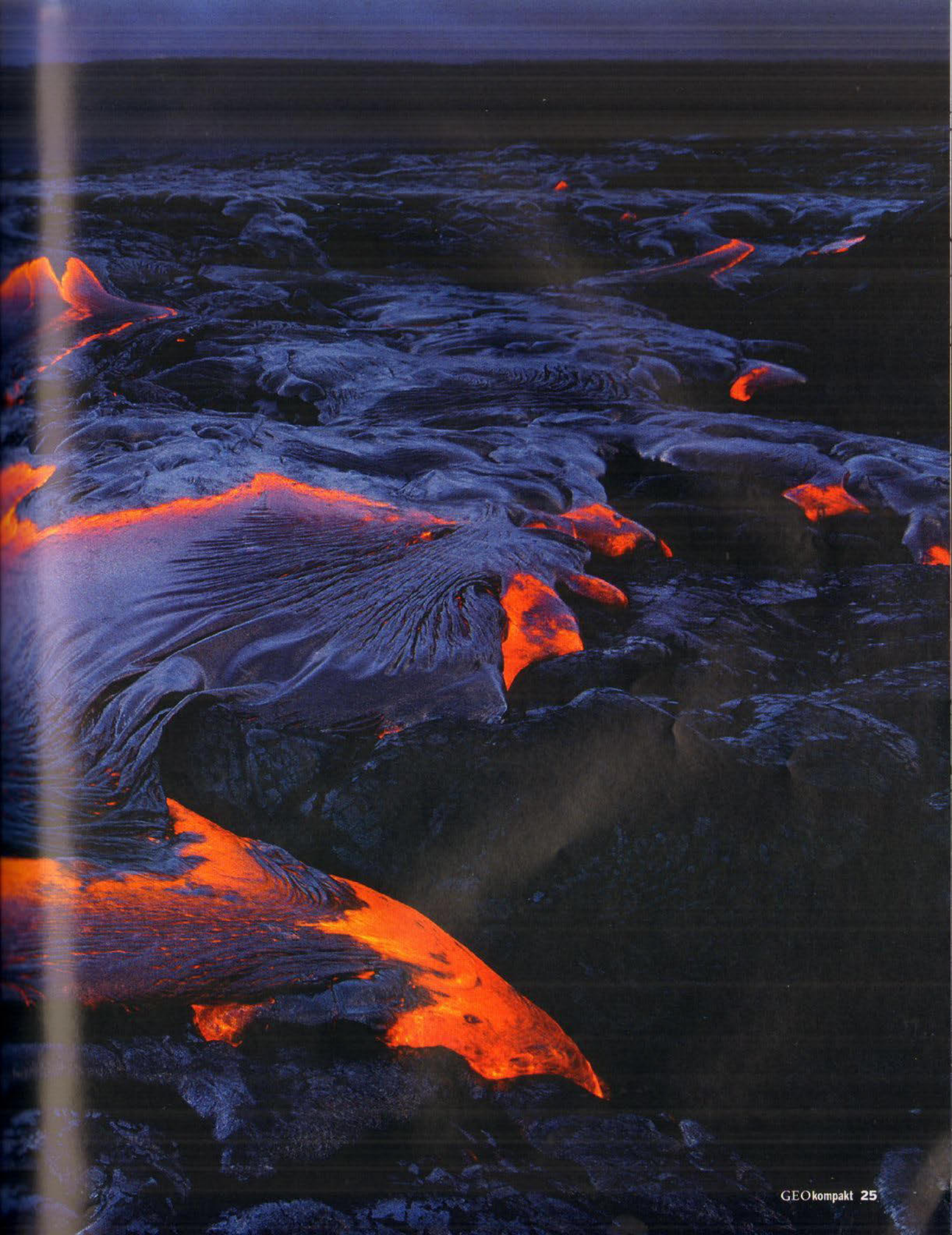
ALLE ACHT MINUTEN schleudert der isländische Strokkur-Geysir kochendes Wasser rund 20 Meter in die Höhe. Die gesamte Insel ist von heißen Quellen und Vulkanen überzogen, denn auf Island gibt es einen Riss in der Oberfläche unseres Planeten: Zwei Erdplatten – die Europäische und die Nordamerikanische – streben auseinander und lassen heißes Magma aufsteigen



LAVA ERGIESST SICH über die größte Insel Hawaiis. Die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung »basaltisch« genannte Lava der hawaiianischen Vulkane wird nur selten durch explosive Gase weit hinausgeschleudert. In der Regel fließt das glühende Gestein die Hänge des Bergs hinab, bis es langsam erstarrt









ASCHEWOLKEN, GESTEINSBROCKEN, GASE sowie Lavaströme speit der seit über 2500 Jahren aktive Ätna auf Sizilien aus. Aus abwechselnden Lagen von fester Lava und lockerem Material wächst die typische Form der meisten großen Feuerberge heran: ein Schichtvulkan. Bei mächtigen Ausbrüchen können Staub und Gase sehr hoch in die Atmosphäre aufsteigen und jahrelang das Weltklima beeinflussen

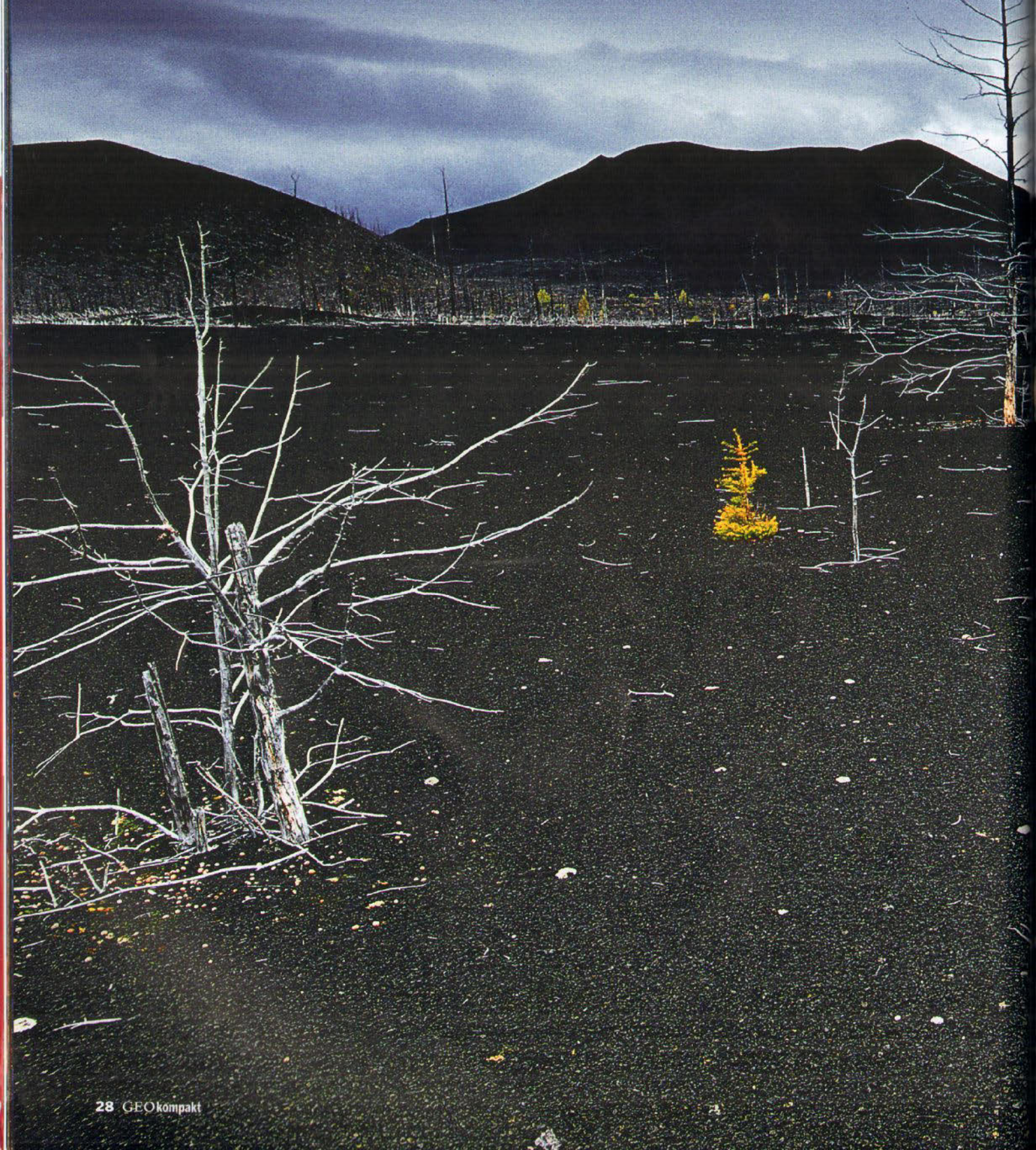




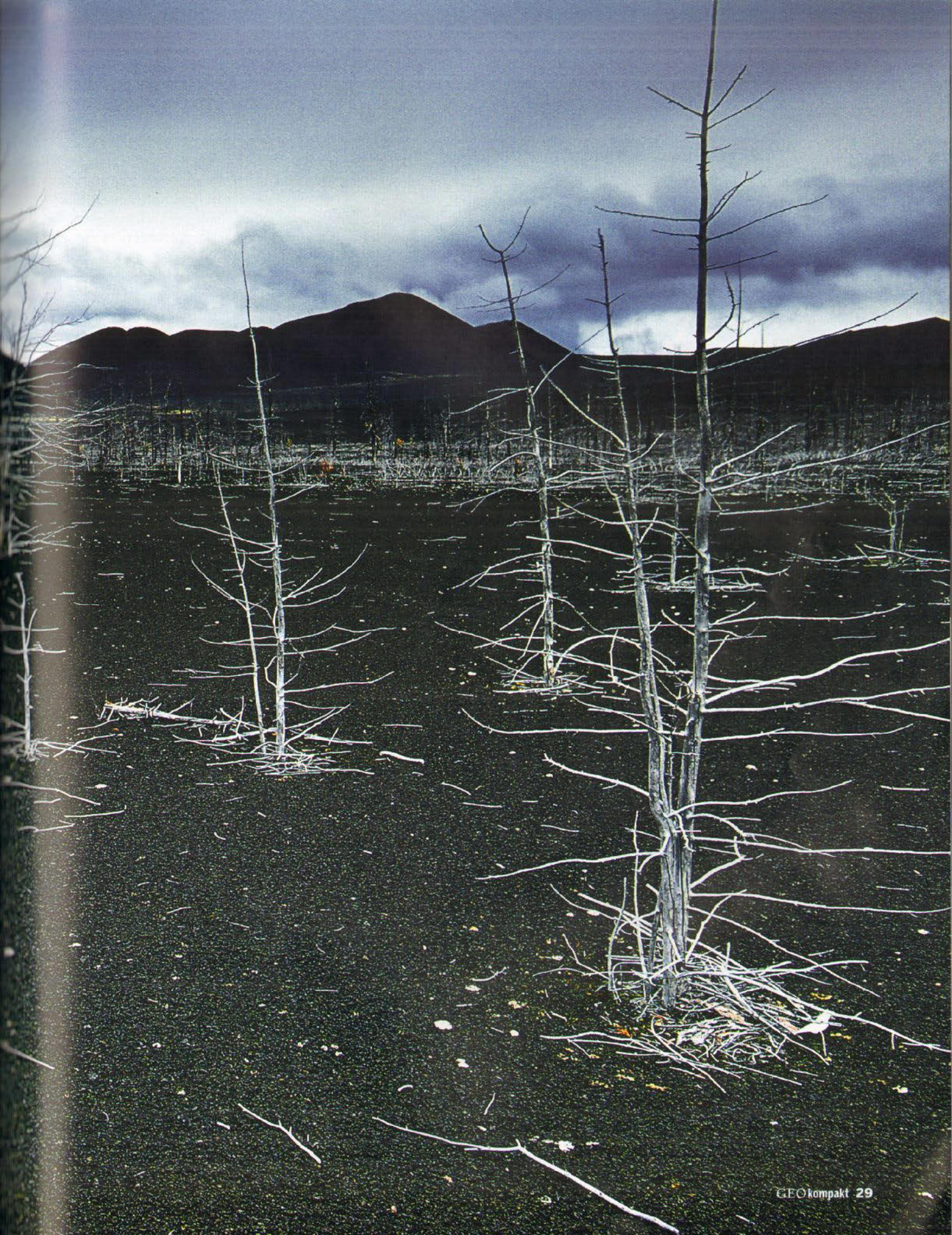




NACH EINER ERUPTION der Tolbatschik-Vulkangruppe auf Kamtschatka ist fast alles Leben in der Umgebung erloschen. Hitze und Staub haben die Vegetation verbrannt oder erstickt. Und doch triumphiert am Ende das Leben und kehrt mit frischem Grün zurück: Denn die Feuerberge fördern aus den Tiefen der Erde mineralische Nährstoffe – Katalysatoren für die Pflanzenwelt











inen Tag nach Weihnachten, am 26. Dezember 2008, schlugen die seismologischen Geräte rund um den Yellowstone-Nationalpark plötzlich vermehrt aus. Viel häufiger als sonst. Gewöhnlich halten sie maximal 3000 Minibeben pro Jahr fest, doch nun sind es 500 in einer Woche.

Nur wenige Menschen sind in diesen dunklen Wintertagen im Nationalpark unterwegs, doch ohnehin sind die meisten Stöße so schwach, dass Besucher sie nicht bemerken. Ein Grummeln, tief in der Erde. Die Instrumente aber fangen es auf und leiten

die Daten 500 Kilometer weiter südlich an die Universität von Utah, wo Geologen sie so schnell wie möglich auswerten.

Teile ihrer Arbeit sind über das Internet öffentlich zugänglich, und so dauert es nicht lang, bis erste nervöse E-Mails bei Jake Lowenstern, dem verantwortlichen Forscher im Park, eintreffen: Droht eine größere Gefahr? Evakuierungsgerüchte kommen auf. Sie sind unbegründet, doch selbst wenn sie es nicht wären – wohin könnte man gehen?

Drei Millionen Menschen besuchen jährlich Amerikas ältesten Nationalpark. Sie fotografieren die Bisons und Wapiti-Hirsche, die hier umherstapfen, und hoffen, Grizzlybären, Wölfe oder Luchse zu erspähen. Doch vor allem kommen sie wegen der Geysire, der brodelnden Schlammflöcher, der kochend heißen Quellen.

An mehr als 10 000 Stellen im Park blubbert, dampft und stinkt es oder schießt Wasser bis zu 100 Meter hoch aus dem Grund. So unwirk-

lich und feindselig wirkte die Landschaft, dass man an die Hölle und das jüngste Gericht denken müsse, bekannte ein Pionier des 19. Jahrhunderts.

Er ahnte nicht, wie nah er der Wahrheit damit kam.

**DENN IN** Yellowstone schlummert ein Monster biblischen Ausmaßes. Rund acht Kilometer unter den Füßen der Besucher liegt eine der gewaltigsten Magmakammern der Welt. Mit einer Ausdehnung von 2500 Quadratkilometern ist sie etwa so groß wie Luxemburg, dazu acht Kilometer dick und gefüllt mit einem mehr als 800 Grad hei-

ßen Gemisch aus Gas, flüssigem und festem Gestein. Kurz: Yellowstone ist nichts anderes als – ein Vulkan.

Aber kein gewöhnlicher. Einen Kegel sucht man hier vergebens, auch ein Krater scheint zunächst nicht sichtbar. Lange waren es nur die meterhohen Ascheablagerungen und das heiße Geblubber allenthalben, das Geologen aufmerksam machte. Jahrelang vermaßen und analysierten sie das Gestein, bis Satellitenfotos bestätigten, was vom Boden schwer zu erkennen war: Weite Teile des Parks sowie Gebiete darüber hinaus – insgesamt etwa 4000 Quadratkilometer – bilden den Krater eines Vulkans.

Oder besser gesagt: eines „Supervulkans“.

Seinen bisher mächtigsten Ausbruch erlebte er vor 2,1 Millionen Jahren. Gut 2500 Kubikkilometer Geröll und Material (Magma genannt, wenn es im Erdinneren steckt, Lava, sobald es den Vulkan verlässt) spuckte er damals aus. Das entspricht einem Würfel von 13,5 Kilometer Kantenlänge. Größer als der Mount Everest – und genug Material, um ganz Deutschland sieben Meter tief zu begraben.

Die Explosion muss die Kraft mehrerer Hunderttausend Hiroshima-Bomben gehabt haben. Gut 30 Kilometer hoch katapultierte sie Asche, Gase und Wasserdampf in die Stratosphäre. Die Auswurfsäule war so mächtig, dass Gewitter darin tobten. Noch am Pazifik im Westen und am Mississippi im Osten regnete es Asche. Flüsse aus Lava sowie rasend schnelle Feuerwalzen aus Gas und glühenden Gesteinspartikeln wälzten sich bis zu 130 Kilometer weit ins Umland. Was ihnen im Weg stand, verbrannte.

Als das Inferno erstarb, hatte sich eine Fläche so groß wie Schleswig-Holstein in eine Mondlandschaft aus heißem Fels, Schlamm und Geröll verwandelt. Teils türmte sich das Material 760 Meter hoch auf, wie umfangreiche Bodenvermessungen und Gesteinsanalysen ergaben.

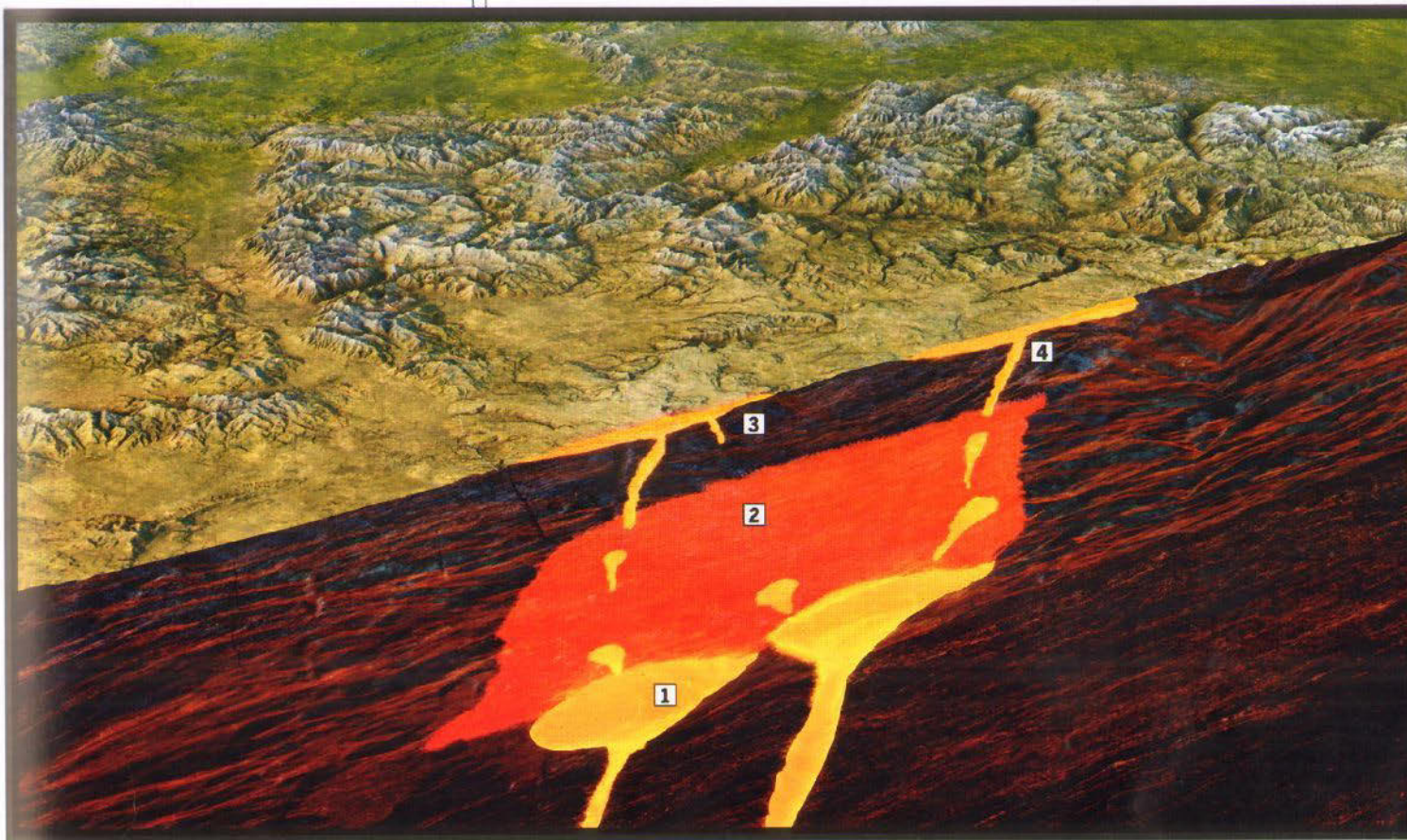
Vor 1,3 Millionen sowie vor 640 000 Jahren brach der Vulkan erneut aus und verteilte dabei noch einmal insgesamt halb so viel Lava und Asche in der Landschaft. Seither haben rund 80 kleinere Eruptionen den Kessel so weit gefüllt, dass die meisten Yellowstone-Besucher gar nicht gewahr werden, in einem Vulkan zu stehen.

Zu dem letzten (im Vergleich zu den drei Supereruptionen jedoch harmlosen) Ausbruch kam es vor 70 000 Jahren. Doch nicht nur die Beben vom Dezember zeigen, dass



**VOR 640 000 JAHREN** verwandelte ein gigantischer Vulkanausbruch das Gebiet des heutigen Yellowstone-Nationalpark in eine fahle Mondlandschaft. Aus dem Krater flossen mindestens 27 Lavaströme. Asche bedeckte weite Teile Nordamerikas (braune Fläche) mit einer bis zu 30 Zentimeter starken Schicht





UNTER DEM YELLOWSTONE-NATIONALPARK im Nordwesten der USA liegt in rund acht Kilometer Tiefe eine mächtige, zweigeteilte, trichterförmige Magmakammer (1), die sich jedes Jahr vergrößert und über der das Gestein weiträumig glüht (2). Hier schlummert ein Supervulkan, dessen Ausbruch jede bislang in der Historie beschriebene Eruption bei Weitem übertreffen würde. Geologen registrieren beunruhigende Signale. Unter dem Druck des Magmas hat sich die Erdoberfläche in jüngster Zeit immer wieder angehoben: bis zu sechs Zentimeter jährlich. Direkt unter der Oberfläche haben sich der Mallard-Lake-Dome (3) und der Sour-Creek-Dome (4) – erstarrte Lavaströme – gebildet

der Vulkan noch immer aktiv ist. Am 17. August 1959 rüttelte die Erde im Park so heftig, dass 28 Menschen starben – 19 bei einem Bergsturz, der so mächtig war, dass man die Leichen nie fand. Und 1989 schoss eine hydrothermale Explosion Felsbrocken 60 Meter in die Luft.

Messungen zeigen, dass sich der Boden des Parks hebt und senkt wie der Brustkorb eines Riesen. Mal sind es neun Millimeter pro Jahr, dann wieder 14, und jüngst waren es sogar sechs Zentimeter – so viel wie noch nie seit der Aufnahme systematischer Messungen.

Es ist für Geologen keine Frage, dass der Yellowstone-Vulkan wieder ausbrechen wird. Offen ist nur, wann. Und wie heftig.

**Ein 800 Grad heißes  
Gemisch aus Gas,  
flüssigem und festem  
Gestein brodeln unter  
dem Yellowstone-Park**

Vulkane sind Orte auf unserem Planeten, an denen dessen äußere Schicht – die rund 100 Kilometer dicke Erdplatte, auf der wir leben – aufreißt und das Erdinnere in Form glühenden Magmas hervorquillt. Weltweit kennen Geologen rund 1000 solcher Regionen (weit mehr liegen vermutlich in den Tiefen der Ozeane).

Manche Vulkane brechen alle 20 Minuten aus, so wie der auf der italienischen Insel Stromboli. Andere liegen Jahrtausende still und verwüsten dann mit einem Knall ganze Landstriche, wie das Monstrum vom Yellowstone-Park. Und noch immer entstehen neue.

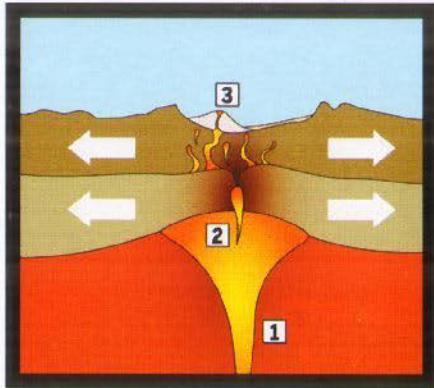
Am 20. Februar 1943 verbrannte der Bauer Dionisio Pulido gerade Pflanzenreste auf seinem Maisfeld in der Nähe des Dorfes Paricutin, 300 Kilometer westlich von Mexiko-Stadt, als die Erde vor ihm mehrere Meter weit aufplatzte. „Ich fühlte Donner, die Bäume zitterten, und dann sah ich, wie in dem Loch der Boden um mehr als zwei Meter answoll. Es qualmte und piff und stank nach Schwefel“, erzählte der schockierte Bauer später.

Innerhalb einer Woche türmte sich der neue Vulkan gut 100 Meter auf, und im Verlauf der folgenden Monate überflutete er zwei nahe gelegene Dörfer mit Lava. Nach neun Jahren (er maß



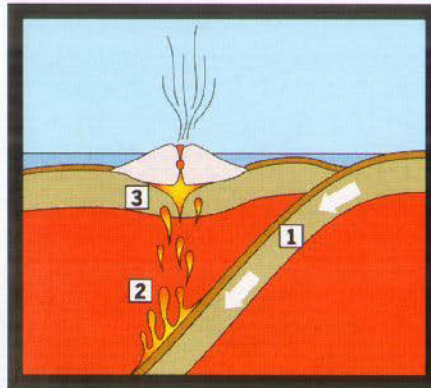
## WO DIE VULKANE ENTSTEHEN

Feuerberge bilden sich überall dort, wo heißes Magma an die Erdoberfläche dringt



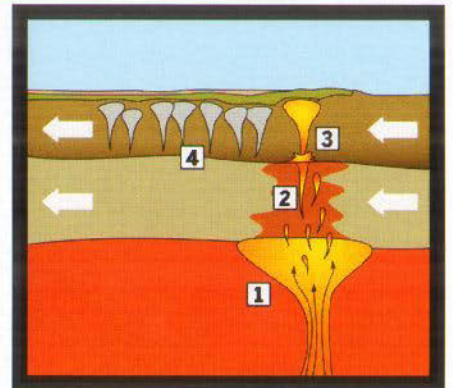
### A. PLATTEN WEICHEN AUSEINANDER

Die meisten Vulkane entstehen an den Grenzen zweier Erdplatten. Bewegen sich diese auseinander – zurzeit im Ostafrikanischen Grabenbruch zu beobachten –, kann heißes Gestein aus der Tiefe des Erdmantels aufsteigen (1), sich als flüssiges Magma durch die Bruchzone zwischen den Platten schieben (2), an die Oberfläche gelangen und dort Vulkanismus und Erdbeben auslösen (3)



### B. EINE PLATTE GLEITET IN DIE TIEFE

Schiebt sich eine ozeanische Platte (1) unter eine andere Platte, trägt sie wasserhaltiges Material in die Tiefe. Durch die Hitze dort steigt das Wasser auf, und Material des Erdmantels schmilzt zu Magma, das ebenfalls nach oben strebt (2). Es durchdringt die Platte (3) und bricht als Vulkan aus. Auf diese Weise sind unter anderem Japan und die Marianen-Inseln entstanden



### C. HOTSPOT-VULKANISMUS

Aus dem Erdinneren steigt heißes Gestein zu einem »Hotspot« (1) auf und schmilzt darüber zu Magma (2). Dringt es bis an die Oberfläche (3), können Vulkane ausbrechen. Da sich die Platte mit der Erdkruste im Lauf von Jahrmillionen bewegt, verschiebt sich auch die vulkanisch aktive Region. In Yellowstone um jährlich 25 Millimeter. Zurück bleiben erkaltete Magmakammern älterer Vulkane (4)

nun 424 Meter) stoppte der Ausbruch so unvermutet, wie er begonnen hatte.

Mehr als 90 Prozent der Vulkane liegen an den „Nahtstellen“ tektonischer Platten – vor allem dort, wo sich diese Platten aufeinander zubewegen und sich eine unter die andere schiebt. Dabei erwärmt sich die Oberfläche der abtauchenden Erdkruste, und eingeschlossenes Wasser steigt auf (siehe Illustration oben).

Es sorgt über einen komplizierten chemischen Prozess dafür, dass das Mantelgestein schmilzt – Magmakammern entstehen, die sich dann durch Vulkanausbrüche entleeren.

Dieser Prozess hat beispielsweise zur Bildung des Pazifischen Feuerrings geführt: eines Vulkangürtels, der sich von der Westküste Süd- und Nordamerikas über den Aleutengraben im nördlichen Pazifik und entlang der japanischen Ostküste bis hinunter nach Australien zieht.

Auch in Regionen, wo zwei Platten voneinander wegtreiben, entstehen häufig Vulkane. Denn in die Risse strömt heißes Material aus tieferen Schichten der Erde und schmilzt, da durch die Druckentlastung der Schmelzpunkt des Gesteins herabgesetzt wird.

Und dann gibt es noch die „Hotspots“. Geologen vermuten, dass es sich dabei um Orte handelt, an denen aus großer Tiefe heißes Material aufsteigt wie die Flamme eines Bunsenbrenners. Weltweit existieren knapp 50 dieser Aufwallungen. Viele von ihnen liegen seit Millionen von Jahren an der jeweils gleichen Position im Erdmantel. Weil die Erdkruste in dieser Zeit über sie hinwegwanderte, schuf das aus ihnen hervorströmende Material oft ganze Ketten von Vulkaninseln, etwa die von Hawaii oder Galápagos.

Eine besonders junge Hotspot-Insel entstand 1963 vor der Küste Islands. Innerhalb von nur dreieinhalb Jahren wuchs hier eine fast drei Quadratkilometer große Felskuppe aus dem Ozean, die heute den Namen Surtsey trägt.

Manche Forscher glauben, dass die mineralstoffreichen Schloten von Unterwasser-Vulkanen jene Orte waren, an denen einst vor 3,5 Milliarden Jahren das Leben entstand. Gleichzeitig aber zählen Feuer speiende Berge zu den tödlichsten Gefahren auf diesem Planeten.

Und Supervulkane sind sogar derart gefährlich, dass sie mit einer einzigen Eruption ein weltweites Massensterben einleiten könnten. Neben dem Vulkan von Yellowstone haben Geologen mittlerweile rund ein Dutzend weitere gefunden, etwa in Indonesien, Kalifornien, Neumexiko und in den Anden. Bisher brachen sie 47-mal aus. Was das bedeutet, mussten viele Lebewesen und auch der Mensch schon erfahren.

**1977 MACHTE EIN** Paläontologe namens Mike Voorhies im US-Bundesstaat Nebraska eine seltsame Entdeckung. In einer Vertiefung fand er prähistorische Asche und darin 200 fossile Tierskelette. Nashörner waren darunter, drei Arten von Kamelen, drei Arten mehrzelliger Pferde sowie ein säbelzahnbestückter Hirsch mit einem Schultermaß von nur 45 Zentimetern. Wo die Tiere lagen, hatte sich einst ein Wasserloch befunden, und sie waren vor rund zwölf Millionen Jahren innerhalb kurzer Zeit gestorben.



In Nebraska gab es damals aber keine Vulkane. Schließlich erkannten die Geologen, dass die Asche aus Idaho stammte – 1600 Kilometer entfernt. Dort war jener Hotspot, der heute aufgrund der tektonischen Bewegung der Nordamerikanischen Erdplatte unter dem Yellowstone-Park liegt, in einer frühen Supereruption ausgebrochen.

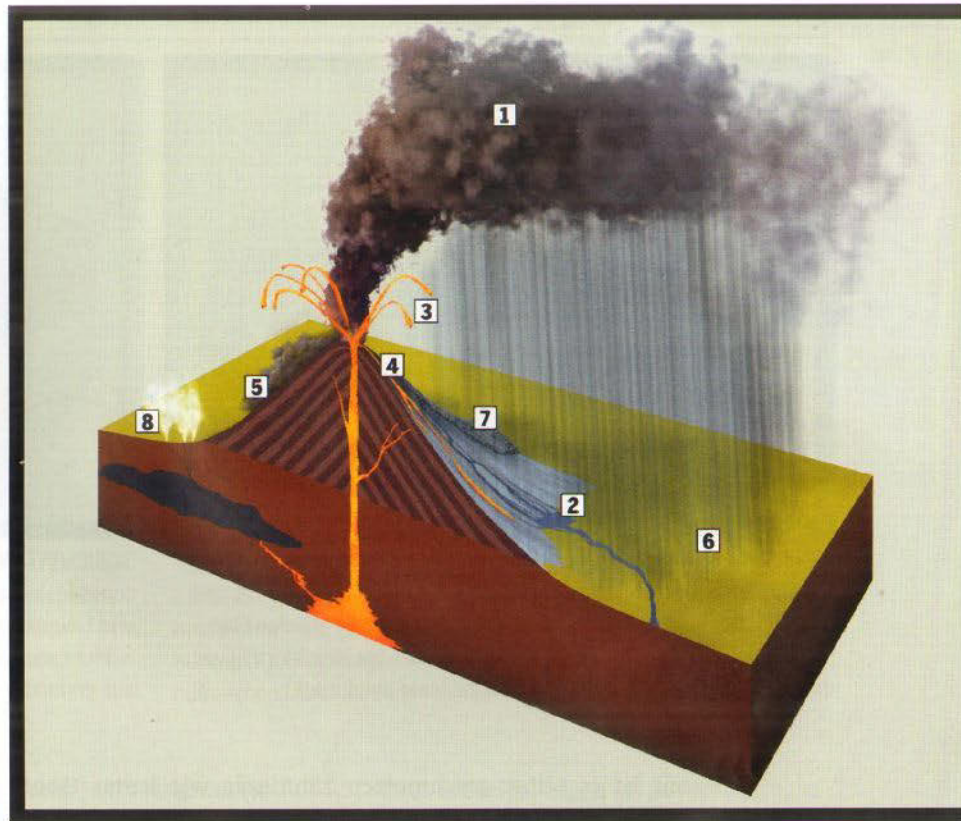
Veränderungen an den Knochen der Tiere signalisierten Sauerstoffmangel und verrieten dadurch, wie sie gestorben waren: Sie hatten glasscharfe Aschepartikel eingeatmet, die der Wind heranblies, und sich damit die Lungen zerfetzt. Über Wochen waren sie gewissermaßen an ihrem Blut erstickt und schließlich auf der Suche nach letzter Linderung an dem Wasserloch verendet.

Ein ähnliches Schicksal erlitten vor rund 74 000 Jahren vermutlich auch viele unserer eigenen Vorfahren. Damals brach auf der indonesischen Insel Sumatra ein Supervulkan mit noch mehr Macht aus als der von Yellowstone. Die Explosion riss einen etwa 100 Kilometer langen und 30 Kilometer breiten Kessel auf, der heute vom Tobasee gefüllt wird. Knapp 3000 Kubikkilometer Vulkangeröll und Asche verteilten sich über die Region.

Womöglich wurde auch das größte Massenaussterben der Erdgeschichte von Supervulkanen ausgelöst: Vor rund 250 Millionen Jahren gingen bei einer gigantischen Katastrophe rund 70 Prozent aller Arten von Landlebewesen und etwa 90 Prozent der Meerestier-Spezies unter, wie Wissenschaftler anhand von Fossilienverteilungen herausgefunden haben. Und genau in jener Zeit brach ein Supervulkan durch die Erdoberfläche, überflutete große Teile Sibiriens (etwa die doppelte Fläche Europas) mit Lava und löste vermutlich einen dramatischen globalen Klimawandel aus, der völlig neue Umweltbedingungen schuf und so für viele Tierarten den Tod bedeutete.

**DIE INTENSITÄT** eines Ausbruchs definieren Forscher auf einer Skala von null bis neun (wobei jede Eruptionsstufe um eine Zehnerpotenz mächtiger ist als die jeweils niedrigere), und wie eine Eruption in diesem System bewertet wird, hängt weitgehend von zwei

**Vor 250 Millionen Jahren  
hat eine Super-Eruption  
vermutlich das größte  
Massensterben der Erd-  
geschichte ausgelöst**



**DIE TÖDLICHEN GEFAHREN:** Bei einem Vulkanausbruch können Aschewolken (1) Flugzeuge gefährden und das Klima beeinflussen. Schlammlawinen bilden sich, wenn heißes Gestein Eis schmelzen lässt (2). Gesteinsfragmente schießen aus dem Vulkanschlot (3). Lavaströme walzen alles nieder (4). Pyroklastische Ströme aus Gas und Gesteinspartikeln lassen Lebewesen keine Chance (5), Asche bedeckt den Boden (6). Hangrutsche lösen Schuttlawinen aus (7), und Wasserdampf entweicht an Fumarolen aus der Erde (8)

Faktoren ab: von der Menge an ausgestoßenem Material sowie von der Höhe der Rauchsäule.

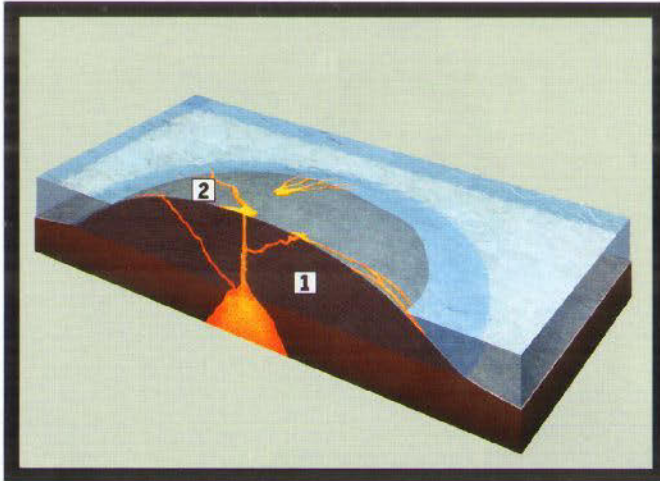
Die Stärke einer Vulkanexplosion wird vor allem durch die Zusammensetzung des Magmas beeinflusst. Je zähflüssiger das Magma ist und je reicher an Gasen, desto heftiger fällt die Eruption aus.

Der Kilauea auf Hawaii etwa blubbert seit Jahrzehnten täglich Lava mit der Eruptionsstärke null hervor, weil die dort aufsteigende basaltische Gesteinsschmelze, hervorgerufen durch einen Hotspot, nicht nur dünnflüssig, sondern zusätzlich gasarm ist.

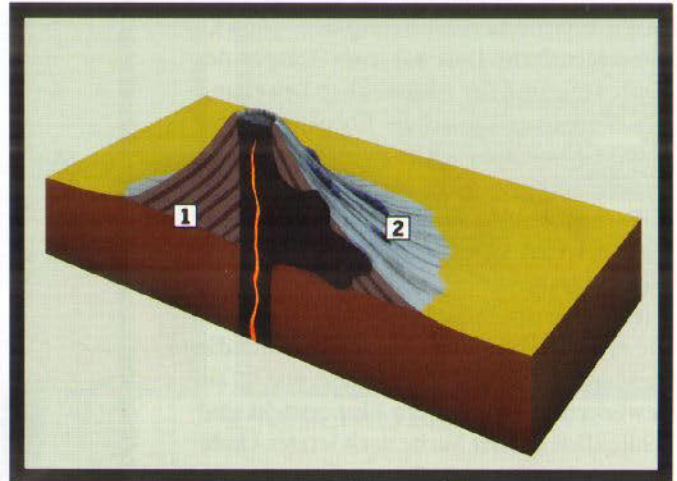
Das beeinflusst auch die Gestalt des Berges: Der Kilauea ist ein *Schildvulkan* mit extrem sanft geschwungenen Flanken, da sich die Lava aufgrund ihrer Konsistenz großflächig verbreiten konnte. Seine Hänge setzen sich bis in eine Tiefe von fünf Kilometern unterhalb des Meeresspiegels fort (siehe Illustration Seite 34).

Kegelförmige Vulkane – von Experten unterteilt in die kleineren *Schlackenkegel*, deren Flanken nur aus Lockermaterial bestehen, und in die großen *Schichtvulkane*, deren Hänge abwechselnd aus Lava und Gesteinsfragmenten aufgebaut sind – entstehen an Orten, an denen das Gestein reich an Quarz ist.





**SCHILDVULKANE** bilden sich nach und nach aus den Ablagerungen oft Tausender von Lavaströmen (1). Die Lava ist basaltisch und damit dünnflüssig: Sie quillt aus einem Zentralkrater sowie aus den Flanken (2). Über viele Kilometer verteilt sich die Lava gleichförmig wie beim Mauna Loa auf Hawaii, der weit ins Meer hineinragt



**SCHICHTVULKANE** stoßen bei einer Eruption nacheinander pyroklastisches Material – heißes Gas, Asche sowie glühende Gesteinspartikel – und Lavamassen aus. So wechseln sich die Ablagerungen Schicht für Schicht ab (1). An ihren Hängen finden sich rippenartige Gänge (2) aus erstarrter Lava, die den Vulkan stützen

Damit ist es selbst geschmolzen zähflüssig wie kalter Honig und fließt gut zehnmal langsamer als die basaltische Lava der Schildvulkane. Deshalb erstarrt die quarzreiche Lava bereits nach einer wesentlich kürzeren Strecke. Das ausgeworfene Material häuft sich also in der Nähe des Schlots an – und auf diese Weise bildet sich im Lauf der Zeit die typische Vulkankegelform.

**BEVOR ES ZU EINEM AUSBRUCH** kommt, sammelt sich die Gesteinschmelze in einer meist mehrere Kilometer tief gelegenen Kammer im Boden. Das dickflüssige Magma enthält oft viele Gase – darunter Schwefelwasserstoff oder Kohlendioxid –, die wegen seiner Zähigkeit zunächst nicht entkommen können. So baut sich ein enormer Druck unter der Erdoberfläche auf. Dieser hebt den Boden zum Teil um Dutzende Meter an, bis der Gesteinsdeckel den Kräften nicht mehr standhalten kann.

Dann bricht die obere Gesteinsschicht auf, und die befreiten Gase lassen das Magma hervorschäumen wie Limonade aus einer geschüttelten Flasche. Oft schießen die Bruchstücke des Deckels mit einer Geschwindigkeit von mehreren Hundert km/h hoch in den Himmel.

Neben der Lava selbst ergießen sich aus dem Feuerberg danach häufig pyroklastische Ströme aus heißem Gas und glühenden Gesteinspartikeln, die sich mit Hurrikangeschwindigkeit die Vulkanflanke herabwälzen – so wie im Jahr 79 n. Chr. beim Ausbruch des Vesuvus, als heiße Asche und Geröll die Stadt Pompeji begruben.

Schmelzen sie dabei Schnee oder regnet es stark, können sich zusätzlich Lahare bilden: oft kochend heiße Ströme aus Asche- und Geröllschlamm mit der Konsistenz von nassem Beton. Lava, Lahare, pyroklastische Ströme, giftige Gase, Tsunamis und andere Folgen von Vulkanausbrüchen kosteten allein in den vergangenen 400 Jahren schätzungsweise 300 000 Menschen das Leben.

Viele dieser folgenreichen Ausbrüche hatten auf der Eruptionsskala eine Intensität zwischen drei und sechs. So spuckte etwa der kolumbianische Vulkan Nevado del Ruiz 1985 rund 0,01 Kubikkilometer

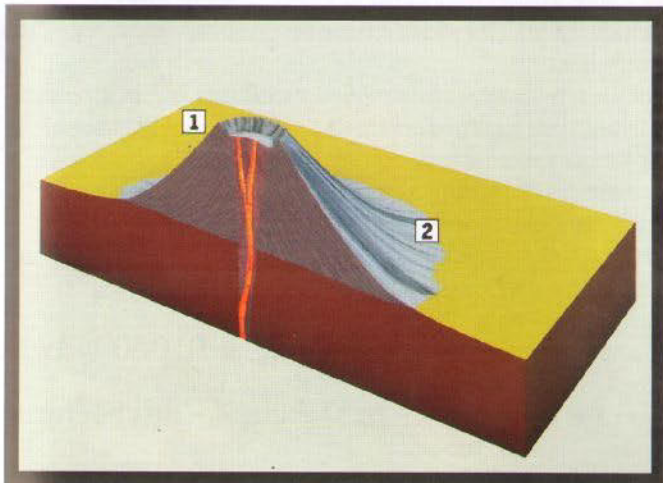
Material aus – ein Ausbruch der Klasse drei. Lahare töteten damals knapp 25 000 Menschen.

Bei der Eruption des Mount St. Helens 1980 explodierten rund ein Kubikkilometer Lava und Asche – eine Fünf auf der Intensitätsskala. Und als südlich von Sumatra 1883 der Krakatau in die Luft flog, setzte er rund 20 Kubikkilometer Erdinneres frei, ein seltener Ausbruch der Klasse sechs; 36 000 Menschen starben damals (siehe Seite 54).

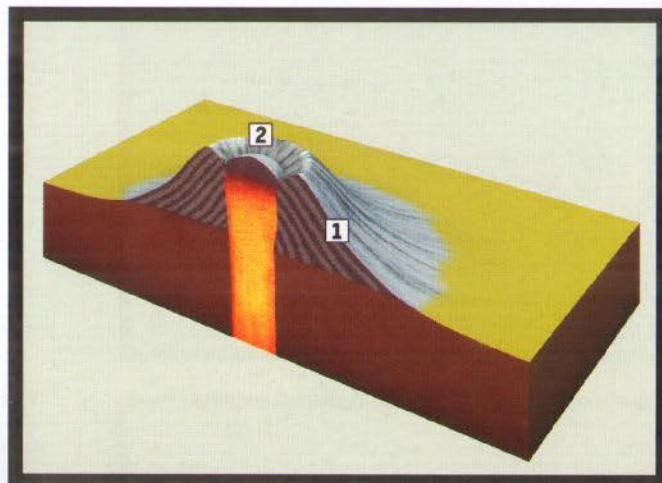
Doch auch das ist nur ein Hundertstel einer Supereruption.

Gemäß der derzeit gängigsten Definition brechen dabei mindestens 1000 Kubikkilometer Material auf einmal hervor – eine Intensität der Klasse acht. Dazu kommt es, wenn sich besonders viel zähes und mit Gas angereichertes Magma dicht unter der Oberfläche staut. Manche dieser Kammern haben bis zu 100 Kilometer Durchmesser und setzen Tausende Quadratkilometer Oberfläche unter Druck. Brechen sie schließlich großräumig auf, können pyroklastische Ströme mit solcher Gewalt hervorplatzen, dass sie eine Fläche von der Größe Ostdeutschlands in Minuten überrollen. Hat sich die Magma-kammer entleert, fällt der Gesteinsdeckel auf den Boden der Kammer und bildet einen riesigen Kessel, eine „Caldera“ (siehe Illustration Seite 36), so wie nach der Toba-Eruption vor 74 000 Jahren.





**SCHLACKENKEGEL** fördern aus ihren Schloten nur lockeres Material aus Gestein und Asche: Die größeren Trümmer lagern sich schichtweise direkt um den Krater ab, sodass der Vulkan nach jedem Ausbruch steiler aufragt (1). Die leichteren Anteile werden weit ausgeschleudert und lassen die Hänge sanft auslaufen (2)



**VULKANE MIT QUELLKUPPE** entstehen, wenn sich saure, zähflüssige Lava über dem Schlot aufstürmt, von der nur wenig seitlich über den Kraterand fließt (1). Die Kuppe verschließt den Vulkan wie mit einem Korken (2). Eingeschlossene Gase darunter sorgen für einen kontinuierlichen Druckanstieg – bis sie den Korken schließlich sprengen

**FORSCHER SCHÄTZEN**, dass der Wind nach dem Ausbruch des Toba eine 15 Zentimeter dicke Lage Asche über Indien und weite Teile Südostasiens verteilte.

Schlimmer für die damals lebenden Menschen aber war, dass jeder Vulkan Staub und Gase in die Atmosphäre schleudert, wo sie das Sonnenlicht reflektieren – und selbst deutlich kleinere Ausbrüche können das Weltklima so nachhaltig beeinflussen.

Als 1991 der Pinatubo auf den Philippinen und einen Monat später der Cerro Hudson in Chile explodierten, sank die globale Durchschnittstemperatur für zwei Jahre um ein Grad Celsius. Als Indonesiens Vulkan Tambora 1815 mit einer Kraft zwischen sechs und sieben ausbrach, schneite es

in Europa im kommenden Sommer noch im August. Etwa 10 000 Menschen starben bei der Eruption, schätzen Experten. Und vermutlich 100 000 verhungerten, weil die Ernten ausblieben.

Nach der Eruption des Supervulkans von Toba verdunkelte sich die Atmosphäre derart, dass die Durchschnittstemperaturen quer über den Globus möglicherweise mehr als

sechs Jahre lang um fünf Grad Celsius niedriger lagen als zuvor. Die Sommer wurden womöglich sogar um bis zu 15 Grad kälter. Allein in Südostasien haben die erstickende Asche und der vulkanische Winter vermutlich so gut wie alle Bäume getötet.

Untersuchungen am menschlichen Genom liefern Hinweise darauf, dass der Mensch just zu dieser Zeit einen Populationsengpass durchlaufen haben könnte. Der Anthropologe Stanley H. Ambrose von der Universität in Illinois vermutet, dass nur einige Tausend unserer Ahnen den Ausbruch des Toba und den folgenden Klimawandel überlebten, vor allem in tropischen Gefilden Afrikas.

Was aber würde eine Supereruption heute anrichten?

**BRÄCHE ETWA DER VULKAN** unter dem Yellowstone erneut so heftig aus wie vor 2,1 Millionen Jahren, würden in einem Umkreis von 100 Kilometern vermutlich nur wenige Menschen überleben. Selbst Autos wären zu langsam, um den mit bis zu 400 km/h heranrollenden pyroklastischen Strömen zu entkommen.

Noch in 200 Kilometer Entfernung fiel Asche, so dick wie Schnee. Der Himmel wäre derart verdunkelt, dass es über Tage oder sogar Wochen

selbst mittags dämmrig bliebe. Asche würde Abwasserrohre blockieren, Mobiltelefone lahmlegen und Generatoren verkleben. Auch viele Flüsse wären verstopft.

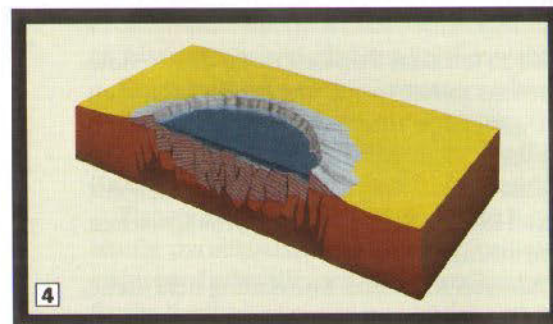
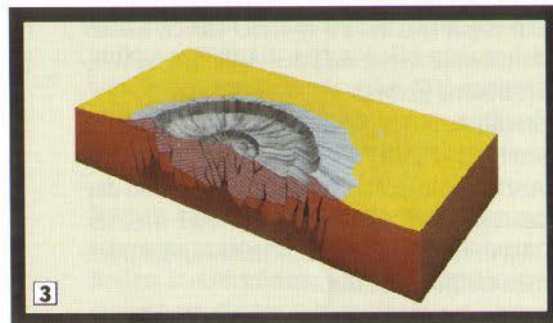
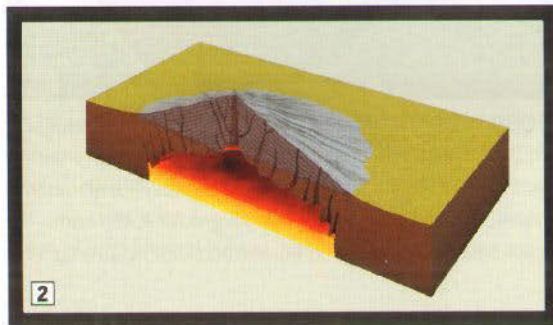
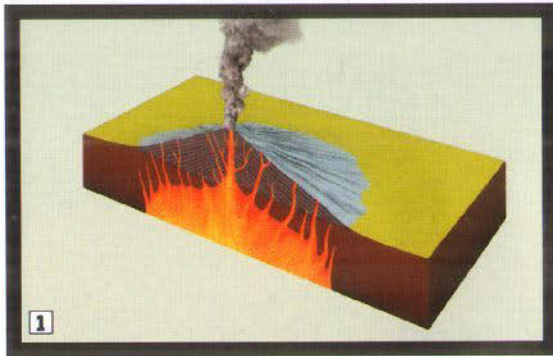
Noch 300 Kilometer entfernt läge die Asche knietief, und Häuser liefen Gefahr, beim nächsten Regen unter dem Gewicht des Wasser-Asche-Gemisches zusammenzubrechen. Der Vulkanauswurf würde die Felder der Great Plains bedecken – des Brotkorbs der USA. Farmtiere würden sterben und ohne Atemschutz auch viele Menschen.

**Dass ein Supervulkan  
ausbricht, ist fünfmal  
wahrscheinlicher als ein  
vergleichbar verheerender  
Meteoriteneinschlag**



## DAS RÄTSEL DER CALDERA

Manche Vulkane stürzen nach dem Ausbruch zusammen



CALDEREN, riesige Mulden in der Landschaft, sind die Überreste eingestürzter Magmakammern. Der Crater Lake in Oregon etwa liegt in einer Caldera. Einst wurde Lava und weißglühende Asche aus dem Vulkan Mount Mazama geschleudert (1). Eine weitgehend leere Kammer blieb zurück (2). Unter dem Gipfel brach die Kammer zusammen, ein Krater entstand (3). Mit der Zeit füllte dieser sich mit Wasser (4)

Der vulkanische Winter würde mehrere Jahre andauern und noch in fernen Ländern Ernten ruinieren. Weltweite Hungersnöte wären die Folge. Direkt und indirekt könnten mehr als eine Milliarde Menschen durch eine Supereruption sterben, vermuten Katastrophenforscher.

Vulkane mit 1000-Kubikkilometer-Eruptionen haben Geologen unter anderem auch in Argentinien, Chile, Jemen und in Neuseeland gefunden (aber keinen in Europa, selbst die Phlegräischen Felder nahe Neapel haben nicht das Potenzial für einen Stärke-acht-Ausbruch).

Den bisher größten Supervulkan – und den einzigen mit der Ausbruchstärke neun – haben Forscher im Südwesten Colorados entdeckt. Ascheablagerungen zeigen, dass aus der La-Garita-Caldera vor knapp 28 Millionen Jahren 5000 Kubikkilometer Magma in die Luft flogen: doppelt so viel wie bei dem größten Ausbruch des Yellowstone-Feuerbergs.

Viele dieser Vulkane sind bis heute aktiv. Glücklicherweise aber sind Supereruptionen relativ selten. Nur alle 100 000 Jahre müsse die Welt damit rechnen, kalkulierte kürzlich die Geologische Gesellschaft von London. Andererseits jedoch sei die Wahrscheinlichkeit

fünfmal größer als die des Einschlags eines großen Meteoriten, der die Zivilisation gefährden würde.

Langfristig sei eine Supereruption „unvermeidlich“, schreibt die Geologische Gesellschaft. „Sie kann in 10 000 Jahren passieren – oder morgen. Und im schlimmsten Fall wird sie unsere ganze Spezies bedrohen.“

Verhindern können die Menschen das nicht. Es ist noch nicht einmal sicher, ob sich eine Supereruption

präzise vorhersagen lässt. Würde der Vulkan zuvor monatelang beben und sich verformen, wie viele Geologen glauben? Oder ginge vielleicht doch alles so schnell, dass keinerlei Vorkehrungen, etwa großflächige Evakuierungen, getroffen werden können?

Zumindest in Yellowstone scheint sich die Lage zunächst wieder beruhigt zu haben. Nach 813 Erdstößen beendete der Vulkan Anfang Januar sein exzessives Rumoren. Nun zittert und bebt er wieder normal. Der Gigant schläft.

Aber niemand weiß, wie lange.

□

### MEMO | VULKANE

#### MEHR ALS 90 PROZENT

der Vulkane liegen an der Nahtstelle zweier Erdplatten.

**VOR DEM AUSBRUCH** sammelt sich Magma in der Kammer.

**DIE STÄRKE** einer Explosion hängt ungefähr vom Gehalt an Gasen ab.

**ERUPTIONEN** können das Weltklima nachhaltig beeinflussen.

**SUPERVULKANE** brachen bislang 47-mal aus.

Ute Eberle, 37, ist Wissenschaftsjournalistin in Leiden, Niederlande.

**Literatur:** Greg Breining. „Super Volcano. The ticking time bomb beneath Yellowstone National Park“, Voyageur Press.



# LAST-MINUTE-ANGEBOT

Nur bis zum 31.08.2009

**Gratis  
zur Wahl!**



## Sammelbox + »Das Abenteuer Technik«

Diese praktische Sammelbox schützt Ihre wertvolle Sammlung vor Staub und gibt bis zu 7 Hefen einen sicheren Stand. Gratis dazu erhalten Sie die Ausgabe »Das Abenteuer Technik«.

## Bergmann Uhr »1960«

Mit Qualitäts-Quarzwerk, fluoreszierenden Zeigern und Datumsanzeige. Creme-farbenes Zifferblatt mit aufgesetzten Metall-Stegen. Einzelnummerierung. PU-Lederarmband und gewölbtes Mineralglas. Ø ca. 35 mm.

## 3-tlg. Faber-Castell Schreibset »Black Edition«

Dieses edle Schreibset enthält den Kugelschreiber »Grip«, den Design-Bleistift »Grip 2001« aus schwarz durchgefärbtem Holz und den Radierer »Sleeve Mini«. In einer schwarzen Box mit transparentem Deckel.

## reiselthel Reisekosmetiktasche

Praktische Reisebegleiterin: Mit Hauptfach aus luftigem Netzgewebe mit 1+3 Stecktaschen, 2 Reißverschluss-Taschen im Deckel und Haken zum Aufhängen. Maße 23x10x21 cm.

# GEOkompakt zum einmaligen Sparpreis - schnell über 14 % sparen und Geschenk nach Wahl sichern!

## Ihre GEOkompakt Vorteile:

- Dankeschön zur Wahl gratis!
- Einmalige Ersparnis von über 14 %!
- Lieferung frei Haus!
- Nach 4 Ausgaben jederzeit kündbar!
- Geld-zurück-Garantie für zu viel bezahlte Hefte!

Abonnenten-Service Österreich  
Tel.: 0820/00 10 85

Geo-kompakt@abo-service.at

Leser-Service Schweiz

Tel.: 041/329 22 20

Geokompakt@leserservice.ch

Bitte Bestellnummer aus dem  
Vorteilscoupon angeben.

Weitere Angebote unter  
[www.geokompakt.de/abo](http://www.geokompakt.de/abo)

Verlag: Gruner+Jahr AG & Co KG, Dr. Gerd Brüne,  
Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, AG Hamburg,  
HRA 102257.

Vertrieb: DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH,  
Olaf Conrad, Düsternstr. 1, 20355 Hamburg,  
AG Hamburg, HRB 95 752.

\* 14 Cent/Min, aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen.

## GEOkompakt Vorteilscoupon

Ja, ich möchte GEOkompakt selbst lesen oder verschenken für zzt. nur € 7,25 je Ausgabe statt € 8,50 (D)/zzt. € 8,15 statt € 9,80 (A)/zzt. Fr. 14,20 statt Fr. 17,60 (CH). Als Dankeschön für meine Bestellung erhalte ich ein Geschenk meiner Wahl nach Zahlungseingang gratis. Nach einem Jahr kann ich jederzeit kündigen. GEOkompakt erscheint zzt. 4 x jährlich. Alle Preise inkl. Zustellung und MwSt.

Mein Geschenk: ☐ Sammelbox + Heft, ☐ Bergmann Uhr »1960«, ☐ 3-tlg. Faber-Castell Schreibset oder ☐ reiselthel Tasche (bitte nur ein Kreuz)

Meine Adresse: Bitte auf jeden Fall ausfüllen!

Name, Vorname

Straße/Nr.

Geburtsdatum

PLZ

Wohnort

E-Mail-Adresse

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner+Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

Studentenabo:

Bitte Immatrikulationsbescheinigung mitschicken!

☐ 4 Ausgaben für zzt. jährlich nur € 24,40 (D). Ich spare einmalig über 28 % gegenüber dem Einzelkauf.

645232

Ich zahle bequem per Bankeinzug:

Bankleitzahl

Kontonummer

Geldinstitut

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung beim GEOkompakt Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum

Unterschrift

645230

Adresse des Geschenkempfängers:

Nur ausfüllen, wenn Sie GEOkompakt verschenken möchten!

Name

Vorname

Geburtsdatum

Straße/Nr.

PLZ

Wohnort

645231

Dauer der Geschenklieferung:  
☐ unbefristet (mindestens 1 Jahr) ☐ 1 Jahr (4 Ausgaben)



Vorteilscoupon einsenden an:  
GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg



Oder anrufen unter:  
01805/861 80 00\*



Einfach per E-Mail:  
Geokompakt-Service@guj.de



# DER LANGE WEG ZUR ERDE

Einst ballte sich unser Planet aus Staubpartikeln zu einer gigantischen Kugel zusammen, die sich aufzuheizen begann. Nur dank dieser Gluthölle konnte sie ihre Gestalt entwickeln: durchbrachen erste Vulkane ihre dünne, erkaltete Gesteinsschale, bildete sich eine Atmosphäre, später der Ur-Ozean, formten sich Gebirge und Kontinente. Und entstand schließlich das Leben

Erde und Mond, vor 4,43 Milliarden Jahren. Zwei Glutbälle, deren Oberfläche brüchig und durch Meteoriteneinschläge aufgerissen ist. Noch gibt es keine Atmosphäre, kein Wasser, kein Leben









**Text: Bertram Weiß**  
**Illustrationen: Tim Wehrmann**

as kurze Klicken der Kamera verwandelt das Bewusstsein der Menschheit. Denn als Bill Anders den Auslöser seiner Hasselblad-500 drückt, sieht er seinen Heimatplaneten so, wie ihn niemand zuvor erblickt hat: als eine kleine, bläuliche Murrel vor dem schwarzen Nichts. Ein schimmerndes Juwel mit weißen und grün-braunen Tupfen. Ein Wunder in der Weite des Universums.

„Von hier aus gesehen, ist die Erde eine grandiose Oase“, sagt Jim Lovell später, der ebenfalls an jenem 24. Dezember 1968 auf der ersten bemannten Reise zum Mond aus dem Bullauge von Apollo 8 schaut. Gut 380 000 Kilometer sind die Raumfahrer von ihrem Startplatz Cape Kennedy entfernt, als sie als erste Menschen den Erdball als Ganzes erblicken.

In der Finsternis des Universums wirkt dieser Planet, dessen Größe, Lage und Eigenschaften einzigartig günstige Bedingungen für das Leben bieten, verloren. Der Blick aus der Ferne offenbart, wie einmalig und zugleich verletzlich das Zuhause der Menschen ist. Wie klein, obwohl es seinen Bewohnern immer so gewaltig erscheint.

Das Bild, das Bill Anders aufnimmt, wird weltberühmt. Denn bis dahin haben die meisten Menschen bestenfalls eine vage Ahnung vom Antlitz ihres Heimatplaneten.

Heute kennt jeder den Blick von oben. Die Erde ist ständig unter Beobachtung: Satelliten liefern detaillierte Aufnahmen von Meeren und Kontinenten, Wolken und Eispolen. Dabei sind dies nur kurze Momentaufnahmen in der Historie des Planeten: Denn die Gestalt der Erde verwandelt sich – ungemein langsam, aber unentwegt.

Erst vor wenigen Millionen Jahren bekam unser Heimatplanet ein Aussehen, das seinem heutigen Antlitz nahe kommt: eine Zeitspanne, die in den Dimensionen der Erdgeschichte nicht mehr ist als ein kleiner Schritt.

Der Weg dorthin war gut 1000-mal so weit.

Wer in Gedanken zum Ursprung der Erde reisen möchte, sollte seine Arme seitlich ausstrecken – denn das führt vor Augen, wie unvorstellbar lang die Zeit im Maßstab der Geowissenschaft ist: Liegt die Geburtsstunde der Erde an der äußersten Fingerkuppe der linken ausgestreckten Hand, so füllt die Entwicklung des komplexen Lebens gerade einmal die Länge der Rechten – das Zeitalter des Menschen ließe sich mit „einem einzigen Strich einer Nagelfeile auslöschen“, so der amerikanische Sachbuchautor John McPhee.

Beim Blick in diesen Abgrund der Zeit kann einen der Schwindel packen: Die ganze Strecke der Arme und die Breite der Schultern markieren jene riesige Zeitspanne,

in welcher der Planet sich formte und einmal vermutlich nur knapp der vollständigen Zerstörung entging; in der er enorme Wandlungen erlebte, bis er schließlich seine heutige Gestalt gewann.

Und dabei auf wundersame Weise Bedingungen erschuf, unter denen bis heute das Leben erblüht.

**AM ANFANG** gibt es nicht mehr als Staub. Die Biografie der Erde beginnt vor rund 4,5 Milliarden Jahren mit winzigen Materiekörnchen. Die Brösel sind Überreste jener unzähligen Sterne, die seit dem Urknall des Universums – rund neun Milliarden Jahre zuvor – entstanden und wieder verglüht oder explodiert sind. Jedes einzelne Teilchen ist Millionen Mal kleiner als ein Millimeter und besteht nur aus einigen Atomen chemischer Elemente, darunter Eisen und Magnesium, Silizium und Kohlenstoff.

Diese Winzlinge rotieren im äußeren Bereich einer Sternenanhäufung (der man dereinst den Namen „Milchstraße“ geben wird) um ein zentrales Gestirn: die Sonne. Sie ist in einer frühen Entwicklungsphase und hat ihre heutige Strahlkraft noch nicht erreicht.

Doch die Anziehungskraft selbst dieses Sternembryos ist schon so groß, dass Myriaden von Mikropartikeln ihn in einer Wolke umschwirren, statt hinaus in den Kosmos zu driften.

In diesem Urdunst verschmelzen einzelne Körnchen miteinander; immer mehr Bröckchen kommen zusammen, die wiederum mit weiteren kollidieren. Manche prallen voneinander ab, andere vereinigen sich zu Flocken, dann zu immer größeren Körpern. Für die nötige Haftung sorgen dabei chemische Verbindungen sowie eine schwache elektrische Anziehungskraft, die jedoch stark genug ist, um einzelne Teilchen aneinander zu fesseln.

Langsam, aber stetig lichtet sich die Wolke aus Sternstaub, in deren Mitte zugleich die Energieabstrahlung der Sonne zunimmt. Zurück bleiben ein paar größere Klumpen. Manche dieser „Planetesimale“ haben nach einigen Zehntausend Jahren bereits mehrere Hundert Kilometer Durchmesser.

Sie sind der Rohstoff der Erde – geboren aus Sternstaub, gewachsen aus Trümmern.

Pausenlos krachen die Kleinstplaneten aufeinander. Nach unaufhörlichen Karambolagen fügen sie sich zu mächtigeren Gebilden zusammen. Eines dieser Planetesimale, die ständig wachsen, ist die „Proto-Erde“: ein Planet im Jugendalter, noch weit vom Aussehen unseres heutigen entfernt.

Aber immerhin misst dieser Koloss nach einigen Dutzend Jahrmillionen schon 10 000 Kilometer im Durchmesser, gut drei Viertel des heutigen Erddurchmessers.

Die Proto-Erde gleicht einer gigantischen glühenden Eierkohle; kahl, zernarbt und extrem heiß. Immer neue Trümmer treffen auf den jungen Planeten; hämmern auf ihn ein, brechen Krater und Schluchten. Jeder Einschlag erzeugt weitere Hitze. Auch der radioaktive Zerfall einiger Elemente treibt die Temperatur in die Höhe.



Es wird so heiß, dass Minerale und Erze mit der Zeit schmelzen. Die Urerde verwandelt sich in einen feurigen Ball, in dem sich die glühenden Gesteinsmassen umwälzen. Die schweren Elemente – vor allem Eisen und Nickel – finden bald keinen Halt mehr in den äußeren Bereichen und sinken durch die zähflüssige Materie hinab, immer weiter, bis zur Mitte des Planeten.

Gleichzeitig steigen leichtere Elemente wie Silizium und Aluminium empor. Ein gewaltiger Vorgang, bei dem ungeheure Energiemengen freigesetzt werden, die den Glutplaneten weiter aufheizen.

Auf diese Weise ordnet sich die Proto-Erde nach und nach in Schichten unterschiedlicher Materialien und Temperaturen: ganz innen ein sehr heißer Kern aus festem Eisen, dann der äußere Kern aus flüssigem Metall und darüber ein mineralischer Mantel (siehe Seite 8).

**IM LAUF DER ZEIT** spannt sich aus der Tiefe des Erdkerns ein großer Schutzschirm auf, der fortan den Planeten umgibt: ein Magnetfeld. Denn der flüssige äußere Kern wirkt wie ein Dynamo – wie ein Gerät also, das mechanische in elektromagnetische Energie überführt.

Ströme aus Eisen, die im äußeren Erdkern permanent fließen, funktionieren wie eine Spule aus Draht, die in einem schwachen Magnetfeld rotiert. Durch die Drehung der Spule beginnt in dieser ein elektrischer Strom zu fließen, der wiederum ein (jetzt sehr viel stärkeres) Magnetfeld erzeugt.

Im Erdinneren funktioniert das so: Unter dem Einfluss der Erdrotation windet sich das Eisen schraubenförmig zu den Polen des äußeren Kerns, und je näher es diesen Polen kommt, desto mehr kühlt es ab und sinkt deshalb schließlich wieder zur Grenze des inneren Kerns zurück. Diese „Konvektionswalzen“ aus Eisen stehen also etwa in der Richtung der Erdachse: Sie erzeugen elektrischen Strom, der ein magnetisches Kraftfeld aufbaut.

Es erstreckt sich weit in den Weltraum und lenkt den Ansturm elektrisch geladener Teilchen ab, welche die Sonne in dichten Strömen ringsum ins All aussendet. Dieser „Sonnenwind“ schlägt mit solcher Wucht auf das Magnetfeld, dass er es geradezu verbeult.

Dem Sonnenwind sind auch die anderen Planeten ausgesetzt, die neben der Proto-Erde entstehen: Etwas näher am Zentralgestirn formen sich die heißen Massen von Venus und Merkur, jenseits der Erdbahn der Mars.

Zwei kleine Monde umkreisen den Roten Planeten. Womöglich hat er die Trabanten mit seiner Schwerkraft aus jenem dichten Gürtel von Gesteinsbrocken eingefangen, der die Erde sowie ihre drei Geschwisterplaneten aus Steinen und Metallen umgibt.

Hinter diesem Asteroidengürtel, noch weiter entfernt von der Sonne, sammelt sich der Großteil der leichten, gasförmigen Elemente wie Wasserstoff und Helium. Die Gravitationskraft der erdnahen Planeten reicht nicht aus, um auch diese Substanzen einzufangen – sie entweichen daher in die äußeren Regionen des Sonnensystems. Dort

kondensieren diese Gase und ballen sich wie die Staubkörner zu imposanten Gebilden zusammen: zu den Planetenriesen Jupiter und Saturn, zu Uranus und Neptun.

Noch weiter draußen, hinter Neptun, entstehen außerdem Kometen: Bälle aus Wassereis, gefrorenem Gas und Staub, die in weiten Bahnen die Sonne umkreisen. Manche dieser Vagabunden gelangen auf ihrer Reise durch das Sonnensystem bis zur Proto-Erde und bringen dem Planeten nach und nach immer mehr Wasser.

**ETWA 70 MILLIONEN JAHRE** nach ihrer Geburt fegt die Proto-Erde ihre Umgebung leer: Sie ist jetzt so groß, dass sie mit der Kraft der Gravitation alles verschluckt, was sich ihr nähert.

Allmählich verebbt deshalb das Bombardement aus dem All. Aber gelegentlich kreuzen noch immer Himmelskörper den Weg des jungen Planeten, lassen ihn nicht zur Ruhe kommen. Einer von ihnen, so eine heute von vielen Wissenschaftlern vertretene Hypothese, wird sogar zur apokalyptischen Gefahr: Ein Brocken von der Masse des Mars – etwa einem Zehntel der heutigen Erdmasse – rast mit einer Geschwindigkeit von rund 36 000 km/h auf die Proto-Erde zu. Und nur dank eines Zufalls

## Der Crash setzt die Energie von zehn Billionen Wasserstoffbomben frei

entgeht sie der Vernichtung: Denn das Himmelsgeschoss trifft den Planeten in einem relativ spitzen Winkel. Eine winzige Veränderung des Aufprallwinkels – und die junge Erde wäre zerborsten wie eine Porzellankugel.

Der Zusammenstoß ist dennoch heftig genug, um die Energie von zehn Billionen Wasserstoffbomben freizusetzen. Ein riesiger Lichtblitz flammt auf und überstrahlt selbst die Leuchtkraft der Sonne.

Dies ist der Schöpfungstag des Planeten „Erde“.

Der Aufprall reißt große Teile aus der Proto-Erde heraus, lässt die Trümmer verdampfen und schleudert die Gesteinsschwaden zusammen mit Splintern des eingeschlagenen Brockens weit ins All. Eine mehrere Tausend Grad heiße Wolke aus Gasen und Gestein driftet um den beschädigten Planeten.

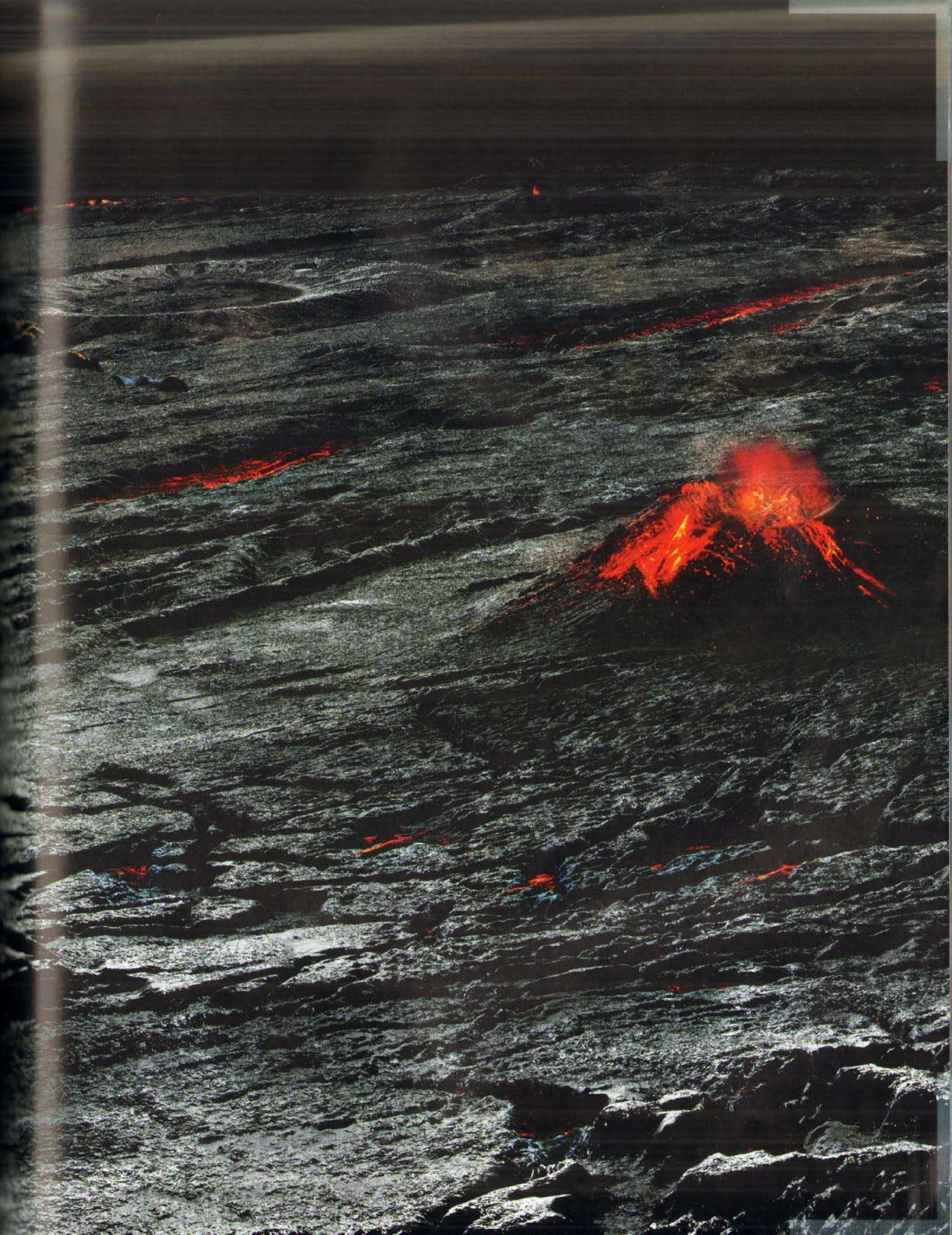
Darin werden nun die gleichen Kräfte wirksam, die einst die Proto-Erde aus Sternenstaub formten: Die Partikel ballen sich in unzähligen Kollisionen zusammen,



Feuerberge in der inzwischen etwas erkalteten Erdkruste speien vor 4,4 Milliarden Jahren Gase aus dem Inneren des Planeten an die Oberfläche. Kohlendioxid, Stickstoff, Schwefelverbindungen und Wasserdampf bilden die Ur-Atmosphäre









und bald dominiert ein Brocken die anderen. Dieser verschmilzt mit immer mehr Klumpen, bis er nach einigen Monaten ganz allein die Erde umkreist.

Der Mond ist aufgegangen.

Anfangs kreist der Trabant, der im Verhältnis zur Erde so groß ist wie ein Tennisball zu einem Basketball, in nur 20 000 Kilometern Abstand. Aber nach und nach driftet er weiter ins All hinaus: Denn der Mond sorgt durch die Gezeiten, die er mit seiner Schwerkraft auf der Erde erzeugt und die wie ein Bremsklotz wirken, kontinuierlich für eine Verlangsamung der Erdrotation.

Den „Schwung“, den die Erde dabei verliert, überträgt sie auf den Trabant, der wie eine Gondel an einem anfahrenen Kettenkarussell langsam davonzieht.

Heute hat der Mond eine Entfernung von rund 380 000 Kilometern zur Erde erreicht. Und Jahr für Jahr treibt er um knapp vier Zentimeter weiter fort. Erst wenn die Erde so langsam rotiert, dass sie für eine vollständige

tige Voraussetzung dafür, dass Leben entstehen und sich erhalten kann. Doch bis dahin vergeht noch viel Zeit.

Nach dem Einschlag und der darauffolgenden Entstehung des Mondes ist die Erde zunächst noch eine lebensfeindliche Gluthölle. Die Kollisionsenergie hat den gesamten Gesteinsmantel des Planeten verflüssigt. Nur der metallische Kern ist weitgehend unversehrt geblieben.

Das Trommelfeuer von Trümmerresten, durch das die Masse des Planeten stetig zunimmt, lässt nun allmählich nach. Dennoch bleibt die Bedrohung aus dem Weltraum immer bestehen: Heute, so schätzen Forscher, trifft eine außerirdische Bombe von einem Kilometer Durchmesser im Schnitt einmal in einer Million Jahren auf die Erde.

Als der Brockenschauer schwächer wird, kühlt die Oberfläche des Planeten allmählich ab und erstarrt an der Grenze zwischen dem flüssigen Gestein, dem Magma und dem kalten Raum des Universums.

Fragile Flöße aus Basaltgestein entstehen, die auf den wabernden Ozeanen aus glühender Magma dahintreiben. Schließlich überzieht die Kruste den glutflüssigen Untergrund wie Haut auf einer heißen Schokolade.

Noch ist die Hülle zerbrechlich: Wieder und wieder reißen Spalten und Krater auf, durch die Magma in heftigen Vulkanausbrüchen hervorquillt. Feurige Lavaströme wälzen sich brodelnd über die basaltische Erdkruste. Türmen sich auf und modellieren eine bizarre, dunkle Felsenlandschaft. Vielerorts eher zäh wie Teer als fest wie Gestein.

In dieser Hexenküche entsteht die erste Atmosphäre. Denn mit der flüssigen Glut strömen auch Gase aus dem Untergrund empor. Über unzähligen Vulkanen stehen nun hohe Säulen aus Kohlendioxid, Stickstoff und Schwefelverbindungen. Sie treiben auch Wasserdampf in die Höhe, der aus dem Gestein frei wird.

Zunächst ist diese Ur-Atmosphäre nicht mehr als ein Hauch, der über die glühenden Schlote und Schlackeflächen weht. Aber unaufhaltsam wallen Gasschwaden aus dem Untergrund hervor, bis sie als extrem dichte und heiße Dampf Wolken den gesamten Globus bedecken.

Die Gashölle verändert den Planeten: Sie wirkt als Schutzschild gegen kleinere Geschosse aus dem All, aber auch gegen lebensfeindliche Anteile der Sonnenstrahlung.

Zudem hält sie die Temperaturen an der Oberfläche relativ konstant – zusammen mit dem Mond verhindert sie jene massiven Temperaturschwankungen, die auf anderen Himmelskörpern ohne Atmosphäre üblich sind.

**ALS SICH DIE ERDE** im nachlassenden Trümmerhagel abkühlt, verflüssigt sich der Wasserdampf in der Atmosphäre. Hoch oben kondensiert er zu Tropfen, die den Planeten in dichten Wolken umwehen und schließlich als Regenschwall herabrauschen.

Dies ist nur möglich, weil sich der Planet in einem idealen Abstand zur Sonne befindet: rund 150 Millionen Kilometer entfernt. Nur wenig näher an dem heißen Stern – und alles Wasser würde verdampfen. Nur etwas weiter entfernt – und es würde vollständig gefrieren.

## Jahrmillionenlang regnet es ohne Pause – bis ein Ozean entstanden ist

Drehung um die eigene Achse etwa einen Monat benötigt, wird der Mond eine stabile Entfernung erreichen. In diesem Endzustand wird unser Heimatplanet dem Mond dann immer die gleiche Seite zuwenden.

Ohne den Mond sähe es auf der Erde anders aus: Nach dem mächtigen Streifschuss aus dem All prägt der steinerne Begleiter nämlich entscheidend die weitere Entwicklung des jungen Planeten: Der Mond bremst nicht nur die Rotationsgeschwindigkeit der Erde, sondern stabilisiert auch ihre Bewegung im All.

Denn wie die meisten anderen Himmelskörper wirbelt unser Planet um eine Achse, die aufgrund des heftigen Trümmerhagels der ersten Jahrmillionen leicht gegen die Ebene geneigt ist, in der er die Sonne umkreist.

Gefangen in unendlichen Pirouetten, würde diese Achse unter dem Einfluss der Sonne ihre Ausrichtung im Raum ändern.

Gemeinsam bilden Mond und Erde jedoch wie Hammer und Hammerwerfer ein Tandem: Der Trabant sorgt für eine Art Gegengewicht, das die Drehachse des Planeten recht stabil hält und dessen Bewegung verlangsamt.

Nur so vermag sich auf der Erde nach und nach ein beständiges und gemäßigtes Klima zu entwickeln – wich-



Anfangs aber erreicht der Wolkenbruch nicht den Erdboden: Die tieferen Regionen der Gashölle sind noch so heiß, dass die Güsse sogleich wieder verdampfen. Doch bald sinkt die Temperatur an der Oberfläche auf weniger als 100 Grad Celsius.

Erste, siedende Wasserlachen bilden sich, die rasch zu tosenden Fluten anschwellen. Die Wassermassen sind bereits salzig: Zum einen trägt der Dauerregen jene Salz-, Salpeter- und Schwefelsäuren, die mit den vulkanischen Ausdünstungen in die Atmosphäre gelangt sind, wieder zur Erdoberfläche hinab. Zum anderen löst das Wasser Salze aus dem erstarrten Lavagestein.

Die Regenfluten verwandeln die Erde in eine dampfende Waschküche: Heiße Nebelschwaden ziehen über die Ebenen einer matschigen, feuchten Landschaft.

Und da es kaum Täler gibt, in denen sich das Wasser sammeln könnte, steigt die Sintflut überall gleichmäßig an, bis vor etwa vier Milliarden Jahren ein im Durchschnitt vermutlich 1900 Meter tiefer Ur-Ozean fast den gesamten Globus bedeckt – und die vormals kahle Erde zum „Wasserplaneten“ wird.

Einem Betrachter aus dem All wäre das aber kaum aufgefallen: Die Erde verbirgt die Fluten noch lange unter einer dichten, weißen Dunstschicht – und bietet damit etwa einen Anblick wie die Venus unserer Tage.

**VON DEN ERSTEN REGENTROPFEN** bis zum globalen Hochwasser vergeht wahrscheinlich nicht allzu viel Zeit: Einige Zehnmillionen Jahre könnten ausgereicht haben, um die Erde mit Meeren zu bedecken.

Denn der Prozess verstärkt sich selbst: Das Regenwasser isoliert die Wärme der Erde, vergleichbar einer Dämmung in einem Hausdach. Deshalb entweicht immer weniger Energie des heißen Planeten in die Atmosphäre, die folglich im Kontakt mit dem kalten Weltraum schneller abkühlt. Die Folge: Immer mehr Wasserdampf regnet ab und füllt immer schneller den Ur-Ozean.

Stellt man sich die Biografie der Erde noch einmal als die Spanne der seitlich ausgetreckten Arme vor, so zeigt sich: Die Erde ist jetzt noch nicht besonders alt. Seit ihrer Geburt an den Fingerspitzen der linken Hand ist gerade einmal die Strecke bis zum linken Unterarm überwunden – die Ära der Menschen an der Spitze der rechten Hand ist noch weit entfernt.

Doch schon jetzt, so vermuten einige Wissenschaftler, geschieht in warmen Regionen am Grund des Ur-Ozeans etwas für das ganze Sonnensystem womöglich Einzigartiges: In der dünnen Kruste, die das Wasser des Ozeans vom heißen Erdinneren trennt, öffnen sich an manchen Stellen eigentümliche Schlote.

Aus ihnen quillt eine ätzende, heiße Flüssigkeit voller Gase und Minerale. Beim Austritt in die kühlere Umgebung brauen sich die Stoffe zu neuen chemischen Verbindungen zusammen. Mitten in diesem Chemiecocktail wachsen organische – also auf Kohlenstoff basierende – Moleküle heran. Die Keime des Lebens.

Eine der ersten dieser Substanzen ist vermutlich Essigsäure: eine Verbindung aus zwei Kohlenstoff-, zwei Sauerstoff- und vier Wasserstoffatomen. Beim Verschmelzen dieser Stoffe wird Energie frei – sie hilft dabei, weitere Moleküle zusammenzubauen, etwa Kohlenhydrate (Zucker) und Aminosäuren.

Die organischen Moleküle entwickeln sich, bis sie sich selbst vervielfältigen können und schließlich schützende Hüllen ausbilden. Auf diese Weise entstehen kleine, aktive Zellen: In ihrem Inneren beginnen die chemischen Prozesse nicht mehr zufällig abzulaufen, sondern geordnet nach einer eigenen Organisation.

Diese Bioreaktoren vermehren sich und bringen kompliziertere Strukturen hervor – zögerlich, doch unaufhaltsam beginnt die Evolution des Lebens. Und nur jene Gebilde, die besonders gut an die Bedingungen der Umwelt angepasst sind, entwickeln sich weiter.

Aber all dies vollzieht sich noch im Verborgenen und verändert den Planeten zunächst nur wenig.

**WÄHREND SICH IM WASSER** sacht das Leben regt, kommt der junge Planet nicht zum Stillstand. Denn aus dem Meer erwachsen die Kontinente. Langsam. Millimeter für Millimeter.

Die Geschichte dieser dicken Gesteinsblöcke zählt zu den rätselhaftesten und kompliziertesten Kapiteln der Erdhistorie. Vermutlich beginnt sie vor rund 3,8 Milliarden Jahren an den Hängen vulkanischer Inseln, die vereinzelt aus den Wogen des weltumspannenden Gewässers hervorragen wie heute etwa die Aläuten vor der Küste Alaskas. Es sind Berge, gebildet aus magmatischem Gestein, das durch die Erdkruste aus dem heißen Untergrund des Planeten empordrängt. An der Erdoberfläche häuft es sich auf und erstarrt.

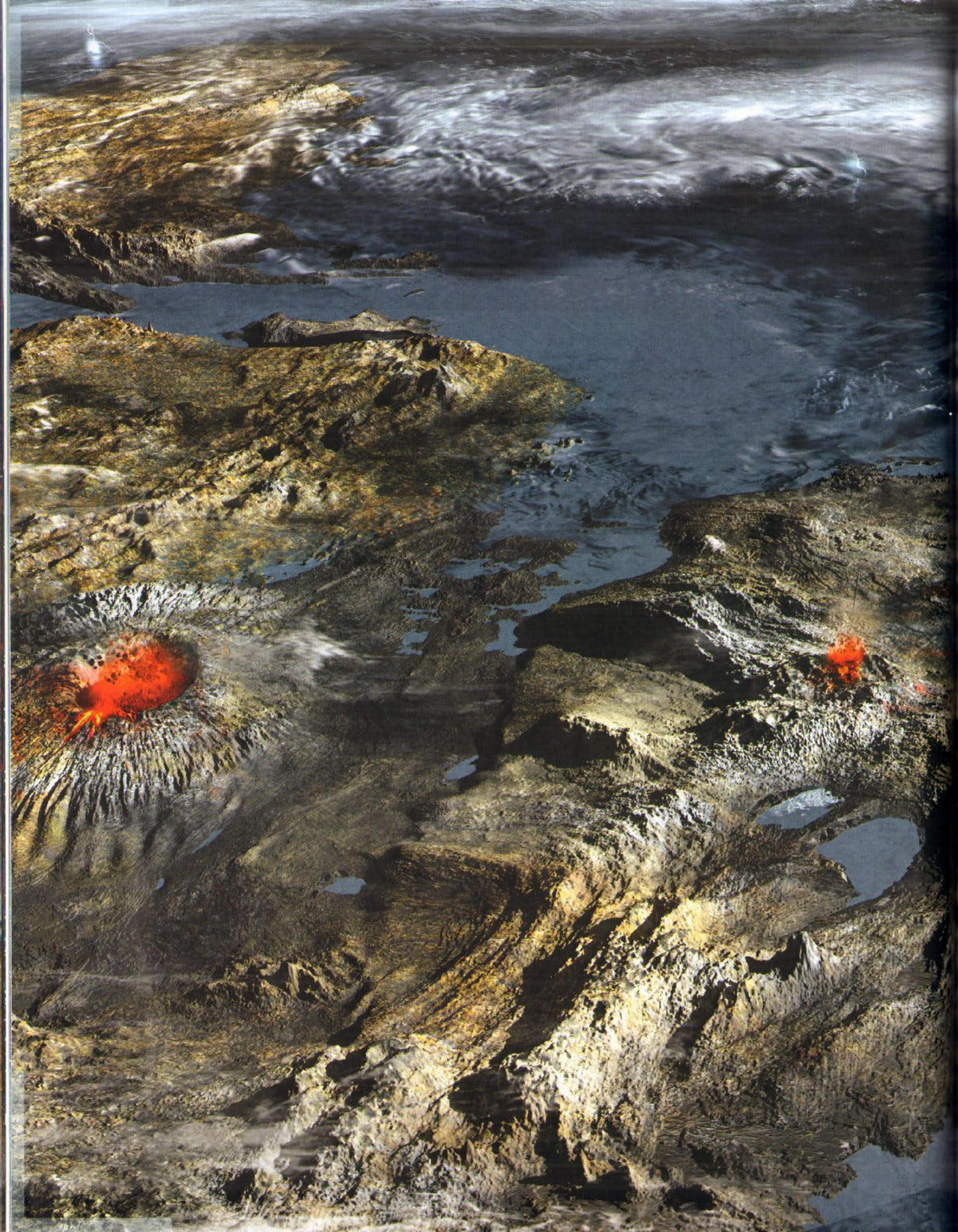
Über Jahrmillionen zernagen Wind und Regen die Felsen, lassen sie buchstäblich zerbröseln. Die Naturkräfte „erodieren“ das Gestein, wie Geologen sagen.

Flüsse spülen die gelösten Basaltbröckchen ins Meer hinaus. Dort sammelt sich das Schwemm-Material in ruhigen Uferbereichen an den Flanken der Inseln als „Sediment“ und rutscht nach und nach weiter in den Ozean hinein. Ständig trägt das Regenwasser neues Material heran – mit der Folge, dass die Sedimentschichten auf der ursprünglichen Erdkruste immer dicker werden.


Gleichzeitig bricht diese dünne Kruste immer wieder an vielen Stellen auf. Die Bruchstücke schieben sich unter benachbarte Krustenteile und versinken schließlich in den heißen Untergrund des Planeten. Im abtauchenden Material ist Wasser gebunden, das in der Tiefe freigesetzt wird und langsam aufsteigt. Dabei verflüssigt es durch einen komplizierten chemischen Prozess das Gestein in seiner Umgebung (siehe Kasten Seite 49).

Als Schmelze aber sind diese Minerale weniger dicht und somit leichter. Deshalb steigen sie als gigantische Blasen wie Luftballons in die höher gelegene Erdkruste, kühlen dort ab und erstarren.









Vor etwa vier Milliarden Jahren ist die Erde so weit abgekühlt, dass Wasserdampf in der Atmosphäre zu Tropfen kondensiert und der erste Regen fällt. Zunächst verdampft die Flüssigkeit wieder, doch schließlich ist auch die Oberfläche kühl genug, um das Urmeer entstehen zu lassen



Während des Aufsteigens im unterirdischen Reich aber haben sich die Stoffe in ein ganz neues Gestein verwandelt: in Granit, eine Mischung aus den Mineralen Feldspat, Glimmer und Quarz. Und weil sich dieser Vorgang ständig wiederholt, wächst der Anteil des Granits in der Kruste immer weiter – das neue Material wird zum wichtigsten Baustoff der Kontinente.

Nach und nach werden diese Granitblöcke sowie das Vulkangestein und die Sedimente zur *kontinentalen* Kruste zusammengebacken. Manche dieser dabei entstehenden Gebilde sind vielleicht so groß wie die heutige Insel Ibiza. Andere haben eher die Gestalt Islands.

Diese Kontinent-Embryos unterscheiden sich grundsätzlich von der übrigen *ozeanischen* Kruste aus erkaltem Magma, die den ganzen Planeten überzieht und vom Meer überspült wird: Die Baby-Kontinente sind wegen ihres hohen Granitanteils leichter und widerstandsfähiger.

## In der Tiefe des Erdkerns ist es heißer als an der Oberfläche der Sonne

Und immer wieder rutscht die schwerere ozeanische Urkruste von den Seiten unter die leichteren Mikrokontinente. Neue Granitblasen entstehen und steigen auf.

Folge: Die kontinentalen Inseln werden schließlich so dick und hoch, dass die Wellen des Ozeans nicht mehr über ihnen zusammenschlagen. Diese Inseln sind die Vorläufer jener Kontinente, die einmal Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Menschen bieten werden.

**ANFANGS SIND DIESE EILANDE** öde und leer. Keine raschelnden Wiesen, keine rauschenden Wälder. Nur kahler Felsen. Doch der ist nicht statisch: Vielmehr begeben sich die Inseln auf eine Reise über den Globus. So gestalten sie fortwährend das Bild der Erde um, als wäre sie eine einzige riesige Baustelle.

Wissenschaftler haben diesem erstaunlichen Prozess daher den Namen „Plattentektonik“ gegeben, benannt nach dem altgriechischen Wort *tekton* für „Bauhandwerker“. Er beginnt wahrscheinlich bereits vor mehr als vier Milliarden Jahren, als sich an der Oberfläche der glühenden Erde eine erste primitive Kruste bildet.

Um zu verstehen, wie die Plattentektonik ganze Kontinente versetzen kann, muss man bis in das Innere des

Planeten hinuntertauchen: Das äußere Krustengestein des Planeten ist ja vielerorts kaum mächtiger als einige Dutzend Kilometer. Es macht insgesamt gerade einmal 0,5 Prozent der Erdmasse aus.

Im Erdmantel darunter ist die einstige Glutkugel bis heute nicht erkaltet, sondern heiß und dadurch plastisch (siehe Illustration Seite 8). Die hohen Temperaturen und der Druck der Massen machen das Gestein dort zwar nicht flüssig wie Öl oder Wasser – aber sie überführen das Material in einen speziellen Zustand, der dem eines Gletschers gleicht: Dessen Eis ist so plastisch, dass es unter dem Einfluss der Schwerkraft außerordentlich langsam talwärts fließt. Zugleich wirkt es aber hart und spröde, unter Schlägen zerbricht es.

Ähnlich verhält sich das Gestein des Erdmantels: Es kann fließen, ziehen und schieben – aber nur so langsam, wie ein Fingernagel wächst.

Die Wärme des Erdmantels stammt zu einem Großteil aus der heißen Entstehungsphase der Erde: Sie ist dort seit Jahrmilliarden gespeichert und entweicht nur sehr langsam nach oben. Zudem führt der Zerfall der radioaktiven Elemente Uran, Thorium und Kalium dem Erdmantel ständig Energie zu, und auch der wesentlich heißere Erdkern gibt Wärme an den darüberliegenden Mantel ab. Im Kern, wo sich schon in den ersten Lebensjahren der Erde Eisen und Nickel sammelten, herrschen bis heute Temperaturen von mehr als 6000 Grad Celsius; es ist dort heißer als an der Oberfläche der Sonne.

Diese kaum vorstellbare Gluthitze entstand ebenfalls am Anfang der Erdgeschichte, als der gesamte Planet eine aufgeschmolzene Kugel war. Weitere Energie schöpft der Erdkern heute aus einem chemischen Umwandlungsprozess von Eisenmolekülen, den Geologen „Ausfrieren“ nennen.

An der Grenze zwischen Erdkern und Erdmantel – dort, wo der Kern Wärme an den Mantel abgibt – erreicht das Mantelgestein seine höchste Temperatur und dehnt sich aus. Somit wird es etwas leichter als die weiter oben liegenden Gesteinsschichten und drängt in die Höhe – etwa so, wie kochendes Wasser in einem Topf vom heißen Grund auf der Herdplatte an die Oberfläche sprudelt. Das warme aufsteigende Gestein verdrängt kälteres, das daraufhin in die Tiefe strömt.

So wabert das heiße Gestein in einem beständigen Kreislauf zwischen Aufwärmen und Abkühlen. Wissenschaftler schätzen, dass ein solcher Zyklus bis zu einer Milliarde Jahren dauern kann.

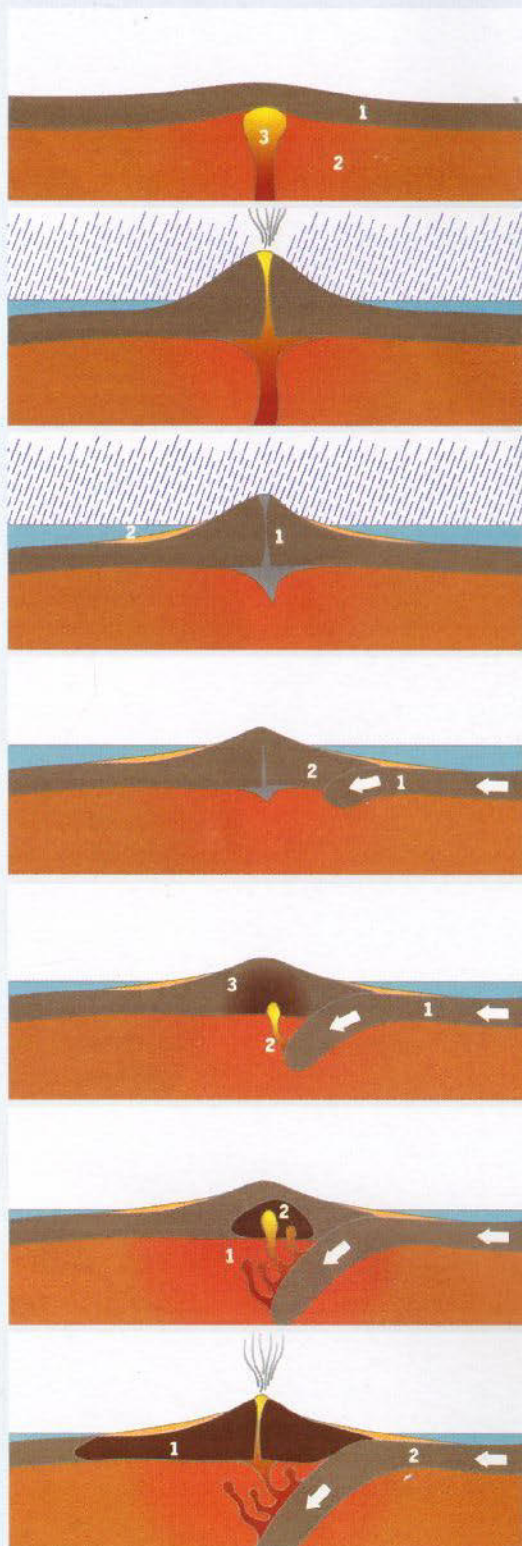
**DIESE „KONVEKTION“** ist der Puls des Planeten. Die innere Bewegung der Erde ist die Energie, die seit Urzeiten die Wanderschaft der Kontinente antreibt. Sie ist der Motor der Plattentektonik.

Und der funktioniert so: Kommt das träge fließende Gestein im Erdmantel der Oberfläche näher, lässt der Druck allmählich nach. Dadurch sinken die Schmelztemperaturen der Minerale, und sie verwandeln sich in



## Wie das Land entsteht

Ein erstaunlicher Verwandlungsprozess im Erdinneren liefert das Material für die ersten Kontinente



Nachdem sich die Urerde so weit abgekühlt hat, dass sich eine feste Kruste aus Basaltgestein (1) bilden konnte, stoßen aus dem Erdmantel (2) immer wieder heiße Magmaströme (3) aus der Tiefe durch die Oberfläche vor und ergießen sich darüber. Auf diese Weise entstehen die ersten Vulkanberge.

Aus zahlreichen Vulkanen und Rissen in der Kruste treten Gase wie Kohlendioxid, Stickstoff, Schwefelverbindungen sowie Wasserdampf aus und bilden eine Ur-Atmosphäre. Als die Kruste weiter abkühlt, kondensiert der Wasserdampf zu Regen und sammelt sich zu einem Ur-Ozean.

Ein Jahrtausende währender Dauerregen erodiert die Kuppen erloschener Vulkane (1). Regen und Flüsse nehmen das Material mit und lagern es als Sediment (2) an den Flanken der Berge bis ins Meer hinein ab. Noch bedeckt Wasser fast den ganzen Planeten; nur die Feuerberge ragen heraus.

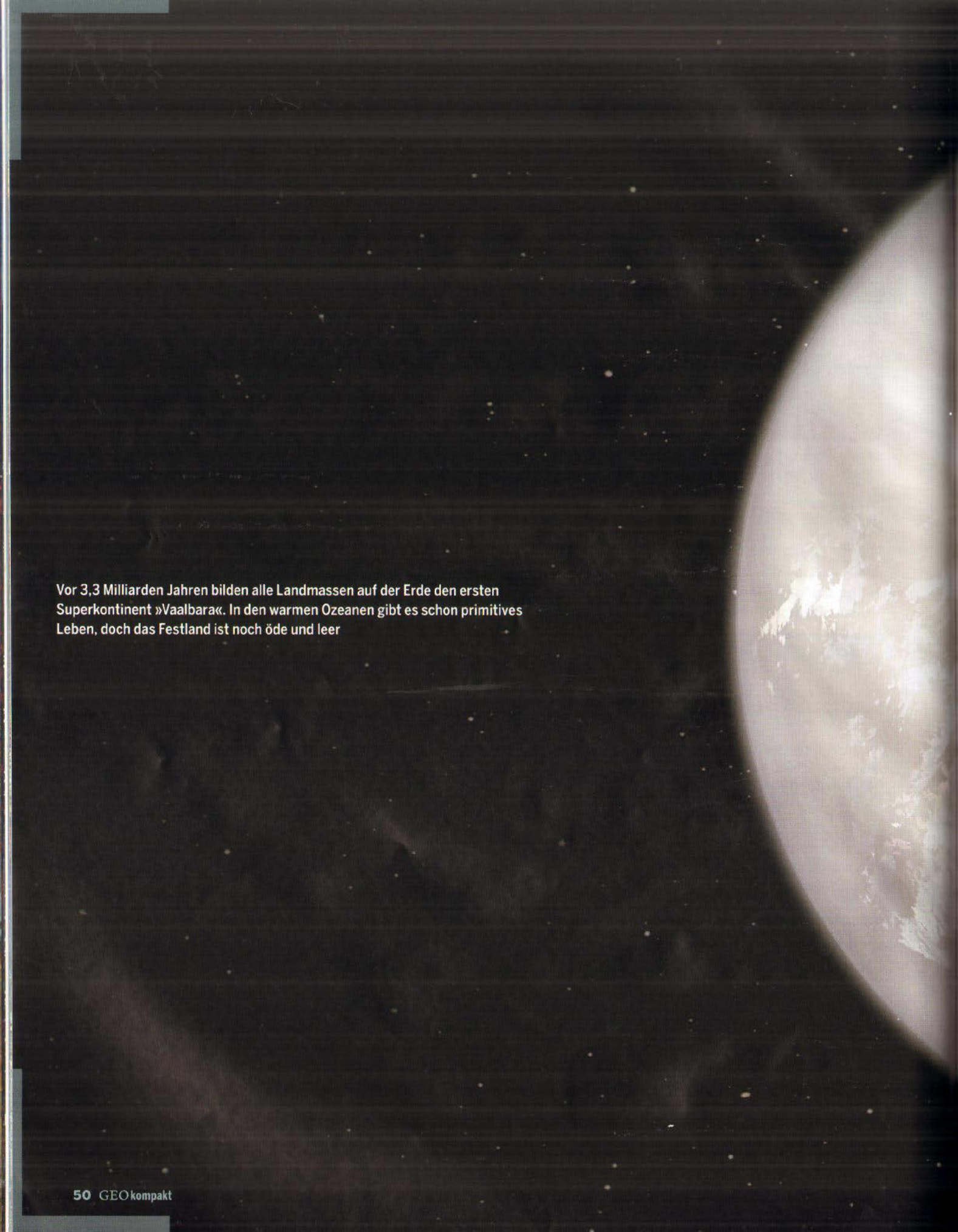
An manchen Stellen zerbricht die dünne Kruste – wahrscheinlich, weil Hitzeströme im Erdinneren daran „zerren“. Der eine Teil der Platte (1) gerät in Bewegung und schiebt sich unter den anderen Teil (2). Weil die Kruste zuvor Ozeanboden gebildet hat, ist Wasser im Gestein gebunden.

In der Tiefe wird die Platte mit der Basaltkruste (1, die Geologen jetzt ozeanische Kruste nennen) so heiß, dass das gebundene Wasser entweicht. Es steigt auf, bringt das umgebende Gestein in komplexen chemischen Reaktionen zum Schmelzen (2). Dieses verwandelt sich in ein neues, leichteres Material: Granit (3).

Mehr und mehr Schmelze (1) steigt von der abgetauchten Erdplatte auf, verwandelt immer größere Teile der ursprünglichen Kruste in leichteren Granit (2). Je nach chemischer Zusammensetzung und Erkaltdauer des Gesteins entstehen unterschiedliche Minerale.

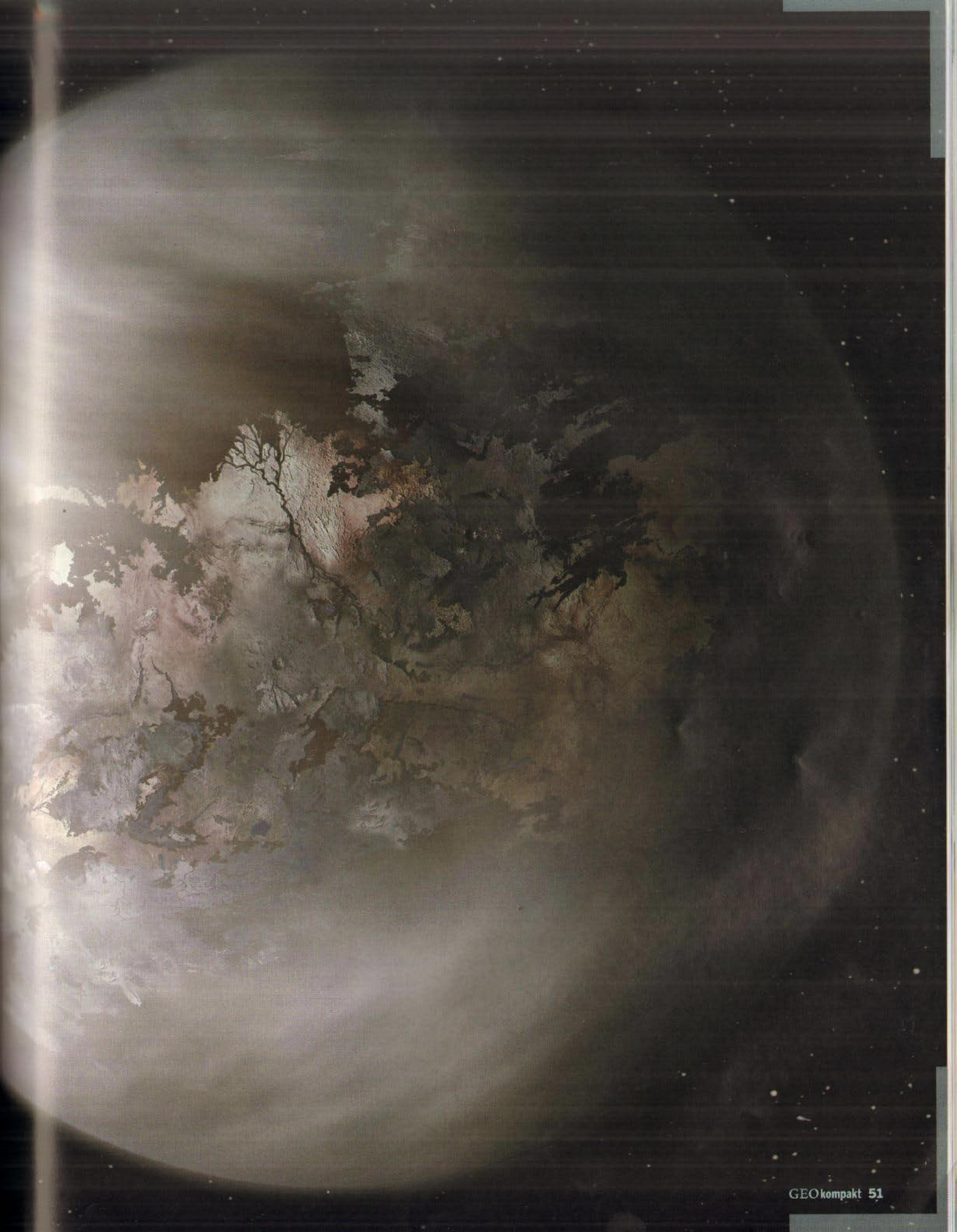
Immer größere Granitblöcke entstehen, bilden die sogenannte kontinentale Kruste (1) und ragen, teilweise von Sediment bedeckt, neben der ozeanischen Kruste (2) als Landoberfläche aus dem Meer heraus. An manchen Stellen brechen neue Vulkane hervor – die ersten Gebirge auf den Kontinenten.





Vor 3,3 Milliarden Jahren bilden alle Landmassen auf der Erde den ersten Superkontinent »Vaalbara«. In den warmen Ozeanen gibt es schon primitives Leben, doch das Festland ist noch öde und leer







flüssiges Magma, das sich wegen seines relativ geringen Gewichts den Weg nach oben bahnt und schließlich die Kruste an der Oberfläche durchbricht.

Es entstehen Spalten und Brüche, aus denen das Magma hervorquillt. Sie durchziehen die gesamte Oberfläche des Planeten wie Risse im Firnis eines alten Gemäldes. Nach und nach verbreitern sich diese Risse, und es entsteht ein Mosaik aus voneinander getrennten Platten.

An den Rändern dieser Platten erstarrt das aus dem Erdinneren aufsteigende Magma zu neuer Kruste (siehe Grafik Seite 82). Weil die Konvektion unaufhörlich neues Material nach oben treibt, drängt jeder neue Millimeter der Gesteinsstarre die ältere Kruste zur Seite.

Folge: Die Platten verschieben sich mitsamt der Kruste auf dem heißen, beständig zäh fließenden Untergrund. Langsam, aber unaufhaltsam: mal weniger als einen Zentimeter pro Jahr, mal bis zu zehn Zentimeter.

## Der Sauerstoff in der Luft schützt das Leben vor UV-Strahlen aus dem All

Eigentlich nicht viel – aber in den Zeitdimensionen der Erdgeschichte kommen große Strecken zusammen. In zehn Millionen Jahren können auf diese Weise 1000 Kilometer neue Kruste wachsen.

Doch der Platz ist begrenzt, die Oberfläche der Erde wird ja nicht größer. Also muss es irgendwo einen Ausgleich für das unablässige Wachstum geben – irgendwo muss die alte Kruste wieder verschwinden.

Das geschieht dort, wo zwei Platten aufeinandertreffen. Dann schiebt sich eine der Platten unter die andere und taucht in den plastischen Untergrund ab (siehe Seite 49). In der Tiefe nehmen Druck und Temperatur zu, sodass das Gestein immer dichter und schwerer wird und weitere Teile der Platte mit ihrer Kruste nach sich zieht.

Auf diese Weise entsteht ein gewaltiger Kreislauf: Während an einigen Stellen Magma aus dem Boden quillt und die angrenzenden Platten auseinandertreibt, versinken sie andernorts wieder im formbaren Erdmantel.

**EINZIG DEN KONTINENT-EMBRYONEN**, die sich vor Jahrmilliarden vorwiegend aus Granitgestein geformt haben, bleibt dieser Zyklus aus Schmelzen und Erstarren von Beginn an erspart: Denn die kontinentalen Platten haben eine geringere Dichte als die ozeanischen (sind also,

auf das gleiche Volumen bezogen, wesentlich leichter) und können daher bei der Kollision zweier Platten nicht ins Erdinnere abtauchen. Sie schwimmen seit jeher wie Korken an der Oberfläche eines Wasserstroms auf der nächst tieferen Schicht des Erdmantels.

Doch die Plattentektonik schiebt die Platten der Erde so ungeordnet umher, dass die Kontinente zwangsläufig von Zeit zu Zeit aufeinandertreffen – und aneinander hängen bleiben. Und manchmal vereinen sich nahezu sämtliche Großinseln zu einem „Superkontinent“.

Der erste entsteht vermutlich vor etwa 3,3 Milliarden Jahren (siehe Seite 50). Wissenschaftler haben dieses Rieseneiland „Vaalbara“ genannt – nach den Namen jener Gegenden, in denen sich heute Spuren ihrer Existenz finden: der australischen Region Pilbara sowie Kaapvaal im Süden Afrikas.

Rund 600 Millionen Jahre vergehen, bis die gleichen geologischen Kräfte, die den Superkontinent zusammengefügt haben, ihn auch wieder zerreißen. Denn die Drift der Platten auf den glutheißen Konvektionsströmen des Erdmantels ist so unbeständig, so unberechenbar, dass die Naturgewalten bald auch dort ziehen und zerren, wo sie einst geschoben und gepresst haben.

**GUT 200 MILLIONEN JAHRE** später kommt es im Wasser der Ozeane zu einer weiteren Revolution.

Manche der unzähligen einzelligen Lebewesen, die aus den ersten Anfängen des Lebens hervorgegangen sind – die Cyanobakterien –, haben eine besondere Eigenschaft entwickelt: Sie nutzen die Strahlen der Sonne, um energiereiche Substanzen aufzubauen.

Dieser Prozess der „Photosynthese“ ist eine der bedeutendsten biochemischen Reaktionen der Natur und läuft noch heute in jeder grünen Pflanze ab.

Die Cyanobakterien, die allmählich in riesigen Kolonien das Meer bevölkern, verändern vor rund 2,5 Milliarden Jahren die Bedingungen des Planeten radikal. Denn als Abfallprodukt entsteht bei der Photosynthese freier Sauerstoff – und die Bakterien produzieren nun so viel von diesem Gas, dass sich die Erdatmosphäre allmählich verändert: Das zuvor lebensfeindliche Gemisch aus vulkanischen Gasen verwandelt sich in sauerstoffhaltige Luft – in jene Mixtur, ohne die auf Erden kein höheres Leben existieren könnte.

Doch dieser Glücksfall ist noch nicht alles. Als der Sauerstoff in große Höhen gelangt, spaltet ihn die energiereiche Strahlung der Sonne: Es entsteht Ozon – jene Substanz, die alle Organismen vor der schädlichen UV-Strahlung aus dem Kosmos schützt.

Erst als dieser Schutzschirm stark genug ist, kann sich das Leben aus den Ozeanen auch auf die trockenen Kontinente wagen. Bis dahin ist das Land gleichsam strahlenverseucht – keine Kreatur würde dort überleben.

Als Erste, wohl vor mindestens 800 Millionen Jahren, besiedeln Bakterien die Kontinente; ihnen folgen grüne Pflanzen. Sie machen aus den anfangs kargen und ein-



förmigen Wüsteneien vielfältige, mitunter farbenprächtige Landschaften, in denen unterschiedlichste Organismen einen Lebensraum finden.

Der Reigen der Kontinente geht unterdessen weiter: Alle 500 bis 700 Millionen Jahre vereinigen sich die beweglichen Scherben Vaalbaras mit später entstandenen Inseln zu einem Superkontinent: Kenorland, Hudsonland, Rodinia sind die Namen einiger Urländer, die vermutlich im Laufe der Erdgeschichte wachsen und vergehen.

Gemessen am Alter des Planeten, ist es noch nicht lange her, dass sich die Kontinente das letzte Mal zusammengeballt haben – im Bild der ausgestreckten Arme ist die Entwicklung der Erde zu diesem Zeitpunkt von ganz links bis zum Gelenk der rechten Hand vorangeschritten: Vor etwa 250 Millionen Jahren entsteht ein Großkontinent mit dem Namen „Pangaea“ („ganze Erde“).

Diese Superinsel vereint beinahe das gesamte Festland auf unserem Planeten in einer einzigen Landmasse, die sich vom Nord- bis zum Südpol erstreckt.

Während die Drift der Erdplatten diesen Riesen zusammenschmiedet, tapsen die ersten Vierbeiner auf trockenem Boden umher. Es sind lurchähnliche Geschöpfe, die Vorfahren aller Landwirbeltiere.

Pangaea liegt etwa 100 Millionen Jahre lang wie ein großer Halbmond, der sich nach Osten hin öffnet, auf unserem Planeten. Dann zerren ihn die Kräfte der Plattenbewegung wieder auseinander.

Anfangs in zwei Fragmente, die sich dann langsam voneinander entfernen: Das eine zerfällt weiter in Nordamerika und Eurasien, aus dem anderen Bruchstück bilden sich Südamerika, Afrika, die Antarktis, Australien und Indien. So kommt es, dass die Weltkarte heute wie ein Puzzle aussieht, dessen Teile sich zu einem Ganzen zusammenfügen lassen. Afrika passt an die Ostküste Südamerikas; dessen Nordküste an die Südostküste Nordamerikas.

Vor etwa zehn Millionen Jahren erreichen die Splitter Pangaeas schließlich Positionen, die denjenigen bereits sehr nahe kommen, die heutzutage jede Weltkarte in den Atlanten wiedergibt.

**IN JENER EPOCHE** bricht die Morgendämmerung eines neuen Zeitalters an. Denn bei den Menschenaffen bilden sich vor vermutlich sieben Millionen Jahren aus einem gemeinsamen Vorfahren neue Arten, die fortan getrennte Wege gehen: Die eine Linie führt zu den Schimpansen, während die andere die Hominiden mit ihrem aufrechten Gang hervorbringt – und schließlich vor etwa 190 000 Jahren den *Homo sapiens*, den Menschen.

Er wird wie kaum eine andere Kreatur die Erde gestalten, Flüsse umleiten und Seen austrocknen, auf der Suche

nach Rohstoffen den Untergrund umwälzen und zugleich die Zusammensetzung der Atmosphäre verändern.

Den Naturgewalten aber hat er nur wenig entgegenzusetzen.

Auch das Mosaik der Erdplatten bringt der Mensch nicht zum Stillstand: So drängt derzeit beispielsweise ein großes Bruchstück des pazifischen Ozeanbodens jedes Jahr knapp zehn Zentimeter von Westen her unter den südamerikanischen Kontinent – und schiebt dabei die Bergketten der Anden immer weiter in die Höhe (siehe Illustration Seite 82).

Und jene Platte, mit der der indische Subkontinent über den Globus wandert, taucht seit rund 40 Millionen Jahren um etwa fünf Zentimeter pro Jahr unter Asien ab und faltet dabei das Himalaya-Gebirge in die Höhe.

Bei Kalifornien wiederum schrammen die Pazifische und die Nordamerikanische Platte so kraftvoll aneinander vorbei, dass immer wieder Erdbeben diese Region erschüttern.

**DIE BEWEGUNG DER KONTINENTE** ist ungemein komplex. Aber so unaufhaltsam, dass sich schon jetzt in ihr die Zukunft ablesen lässt.

In etwa 100 Millionen Jahren wird sich Nordamerika ein wenig gegen den Uhrzeigersinn drehen. Afrika presst Italien wie einen Rammsporn gegen Europa. Zerdrückt dabei das gesamte Mittelmeer mit einer solchen Wucht,

dass sich von Spanien bis weit in den Mittleren Osten ein Gebirge aufschiebt.

Der Atlantik wird nach Meinung des US-Geologen Christopher Scotese wahrscheinlich komplett verschwinden. Bis in rund 250 Millionen Jahren Nord-

amerika, Afrika, Europa, Asien und Südamerika abermals zu einer Landmasse zusammenwachsen.

Scotese hat ihr bereits einen Namen gegeben: „Pangaea Ultima“, die „letzte ganze Erde“.

Was danach mit den Kontinenten geschieht, wagen Forscher nicht zu vermuten. Doch es wird gewiss nicht das letzte Mal sein, dass sich die Landmassen zu einem Ganzen zusammenballen.

Das Zeitalter der Menschen ist zu jenem Zeitpunkt wohl ohnehin nur noch eine weit zurückliegende Episode in der Geschichte des Planeten, den die Naturgewalten unaufhörlich und unaufhaltsam weiter formen.

Denn beständig ist auf der Erde nur der Wandel. □

**Bertram Weiß**, 25, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

**Tim Wehrmann**, 34, ist einer der besten deutschen Illustratoren und arbeitet seit fünf Jahren für GEOkompakt.

**Literatur:** Rolf Meissner, „Geschichte der Erde. Von den Anfängen des Planeten bis zur Entstehung des Lebens“, C. H. Beck. J. D. Macdougall, „Eine kurze Geschichte der Erde“, Econ. Ted Nield, „Superkontinent: Das geheime Leben unseres Planeten“, Kunstmann.

## MEMO | ERDGESCHICHTE

» **AUS STAUBKÖRNCHE**n, den Überresten einer Sonne,

wuchs die Proto-Erde vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren heran.

» **HITZE** aus dem Inneren des Planeten treibt die Erdplatten an.

» **VULKANE** und Wasser schufen die Kontinente.

» **DAS LEBEN** sorgte für eine schützende Ozonschicht.





In 15 Meilen Entfernung erlebt die Besatzung der »Berbice« den Beginn des Desasters: »Elektrische Entladungen schossen um das Schiff herum, Feuerbälle fielen aufs Deck«, berichtet der Kapitän



Vulkanausbruch

# Der Tag, an dem **DIE WELT** im Meer versank

203 Jahre lang ist er friedlich geblieben.  
Doch am 26. August 1883 explodiert vor  
den Küsten von Sumatra und Java der Vulkan  
Krakatau und schleudert innerhalb von  
zwei Tagen 20 Kubikkilometer Gestein und  
Asche bis weit hinauf in die Stratosphäre.  
36 000 Menschen werden von glühenden Brocken  
erschlagen, verbrennen im Feuerregen,  
ertrinken in gigantischen Flutwellen. Es  
ist eine der größten Naturkatastrophen  
der Menschheitsgeschichte

Text: Wolf Schneider



# a

Is der Vulkan Krakatau am 27. August 1883 mit der Kraft von 7000 Hiroshima-Bomben explodierte, erzeugte er das gewaltigste Getöse, das seit Menschengedenken über Land und Ozean donnerte; vier Stunden war es unterwegs. Die Eruption türmte eine der höchsten Wogen auf, von der wir wissen: Mehr als 30 000 Menschen erschlug und ersäufte sie, nach 32 Stunden kam sie im 18 000 Kilometer entfernten Le Havre an.

Ein Jahr nach der Detonation auf der kleinen Insel zwischen Java und Sumatra landete ein Teppich aus Bimsstein an der Ostküste Afrikas, bedeckt mit Muscheln, Krebsen und den Skeletten von Mensch und Tier. Die Asche des Krakatau trieb drei Jahre lang sichtbar um den Planeten; vier Jahre lang senkte sie die Durchschnittstemperatur auf Erden.

Viel schneller aber als die Asche und die Welle lief die Schreckensnachricht um die Welt: Durch das gerade komplettierte Netz der Telegraphenkabel ließen Beamte, Journalisten und Versicherungsagenten ihre Berichte aus der Sundastraße nach Indien, Holland, England morsen, nach Sydney, Kapstadt, New York und Buenos Aires. Und so brauchte die Nachricht bis zu den Zeitungslesern weniger als 24 Stunden.

Da entstand nun allmählich etwas gänzlich Neues in den Köpfen: das Bewusstsein, dass die Menschheit eine Schicksalsgemeinschaft auf einem höchst begrenzten Planeten ist. Die „Victoria“ des Ferdinand Magellan hatte ja noch wenig bewegt, als sie 1522 ihre dreijährige Weltumseglung abschloss und damit die Kugelgestalt der Erde zum ersten Mal anschaulich machte; dafür interessierten sich nur Kaufleute, Admirale und Gelehrte.

Aber nun wegen der Asche einen feuerroten Horizont oder einen grü-

nen Mond zu sehen, weil am anderen Ende der Welt ein Vulkan explodiert war – und durch die allgegenwärtigen telegraphischen Berichte binnen Stunden über die jüngsten Hiobsnachrichten informiert zu sein –, und mit den eigenen Ängsten Stoff für neue Telegramme zu liefern, die wiederum um die Erde flogen: Das war die eigentliche Geburtsstunde dessen, was der Medienphilosoph Marshall McLuhan 81 Jahre später „das globale Dorf“ nannte – die Menschheit, die gleichzeitig lacht oder weint.

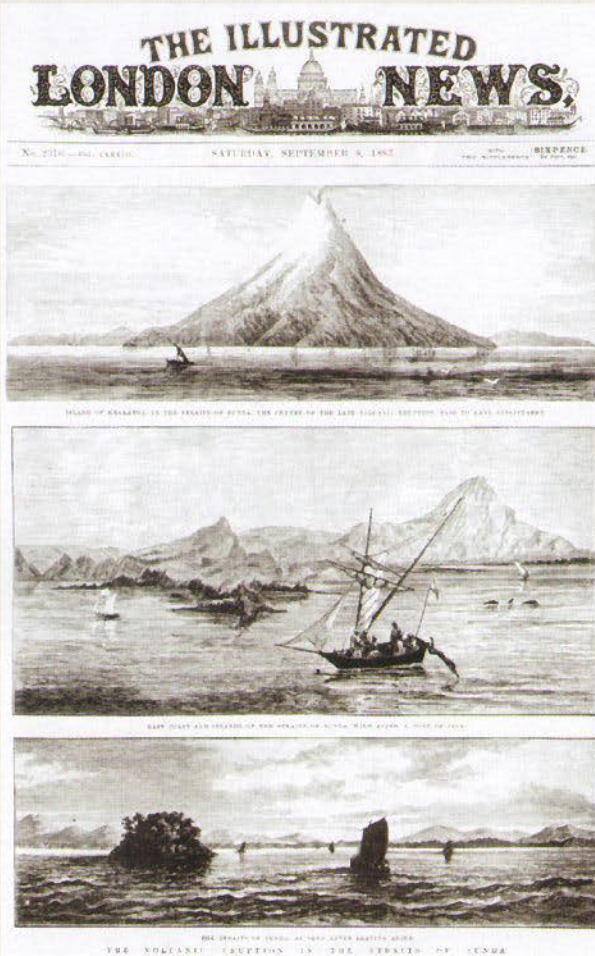
203 Jahre lang, seit einem Ausbruch Anno 1680, hatte die Insel Krakatau friedlich dagelegen: damals 33 Quadratkilometer groß, von drei stumpfen Vulkankegeln nur mäßig überragt, 822 Meter hoch der höchste; unbewohnt und von üppigem Urwald bedeckt.

Dass aus diesen drei Vulkanstümpfen 20 Kubikmeter Bimsstein und Asche – fast 8000-mal das Volumen der Cheops-Pyramide – in den Himmel schießen würden, bevor das Meer zwei Drittel der Insel verschlang: Dafür gab es durchaus Signale. Die Vulkanologen von heute hätten diese Signale zu deuten verstanden und damit vermutlich Zehntausenden ihren grässlichen Tod erspart.

**20. MAI 1883.** Drei Monate vor der Katastrophe erwacht der Krakatau: Er lässt Donner hallen, Asche regnen und auf Java Häuser zittern. 30 Kilometer nördlich am Krakatau vorbei dampft an jenem Tag die deutsche Korvette „Elisabeth“. An Bord befindet sich ein Marinepfarrer namens Heims, der schildert, was er am Himmel und auf Erden sieht.

Von der Insel Krakatau steigt plötzlich „eine enorme, glänzend weiße Dampfsäule mit reißender Schnelligkeit auf, in kurzer Frist die kolossale Höhe nicht unter 11 000 Meter erreichend und in fast schneieiger Helle von dem klaren blauen Himmel sich abhebend“.

Die Säule rundet und ringelt sich und erinnert Heims an einen Blumenkohl. „All-



Die Nachricht vom Vulkanausbruch in der Sundastraße erreicht die ganze Welt. Aber es fehlen die Bilder. So zeigt die »Illustrated London News« noch 13 Tage später eine Tropenidylle, wo in Wahrheit Tod und Zerstörung herrschen



mählich mischten sich dunklere Farben in die weiß schimmernde Helle der Wasserdämpfe, bis nach und nach eine breite blaugraue Wand, gleich einer mächtigen, finsternen, fächerförmigen Gewitterwolke alles überdeckte.“

Aus der Wand regnet es Asche – „eine hellgraue, etwas gelbliche, unendlich fein zerteilte Masse“, die sich wie ein Flaum über das Schiff ausbreitet. Und was ist am nächsten Morgen aus der Korvette geworden? Eine schwimmende Zementfabrik!, schreibt der Marinepfarrer: Schiffswand, Torpedorohre, Segel „dick und lückenlos mit dem graulichen haftenden Staube belegt.

Über all diesen Aschenregendesastra wölbte sich der Himmel wie eine große Glocke aus recht mattem Milchglas, in der die Sonne wie eine hellblaue Kugellampe hing“.

An den folgenden Tagen sind in Batavia (heute Jakarta) auf Java noch mehrere Explosionen zu hören, 150 Kilometer vom Krakatau entfernt. Das alles gilt als nicht weiter beunruhigend: Mit einem Schiff fahren eine Woche nach dem großen

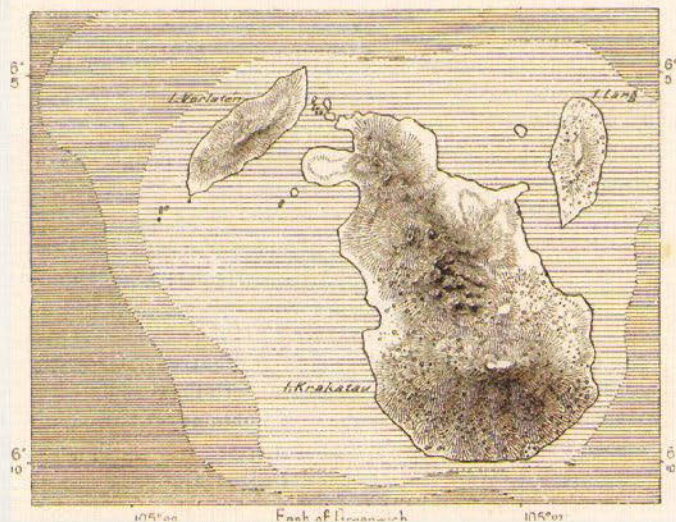
Aschenregen 86 Passagiere zum Krakatau, aus Neugier einfach. Über dem niedrigsten der drei Vulkankegel steht eine Dampf Wolke von zwei bis drei Kilometer Höhe, und alle fünf bis zehn Minuten kracht es in ihm.

Einige Passagiere lassen sich mit einem Boot an Land setzen, darunter der Bergwerksingenieur J. Schuurman. Den Strand erreichen sie, indem sie, bis zu den Knöcheln einsinkend, über eine etwa einen Meter dicke Schicht aus Bimsstein und Asche staksen. Den Tropenwald finden sie auf kahle Stämme reduziert, die aus der Asche ragen; es riecht nach Schwefelsäure. „Ein Bild der totalen Zerstörung“, notiert Schuurman, „aus dem mit unbeschreiblicher Schönheit und donnernder Gewalt die Rauchsäule emporschoss.“

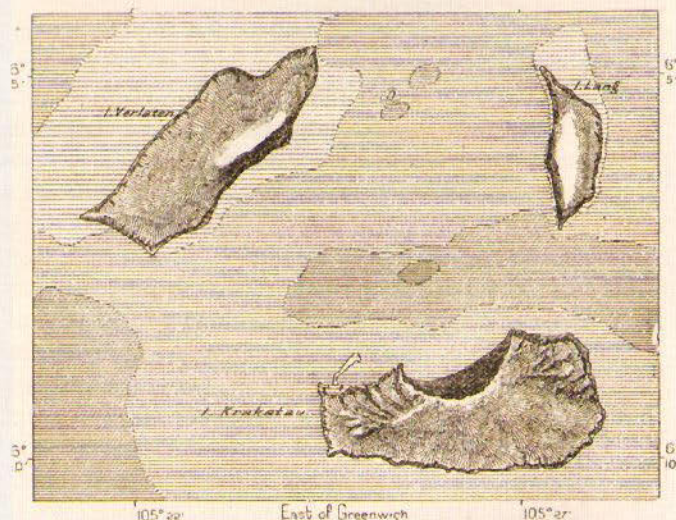
Irgendwelche Warnungen leitet der Bergwerksingenieur daraus nicht ab: Ein wissenschaftliches Instrumentarium fehlt ihm, an Vulkanausbrüche ist man hier gewöhnt, und nachdem die Zeitungen mit Schuurmans Bericht noch ein letztes Echo hervorgerufen haben, erlischt das Interesse am Krakatau.

Dabei sind an Javas Westküste, näher zu den drei Vulkanen, ab Mitte Juni wieder Detonationen zu hören, eine zweite Rauchsäule steht am Himmel, und in Anyar, der Krakatau nächsten javanischen Stadt, werden Erdstöße registriert.

Einige sehen  
das **UNHEIL**  
**NAHEN**, doch  
niemand  
erkennt die  
tödliche Gefahr



Die Explosion der drei Vulkankegel zerfetzt die Insel Krakatau, zwei Drittel ihrer Landmasse verschwinden in dem Hohlraum, den das Magma hinterlässt. Die Nachbarinseln Lang und Verlaten werden dagegen von Asche und Gestein bedeckt und legen an Größe zu



Am 11. August, 15 Tage vor dem Unglück, erhält die Vulkaninsel noch einmal Besuch: Kapitän H. J. G. Ferzenaar hat immerhin den Auftrag, zu prüfen, ob eine Erforschung des Krakatau möglich sei. Der Kapitän rät davon ab, weil es zu gefährlich wäre.

Nun stehen schon drei Rauchsäulen über der Insel. Ferzenaar fertigt eine Lageskizze an, stochert in Asche, Bimsstein und Schwefel und fährt wieder davon. Seine Gründe, nicht zu bleiben, sind gut, nur: Welchen Grund hat er, keine Warnung zu äußern?

**AM 23. AUGUST**, drei Tage vor dem Verhängnis, notiert der Kapitän des Postdampfers „Princes Wilhelmina“: „einstündige Fahrt durch hellbraunen Aschenregen, mächtige Rauchwolken über dem Krakatau“.

Die Bewohner der umliegenden Küsten von Java und Sumatra sehen sie auch und ändern ihr Leben nicht.





**Todeswalze:** Unter dem schwarzen, mit Rußwolken verhangenen Himmel zermalmen nacheinander vier Tsunamis die Küsten von Java und Sumatra. Die größte dieser Wellen wächst bis auf eine Höhe von 41 Metern

In Anyar trifft am 25. August, dem Vorabend der beiden Schreckenstage, der neue Leiter des Telegraphenamts ein, Schruut mit Namen. Seine Familie hat er zunächst in Batavia gelassen; er zieht ins Hotel.

**SONNTAG, 26. AUGUST.** Aus brodelnder Tiefe bahnt das Desaster sich seinen Weg nach oben. Vulkane sind ja nur die sichtbaren Mündungstrichter von Schloten, die durch die Erdkruste ins Erdinnere ragen, als Ventile für den Überdruck, wie er sich zum Beispiel aufbaut, wenn im Magma, dem glühend-flüssigen Gestein der Tiefe, Druck oder Temperatur abnehmen: Dann werden riesige Gasmengen freigesetzt, die sich explosionsartig ausdehnen und durch den Schlot nach außen drängen, wobei sie Magma mitreißen und auch Fels und Sand von den Wänden des Eruptionskanals.

Um sechs Uhr morgens ist es allein die Besatzung des amerikanischen Frachters „Berbice“, die einen Geschmack davon bekommt, was hier bevorsteht. Sonst zeigt sich der Überdruck am Morgen dieses schwarzen Sonntags nur in einem Mehr an Rauchwolken, Donnernrollen und Aschenregen.

Der aber trifft eben die „Berbice“ voll, sodass sie nicht mehr in die Sundastraße einfährt. „Blitz und Donner wurden immer schlimmer“, heißt es im Logbuch des Kapitäns. „Elektrische Entladungen schossen um das Schiff herum, Feuerbälle fielen aufs Deck und versprühten zu Funken. Der Steuermann spürte in einem Arm Elektroschocks, die Kupferverkleidung des Ruders begann zu glühen. Ich ließ Segel über die Luken nageln, damit die Ladung nicht Feuer fing.“

Gegen Mittag verlassen viele Anwohner der Lampung-Bucht auf Sumatra nördlich des Krakatau ihre Häuser und flüchten in die Berge, aus Angst vor dem Wasser – das, wie sie richtig voraussehen, viel mehr Menschen umbringen wird als die glühende Lava. (Nur dass Tausende der Geflohenen später eben doch durch fallende Glut verbrennen.)

13.06 Uhr. Viele Bewohner von Batavia schauen zum Himmel, denn ein Gewitter scheint heranzurumpeln, ohne dass sich eine Wolke blicken lässt. Unruhe.

14.00 Uhr. Die glühenden Gase sprengen den Deckel des Ventils und schießen, mit Lava versetzt, donnernd in den Himmel, 34 Kilometer hoch. In Anyar, nur 60 Kilometer vom Krakatau entfernt, tickert der diensthabende Telegraphist nach Batavia: Krakatau explodiert, Qualm und Dunkelheit. Die Nachricht von der Detonation rast um die Welt.

14.10 Uhr. Der nächste Ausbruch, von nun an etwa alle zehn Minuten. Gegen 15 Uhr werden die Eruptionen noch lauter, wie Kanonenschüsse, die mit Donnerschlägen wechseln, schreibt ein Ohrenzeuge.

15.30 Uhr. Der Kapitän des irischen Seglers „Charles Bal“, nur zehn Seemeilen vom Krakatau entfernt, registriert „ein seltsames Geräusch wie prasselndes Feuer oder die Salven schwerer Artillerie im Abstand von ein bis zwei Sekunden“.

17.00 Uhr. Der Lärm der Eruption durchdringt die gesamte Länge der Insel Java. Im Logbuch der „Charles Bal“ ist festgehalten: „Dunkelheit überzog den Himmel, und ein Hagel warmen Bimssteins knatterte aufs Schiff.“

17.30 Uhr. In Anyar trifft der erste Vorbote des furchtbaren Seebebens ein: Eine zwei Meter hohe Welle lässt mehrere vor Anker liegende Schiffe an die Zugbrücke

krachen, schwer beschädigt bleibt sie zurück. Eine halbe Stunde später meldet Mijnheer Schruut aus dem Telegraphenamts von Anyar nach Batavia: totale Finsternis; kurz darauf ist die Leitung unterbrochen. Südlich der Hauptstadt zittert die Erde.

In Telukbetung auf Sumatra, 80 Kilometer nördlich des Krakatau, wird das Meer so unruhig, dass die Menschen aus den unteren Teilen der Stadt fliehen. „Die

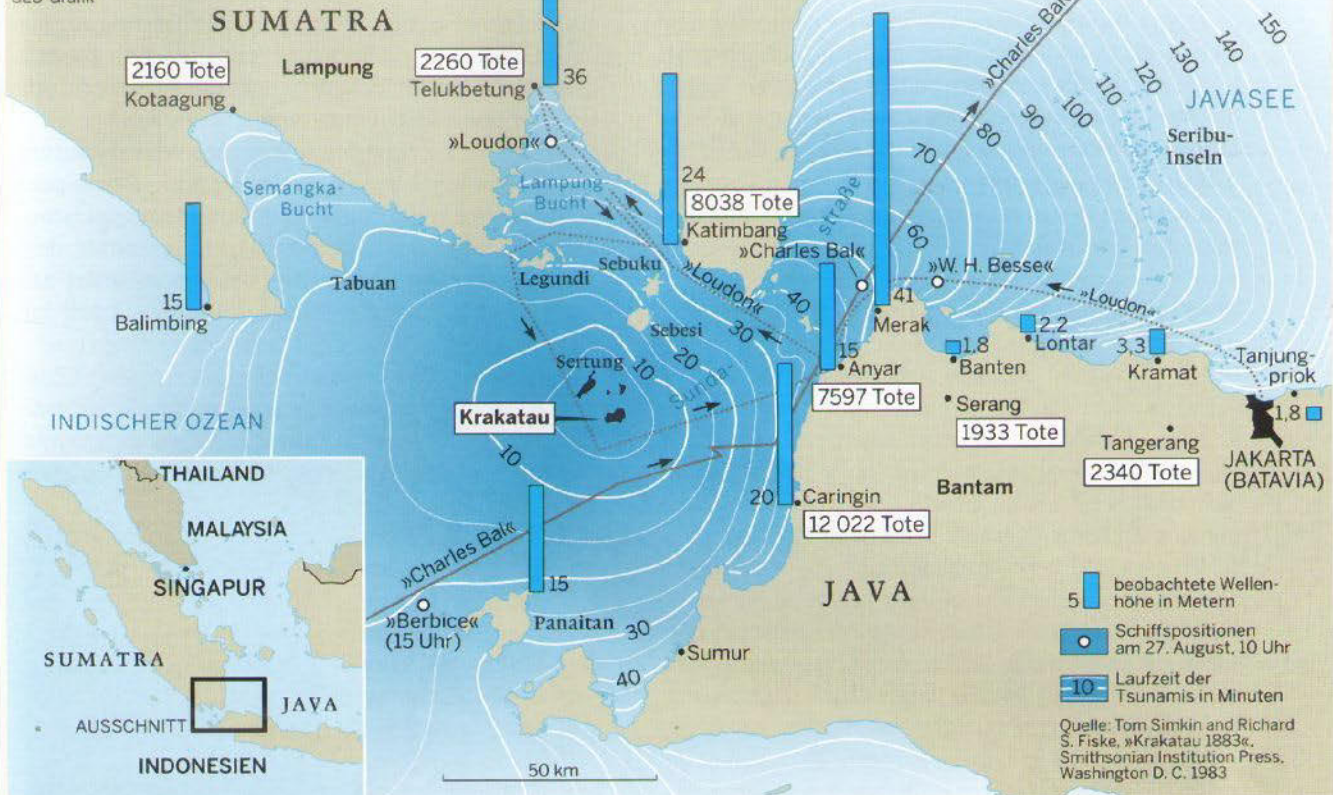
Sonne ging ganz schrecklich unter“, berichtet ein Augenzeuge. „Durch schmutzige Wolkenmassen zuckten wilde Blitze.“

19.00 Uhr. Wild wechselnde Strömungen reißen in Telukbetung mehrere Schiffe aus den Verankerungen, Matrosen gehen über Bord.

In Caringin auf Java, 40 Kilometer südöstlich des Krakatau, spülen Wellen mehrere Häuser weg; aus umgestürzten Lampen wächst ein Feuer, das weitere Häuser zerstört.

Ein Mann  
rennt heran  
und schreit:  
»Der **SEEGEIST**  
kommt! Das  
Meer ist weg!«





Die meisten der 36 000 Opfer sterben nicht durch Aschenregen und giftige Gase, sondern in den Flutwellen, die in der Umgebung des Vulkans mehr als 300 Städte und Dörfer zerstören. Allein im Städtchen Caringin auf Java sterben mehr als 12 000 Menschen, in Katimbang auf Sumatra mehr als 8000. Mit 500 bis 600 km/h rasen die Wogen durch die Ozeane fort, bis ans Kap Hoorn und in den Ärmelkanal

20.00 Uhr. In Katimbang auf Sumatra, 35 Kilometer nordöstlich des Krakatau, klatscht die erste Welle gegen das Büro des holländischen Verwalters Beyerinck. Der schickt seinen Schreiber zum höher gelegenen Wohnhaus: Die Familie solle sich zur Flucht vorbereiten – warm anziehen, noch was essen! Was dann geschieht, hat Frau Beyerinck aufgeschrieben: Ein Diener rennt vorbei und schreit: „Der Seegeist kommt! Das Meer ist weg! Ich habe die Korallenbänke gesehen, und man sieht sie nie, auch nicht bei der tiefsten Ebbe!“



Noch auf der 30 Kilometer nördlich von Krakatau gelegenen Insel Sebu werden die ausgedehnten Regenwälder fast völlig zerstört, vernichtet vom Orkan und den Flutwellen, die den Explosionen folgen

20.30 Uhr. Während der Tumult des Vulkanausbruchs sich mit dem Lärm des aufs Dach prasselnden Bimssteins mischt, versucht Frau Beyerinck noch ihren Jüngsten zu stillen. Da reißt eine Welle das Bürohaus weg und vom Wohnhaus die Treppe. Ihr Mann kann sich auf eine Kokospalme retten, rennt dann zum Wohnhaus und ruft den Dienern zu: „Bindet die Pferde los!“ Und zu Frau und Kindern: „Springt, ich fang euch auf!“ Sie rennen durch riesige Pfützen, versinken in Morast, erreichen den pfadlosen Dschungel, reißen sich Blutegel vom Hals und verschnauften erst gegen Mitternacht, nachdem sie eine Hütte etwa 130 Meter über dem Meer erreicht haben.

Zur selben Zeit setzt sich Mijnheer Schruit, der Telegraphenmeister in Anyar auf Java, zum Abendessen nieder, mit dem Vorsatz, sich gleich morgen früh um die Reparatur der vor drei Stunden unterbrochenen Telegraphenleitung zu kümmern. Für seine Mahlzeit nutzt er eine Viertelstunde, in der die drei Vulkane auf Krakatau schweigen.

23.00 Uhr. Kapitän W. J. Watson von der „Charles Bal“ berichtet, 20 Kilometer vom Krakatau entfernt: „Feuerketten steigen zwischen dem Vulkan und dem Himmel auf und ab, weiße Feuerbälle drehen sich über der Insel. Der Wind ist heiß, erstickend, schwefelig, brennende Schlacke fällt aufs Deck.“



23.32 Uhr. In Batavia bleibt die astronomische Uhr stehen, die Erdstöße haben sie aus dem Tritt gebracht.

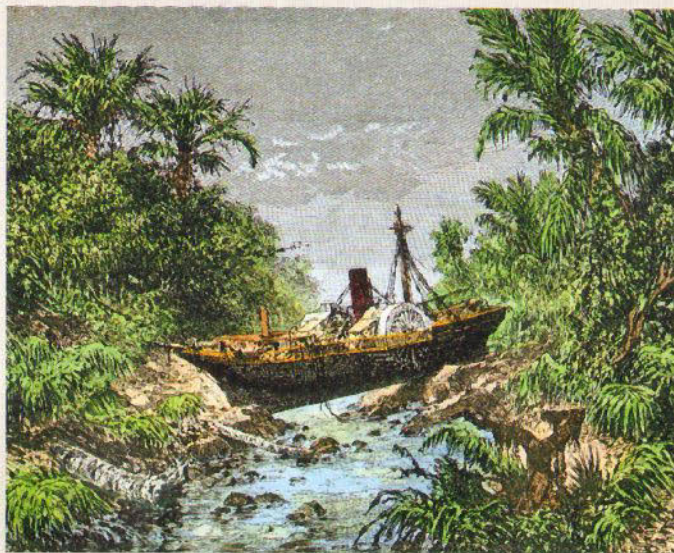
So endet der erste der beiden schwarzen Tage – der weniger schlimme. Noch glaubt niemand an eine Jahrhundertkatastrophe. Aber die meisten der in der Tiefe freigesetzten Gase rumoren noch in den Kavernen und drängen in den Schlot, der auf der Insel Krakatau seine drei Ventile hat.

**MONTAG, 27. AUGUST. 2.00 UHR.** Auf der „Berbice“ liegt die Asche einen Meter dick. „Ich musste meine Beine andauernd aus den Aschenschichten ziehen, damit sie nicht darin begraben wurden“, berichtet der Kapitän. „Ich rief alle Mann mit Laternen an Deck, um die Asche wegzuschaukeln – obwohl die fürchterlichen elektrischen Entladungen und Donnerschläge weitergingen. Die Asche brannte Löcher in die Kleider.“

Auf Java und Sumatra bleibt die Lage bis kurz vor Sonnenaufgang wie seit gestern gewohnt: In Telukbetung so hohe Wellen, dass kein Schiff mehr anlegen kann, auf der „Charles Bal“ tanzen Elmsfeuer an Masten und Rahen, in Batavia sind etliche Schaufenster zerbrochen, und viele Gaslaternen verdüstern sich.

5.00 Uhr. In ihrer Hütte 130 Meter über dem Meer geben die Beyerincks ihren Dienern den Auftrag, ein Huhn zu schlachten und eine Suppe zu kochen – „schnell, vielleicht müssen wir noch höher fliehen!“ Die Hütte ist in Wolken von Asche gehüllt, die das Meer verbergen; Flammen züngeln in den Baumwipfeln.

5.30 Uhr. Der Krakatau holt zum ersten seiner vier verheerenden Schläge aus. Hunderttausende schreckt das Ungewitter aus dem Schlaf – ein Morgengrauen, ohne dass es tagt. Um 5.43 Uhr zeichnet das Barometer in der Gasanstalt von Batavia eine schwere Druckwelle



Den Raddampfer »Berouw«, der im Hafen von Telukbetung auf Sumatra vertäut war, trägt eine Welle fast drei Kilometer landeinwärts. Nahezu unversehrt landet das Schiff dort in einem Flussbett. Die Besatzung ist tot

auf. Weitere Bewohner der Stadt Telukbetung auf Sumatra fliehen in die Berge; andere, die schon gestern abend geflüchtet sind, kehren noch einmal zurück, um ein paar Habseligkeiten zusammenzuraffen.

6.30 Uhr. Die erste der vier großen Wellen kommt, zehn Meter hoch, höher, als sie hier je ein Orkan peitschen könnte – ein Tsunami. In Telukbetung zerstört die Welle den Leuchtturm und die Lagerhäuser; den Raddampfer „Berouw“, der an der Pier geankert hat, wirft sie mit seinen vier Kanonen auf die Hütten der Chinesen, alle 28 Mann der Besatzung kommen um.

6.44 Uhr. Die zweite der vier großen Eruptionen. Nach 13 Minuten ist die Druckwelle in Batavia. Durch die Stadt kriecht die Angst, notiert ein Augenzeuge. Gegen 8.20 Uhr knirscht es in den Mauern vieler Häuser.

9.00 Uhr. Der zweite Tsunami stellt sich auf, die Sintflut kommt. Die Woge schlägt über dem blühenden Städtchen Anyar zusammen und lässt keinen Baum und keine Mauer stehen. Mijnheer Schruit, der Telegraphenmeister, sieht sie nahen, weil er gerade mit seinen Männern plaudert, die die gestern zerstörte Leitung nach Batavia reparieren wollen – sieht sie „wie einen Berg, der vorwärts stürmt, und zwei noch höhere hinter ihr. Ich rannte, so schnell mich meine Beine tragen konnten, den brüllenden Tod auf den Fersen“.

Als Schruit auf einem Berghang atemlos zusammenbricht, sieht er ungläubig das Wasser fallen und dankt dem Himmel, dass er seine Familie in Batavia zurückgelassen hat.

**ALLE, DIE NOCH IN ANYAR WAREN,** als die Welle kam, sind tot. 35 Meter hoch war der Tsunami, wie sich später anhand seiner Spuren berechnen ließ – 35 Meter! In Merak nordöstlich von Anyar zerstört die Welle einen Steinbruch, drückt Kräne zu Blech zusammen und schleudert eine Lokomotive 300 Meter weit ins Land.

9.30 Uhr. Mijnheer Schruit hat sich von seinem Schock erholt, schreibt sofort einen Bericht an seine Vorgesetzten und schickt einen Boten los, nach Serang im Inneren von Java. Fast unbekleidet und völlig verstört stolpert ihm eine europäische Dame entgegen, sie hat ihre beiden Kinder verloren und sucht Hilfe für ihren Mann, der mit verletztem Rückgrat in ihrem

▼  
Aus drei  
Schloten speit  
die Erde ihr  
**HEISSES GIFT.**  
Blitze zucken in  
der Finsternis  
▲





600 Tonnen schwer ist dieser Korallenfelsen, den ein Tsunami auf Java 100 Meter weit ins Land schleudert. Die Riesenwogen entstehen, weil beim Kollaps der Insel Krakatau ungeheure Wassermassen in den Hohlraum stürzen und zudem Millionen Tonnen Schlacke und Gestein ins Wasser fallen

Haus liegt. Schruit wirft ihr einen Sarong über und eilt mit ihr durch den Aschenregen, um zu helfen.

9.58 Uhr. Mit einem Getöse, das bis nach Indien und Australien dringt, speien die Schloten des Krakatau glühenden Bimsstein und glühende Asche in Kubikkilometern himmelwärts, die Asche bis in 40 Kilometer Höhe; und zwei Drittel der Insel mit den drei Vulkanen beginnen in den Hohlraum hinabzustürzen, den das Magma hinterlassen hat – schneller hinausgeschleudert, als sie aus dem Erdinneren nachfließen kann.

Oben zucken Bündel von Blitzen in allen Richtungen durch die schwarze Nacht. In den Donner mischt sich das Heulen des Orkans und das Klatschen des Schlamms, der vom Himmel fällt. „Es war eine der wildesten und schrecklichsten Szenerien, die man sich vorstellen kann“, berichtet der Erste Offizier der „W. H. Besse“: „Der Sturm heulte in der Takelage, das Wasser strömte mit knapp 20 Kilometern pro Stunde dem Krakatau entgegen und riss an unserer Ankerkette. Es stank nach Schwefel, wir hatten Angst zu ersticken. Wir glaubten, die letzten Tage der Welt seien gekommen.“

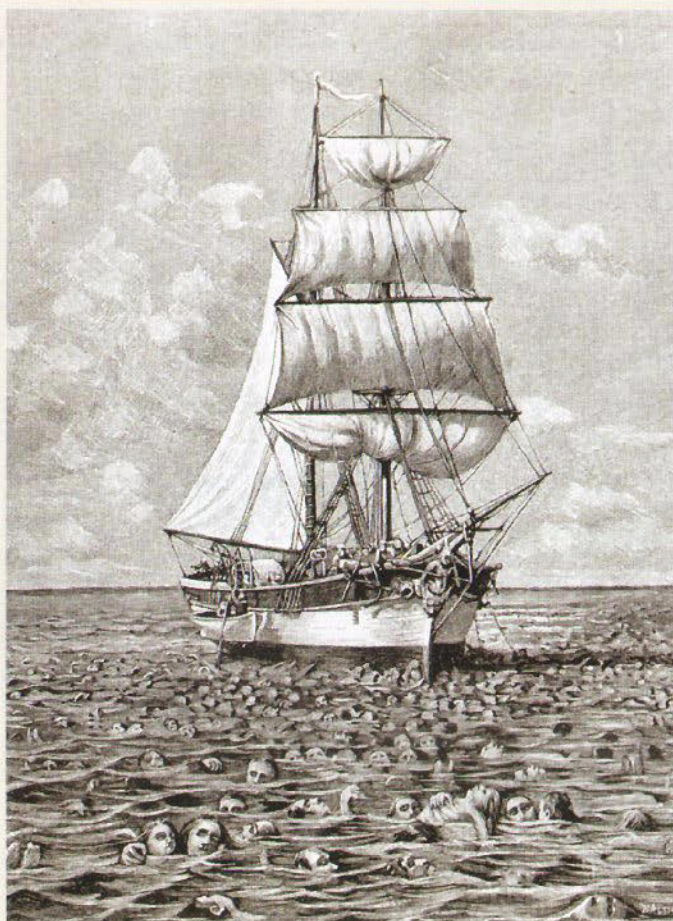
10.00 Uhr. An den Küsten von Java und Sumatra werden die Bäume vom Orkan entwurzelt, Dächer abgedeckt, Hütten eingerissen, Fenster von Schlamm zerschlagen. In Batavia wird es Nacht.

10.15 Uhr. Auf die krakataunahen Küsten bricht die dritte der vier großen Wellen nieder. Bis zu elf Kilometer weit schwappt sie auf Sumatra landeinwärts, losgerissene Korallenblöcke bis zu 600 Tonnen schwer hebt sie auf den Strand, und den Raddampfer „Berouw“ mit den Leichen derer, die nicht über Bord gespült worden sind, trägt sie von Telukbetung drei Kilometer landeinwärts; in einem Flussbett setzt sie ihn fast unversehrt ab, neun Meter über dem Meeresspiegel.

Es ist dieser Tsunami, der die meisten der mehr als 300 Dörfer zerstört und die meisten jener 36 000 Menschen tötet, die dem Krakatau zum Opfer fallen. Und zugleich ist es diejenige Welle, die sich fortpflanzt durch alle Ozeane bis nach Kap Hoorn und in den Englischen Kanal. Warum aber kracht sie so vernichtend auf die Küste, während sie alle Schiffe auf dem offenen Meer unbehelligt lässt? Dazu muss man die Mechanik eines Tsunami verstehen und seine speziellen Ursachen am Krakatau. Das sind vermutlich drei auf einmal:

- der Kollaps von zwei Dritteln der Insel, mit dem ungeheuren Sog des Wassers, das in den Hohlraum stürzt;
- die gleichzeitige Hebung des Südtails der Insel (dort steigen während der Ausbrüche fünf Quadratkilometer Land aus dem Meer);





Noch Wochen nach dem Desaster treiben die Opfer auf dem Meer. »Zwei Tagesreisen hinter Anyar schlugen Hunderte und Aberhunderte von Leichen gegen das Schiff, die meisten nackt«, berichtet ein Matrose

- der Umstand, dass Millionen Tonnen Schlacke und Bimsstein aufs Meer platschen.

Durch je eine dieser Ursachen oder durch das Zusammenwirken aller drei entsteht eine Welle, an der zunächst keineswegs die Höhe ungewöhnlich ist – hier kaum mehr als 60 Zentimeter –, sondern das Tempo. Gewöhnt sind wir an die erhabene Langsamkeit, mit der ein Sturm die Brecher den Strand hinauftreibt. Wo aber nicht der Wind das Wasser bewegt, sondern eine plötzliche Erschütterung, da breitet sich die Welle kreisförmig mit rund 800 Kilometern pro Stunde aus, der Reisegeschwindigkeit eines Düsenflugzeugs.

Stößt nun diese Wasserschlange auf flache Gewässer, dann wird sie gebremst, gestaucht und in die Höhe gedrückt – kirchturmhoch und nur noch etwa 45 Kilometer pro Stunde schnell; nur noch das doppelte Tempo eines Menschen, der um sein Leben rennt.

Eine Bucht staut den Wellenberg zusätzlich durch ihre Trichterform, und im Innersten einer Bucht liegt Telukbetung. Von dort kann niemand mehr berichten, wie es war, als der Tsunami kam – wie es war, von dem brüllenden Ungeheuer ergriffen, hochgeschleudert, niedergepresst, zermalmt, verschlungen zu werden.

10.30 Uhr. Mijnheer Schruit, der Telegraphenmeister von Anyar, erreicht mit anderen Flüchtlingen ein Dorf im Dschungel, die Einwohner kommen ihnen in der schwarzen Nacht des Tropicentags mit Fackeln entgegen und zerren sie in ihre Hütten. »Das Krachen der Bäume im Orkan, der Schlammregen und die Finsternis verbanden sich zu einem Abbild der Hölle.«

Am schlimmsten unter allen Überlebenden geht es gegen 10.30 Uhr den Beyerincks in ihrer Hütte über dem Meer. »Plötzlich wurde es pechschwarze Nacht«, berichtet Frau Beyerinck. »Das Letzte, was ich sah, war Asche, die durch die Ritzen im Fußboden emporquoll wie ein Springbrunnen. Mein Mann rief: ‚Wo ist das Messer? Ich werde uns allen die Pulsadern aufschneiden, dann sind wir von unserem Leiden erlöst.‘ Das Messer ließ sich nicht finden. Ein schwerer Druck warf mich zu Boden, die Luft wurde mir aus dem Mund gesaugt, Klumpen fielen mir auf Kopf und Körper, die Eingeborenen schrien ‚Allah il Allah!‘«

Frau Beyerinck versucht aufzustehen, fällt in heißer Asche auf die Knie, stolpert ins Freie. Als sie ihr Haar zurückstreichen will, verfangen sich die Finger in ihrer verbrannten Haut. Stöhnend in die finstere Hütte zurückgekehrt, findet sie ihren Jüngsten und will ihm die Brust geben, aber sein Herz schlägt nicht mehr. Er ist erstickt oder verbrannt wie mindestens 1000 weitere Opfer an der Südspitze Sumatras.

10.45 Uhr. Die letzte der vier großen Detonationen. Während noch einmal Magma in die Höhe schießt, werden die nördlichen zwei Drittel der Insel Krakatau vollends in die dadurch entstandene Höhlung hinabgesogen, fast sechs Kubikkilometer Inselmasse, und unter 200 Meter Wasser begraben.

11.10 Uhr. In den Leuchtturm an der Westspitze Javas schlägt der Blitz ein, fährt durch die Ketten der dort arbeitenden Sträflinge und verbrennt sie. Serang auf Java meldet: Es regnet erst Bimsstein und dann Schlamm, unter dessen Last die Äste von den Bäumen brechen.

**IN BATAVIA HERRSCHT NACHT.** Die Hühner gehen schlafen, die meisten Europäer räumen die Büros und fahren mit ihren Kutschen heim zu ihren Villen, mit brennenden Laternen und gespenstisch leise auf der zentimeterdicken Ascheschicht.

11.30 Uhr. Der vierte Tsunami. Er trifft vor allem die Semangka-Bucht auf Sumatra, 125 Kilometer nordwestlich des Krakatau; mindestens 3000 Menschen bringt er um.

12.42 Uhr. Der Donner der großen Eruption von 9.58 Uhr kommt in Manila an, 2880 Kilometer entfernt. Die Hafenbehörden glauben an Kanonensalven und rätseln, ob es sich um ein Gefecht oder um das Signal eines Schiffes in Seenot handelt.

13.30 Uhr. An der Südwestküste von Ceylon (heute Sri Lanka), 3100 Kilometer vom Krakatau entfernt, geschieht »etwas Außerordentliches«, wie der Kor-



respondent des „Ceylon Observer“ festgehalten hat: „Das Meer zog sich für drei Minuten bis an den Fuß der Hafenmole zurück und ließ viele Boote auf dem Trockenen, Kulis griffen nach Fischen und Garnelen. Das geschah noch zweimal.“

13.48 Uhr. Das Getöse von 9.58 Uhr hat den größten Teil des Indischen Ozeans überquert und erreicht die Insel Rodriguez östlich von Madagaskar, 4653 Kilometer vom Krakatau entfernt. Von keinem anderen Lärm auf Erden ist überliefert, dass er je eine solche Distanz überbrückt hätte. Es ist, als ob man in Hamburg eine Explosion in Nigeria mit bloßem Ohr vernähme, über die Sahara, das Mittelmeer und die Alpen hinweg.

14.00 Uhr. In Batavia hört der Aschenregen auf. Langsam wird es hell, graue Asche liegt acht bis zehn Zentimeter dick in den Straßen. Die Hähne verkünden einen neuen Tag.

15.00 Uhr. Nun trifft es die „Berbice“ noch einmal, die vor 33 Stunden mit den Feuerkugeln als Erste das Nahen des Unheils zu spüren bekam. Um sie herum ist weiterhin Nacht. Das Schiff hat Schlagseite, weil viele Tonnen Asche in der Takelage kleben. Da fegt aus der stürmischen See ein sechs Meter hoher Brecher übers Deck und macht den Rumpf in seiner ganzen Länge zittern; alle Chronometer bleiben stehen. Nur im Schein der Blitze sieht die Mannschaft ihr Gespensterschiff.

Um 16 Uhr setzt auf den Kokosinseln im Indischen Ozean, mehr als 1100 Kilometer vom Krakatau entfernt, ein zweitägiger Aschenregen ein. Um 21 Uhr fällt in Bombay, mehr als 4500 Kilometer westlich des Krakatau, der Meeresspiegel so plötzlich, dass Tausende von Fischen zurückbleiben und von Passanten gegriffen werden können. In Batavia ist kurz vor Mitternacht ein letztes Rumpeln zu vernehmen. In der Nacht zum 28. August steht der Mond sichtbar am Himmel und beleuchtet Land und Meer so hell, wie die Sonne es zwei Tage lang nicht vermochte.

**DIENSTAG, 28. AUGUST.** Zum ersten Mal bricht wieder ein richtiger Tag an. Die Sundastraße zwischen Sumatra und Java, an der schmalsten Stelle 22 Kilometer breit, ist lückenlos durch einen zwei Meter dicken Bimsstein-Teppich verstopft, auf dem all das liegt, was die Riesenwogen mit zurück ins Meer gerissen haben: Bäume, Balken, Bretter, Türen, Trümmer aller Art – und Zehntausende von Leichen und Kadavern, Menschen, Pferde, Büffel, Ziegen und auch Haie.

Erst vier Tage später, als die Meeresströmung etwas Luft geschaffen hat, kann das erste Schiff sich knirschend eine Rinne bahnen. Die Zufahrt zu dem Strand, auf dem sich bis vor Kurzem das Städtchen Telukbetung erhob, ist durch eine vier Meter dicke Bimssteinschicht blockiert. 2260 Menschen sind hier getötet worden.

Es gibt keine Pflanze mehr auf den Krakatau zugewandten Küstenregionen von Sumatra und Java, nur Bimsstein, Schlamm und Asche.

Vom Krakatau selbst sind vier kleine, noch qualmende Inseln geblieben, von Schlacke und Asche bis zu 70 Meter hoch bedeckt. Weit über fünf Kubikkilometer Asche hat der Vulkan in die Luft geblasen und den größeren Teil auf 800 000 Quadratkilometern ausgestreut; der kleinere reist um die Erde.

Lange vor der Asche kommt die Luftdruckwelle. Den Meteorologen in aller Welt bietet sie ein Schauspiel, wie es kein zweites gegeben hat.

Während der Schall immerhin den Indischen Ozean überbrückt, ehe er nach knapp vier Stunden verebbt, breitet sich die Druckwelle mit annähernder Schallgeschwindigkeit kreisförmig über den gesamten Erdball



1928 steigt eine neue Insel aus dem Meer empor: Anak Krakatau, das »Kind des Krakatau«. Wie ein Menetekel steht gelegentlich eine Wolke aus Asche und Gasen über dem jungen Vulkan – Hinweis auf die tödlichen Kräfte, die in seinen Magmakammern schlummern





**Vulkan mit Nachwuchs:** Die Reste, die von Krakatau übrig blieben (im Hintergrund), sind heute wieder dicht mit Pflanzen bewachsen. Und frisches Grün erobert inzwischen auch Küstenstreifen und Aschehänge des erst 80 Jahre alten Anak Krakatau

aus. 19 Stunden nach der gewaltigsten der vier Explosionen prallen die Wellen in Kolumbien wieder aufeinander. Hier reflektieren sie einander und laufen nach Sumatra zurück.

Den Menschen wird diese Welle nicht bewusst, aber die Barometer registrieren sie jeweils durch einen plötzlichen Druckanstieg, und das viermal auf ihrem Lauf nach Kolumbien und dreimal gleichsam auf dem Heimweg zum Krakatau.

Hinter einem Vulkanausbruch, der dieses leistet, steckt eine Energie von 100 bis 150 Megatonnen des Sprengstoffs TNT – das Doppelte der größten Wasserstoffbombe, die je detonierte.

**SPÄTER ALS DIE LUFTWELLE** trifft die Seewelle ein, sie reist nur mit 500 bis 600 Kilometern in der Stunde. In der Nacht zum 28. August lässt sie in Port Elizabeth in Südafrika, 7500 Kilometer vom Krakatau entfernt, den Meeresspiegel um 66 Zentimeter steigen. In Europa kommt die Welle dagegen nur noch schwach an – zwölf Millimeter in Le Havre am Abend des 28. August.

Länger noch braucht die Asche bei ihrem Rundflug um die Erde. Geschätzte Menge: 300 Millionen Tonnen; geschätzte Geschwindigkeit: 5000 Kilometer pro Tag, vom Jetstream getrieben, der Strahlströmung in durchschnittlich zehn Kilometer Höhe.

Was die Asche bewirkt, das können mindestens drei Viertel aller damals 1,4 Milliarden Menschen mit eigenen Augen sehen, teilt sich monate-, ja jahrelang als lodender Abendhimmel in allen Farben des Regenbogens mit – vor allem in Rubinrot, Blutrot, Purpur, Lila, Lachs- und Bernsteinfarben.

Bedrohlich finden das die einen, hingerissen sind die anderen, und oft bleibt umstritten, ob es der Widerschein eines nahen Feuers ist oder ein rätselhaftes

kosmisches Ereignis – oder gar die Schleifspur des fernen Krakatau?

Auf den Seychellen im westlichen Indischen Ozean geht am 28. August, dem Tag nach dem Desaster, die Sonne verschleiert auf „wie an einem frostigen Morgen in England“, und tags darauf sieht sie mehr aus wie der Mond. Auf Ceylon wird sie als grün am Morgen und blau am Mittag geschildert.

Am 2. September schreibt ein Einwohner von Trinidad in der Karibik an die „Times“ in London: „Heute am späten Nachmittag sah die Sonne wie eine blaue Kugel aus, und nachdem sie untergegangen war, leuchtete der Himmel derart rot, dass wir glaubten, es brenne in der Stadt.“ Auf den Karolinen nördlich von Neuguinea ist die Sonne am 7. September „von krankem grünlichen Blau, als hätte sie die Pest“.

In Batavia sind inzwischen die Hilfsmaßnahmen angelaufen. Dampfer mit Lebensmitteln, Tierfutter, Trinkwasser und Kleidung verlassen den Hafen, auch mit Petroleumfässern, um Kadaver zu verbrennen, dort, wo sie in Massen herumliegen. Einzelne Leichen werden begraben, zweieinhalb Gulden können sich die Einheimischen mit jedem beglaubigten Begräbnis verdienen. Noch weiß niemand, wie viele Menschen wirklich umgekommen sind.

Die Bimssteinteppiche treiben mit durchschnittlich 23 Kilometern pro Tag über den Indischen Ozean nach Westen, aber dick verharren andere in der Sundastraße. Anfang Oktober berichtet ein Matrose: „Zehn Tage lang segelten wir durch Bimssteinfelder. Zwei Tagesreisen hinter Anyar schlugen Hunderte und Aberhunderte von Leichen gegen das Schiff, die meisten nackt.“

Ihre erstaunlichsten optischen Wirkungen ruft die Asche des Krakatau in aller Welt erst Ende November hervor. Was am 27. November, genau drei Monate nach dem Drama, in New York geschieht, liest sich tags darauf in der „New York Times“ so: „Kurz nach 17 Uhr entzündete sich der westliche Horizont zu einem leuchtenden Scharlachrot. Die Menschen auf den Straßen waren bestürzt über diesen unglaublichen Anblick, versammelten sich in kleinen Gruppen an allen Ecken und starrten nach Westen. Viele glaubten, das sei eine Feuersbrunst, die gerade Staten Island oder die Küste von New Jersey verwüste. Die Wolken verfärbten sich langsam ins Blutrote und mit ihnen das Meer. Schließlich gingen die leuchtenden Farben in ein mattes Rosa über, das langsam in der Dunkelheit verschwand.“

**WANN ABER SETZT** sich die Einsicht durch, dass dies die Reflexe der Asche vom Krakatau beim vermutlich zwölften Umlauf um die Erde sind – und gar die Folgerung daraus, dass auf unserem Planeten alles mit allem zusammenhängt, Luft, Land, Meer und Sonnenuntergang?

Die erste Erkenntnis kommt schon bald, die zweite so recht erst rund 100 Jahre später. Da bestätigt sich



die These der Kulturphilosophen, dass der Geist des Menschen dazu neigt, weit hinter seinen eigenen technischen Erfindungen zurückzubleiben.

Im Herbst 1883 freilich hat die Wissenschaft noch längst nicht bewiesen, dass es der Krakatau ist, der die New Yorker das Fürchten lehrt. Manche Experten tippen auf Meteorschwärme. Erst am 20. Dezember stellt die angesehene Zeitschrift „Nature“ fest, der Zusammenhang mit der Eruption in der Sundastraße habe sich „definitiv bestätigt“.

Einige der Bimssteinteppiche haben unterdessen immer noch eine Länge von 2000 Kilometern. Der Kapitän des Dampfers „Bothwell Castle“ notiert: „Manchmal waren die Massen so dick, dass Matrosen auf ihnen herumspazierten. Wenn wir Fahrt machten, gab es ein ständiges Knattern und Knirschen.“

Von einem anderen Dampfer wird berichtet: „Eine Eisenstange, die wir hinunterwarfen, blieb auf dem Bimsstein liegen. Das Schiff bahnte sich eine Fahrrinne, die sich hinter ihm sofort wieder schloss. Es war, als dampften wir wie ein Pflug durch trockenes Land.“

Und von einem dritten Schiff, 4200 Kilometer westlich des Krakatau: „Die größeren Bimssteinbrocken waren mit Muscheln derart bepackt, dass wir uns fragten, ob sie noch lange schwimmen würden.“ Zwischen den Muscheln tummeln sich unzählige Kriechtiere, zwischen den Brocken „ruderten Legionen von Krebsen“.

Was den Grund der aufregenden Sonnenuntergänge angeht, so lässt die „New York Times“ nicht locker. Am 23. Januar 1884, fünf Monate nachdem es den Krakatau zerrissen hat, schreibt sie: „Auf Long Island hat ein Wissenschaftler den Staub in der Atmosphäre durch ein raffiniertes Experiment geprüft: Zwei Nächte lang ließ er seine Brille im Freien liegen. Es schlug sich jedoch kein Staubpartikel auf ihr nieder. Also wird niemand, der etwas von Brillen versteht, noch behaupten können, dass Staub vom Krakatau in nennenswertem Umfang in der Atmosphäre wäre.“

In Wirklichkeit bleibt er dort mehr als drei Jahre lang. Der englische Maler William Ascroft hält zwischen dem 26. November 1883 und dem 13. September 1886 in 530 Pastellskizzen fest, wie die Asche aus der Sundastraße den Himmel leuchten lässt und zuletzt noch die Sonne mit einem kupferroten Hof versieht.

Die Erde kühlt sich im ersten Jahr nach der Explosion im Durchschnitt um 0,5 Grad ab, erst 1888 ist die Normaltemperatur wiederhergestellt. Die Reste des Krakatau werden von Experten vieler Nationen durchstreift, erforscht, vermessen. Schon im Mai 1884 entdecken französische Wissenschaftler eine winzige rote Spinne in der Lava-Wüste einer der Rest-Inselchen. Zwei Jahre später haben sich 34 Pflanzenarten angesiedelt, 1897 gibt es wieder eine dichte Pflanzendecke. Der alte Tropenwald aber hat sich auf diesen Inseln bis heute nicht vollständig erholt.

Im Dezember 1927 wird es auf der Inselgruppe erneut unruhig, und 1928 steigt gar ein neues Inselchen aus den Fluten empor, „Kind des Krakatau“ genannt. Dreimal versinkt es wieder, viermal steigt es empor.

Inzwischen ist es auf 200 Meter Höhe angewachsen, oft brummend und Schwefeldämpfe speiend: Dabei kommt 1993 eine amerikanische Touristin ums Leben.

**BIS ZU EINER NEUEN** großen Eruption wird sich der Krakatau vielleicht noch einmal 100 Jahre Zeit lassen. Wann und wo aber wird die Erde das nächste Mal ihren immer wieder verblüfften Bewohnern deutlich machen, dass sie eine Feuerkugel mit einer erschreckend dünnen Kruste ist?

Schon in neun Kilometer Tiefe stießen die Bohrer von Windischeschenbach in Bayern im Jahr 1994 auf Gestein, das 300 Grad heiß und zähflüssig wie Honig war – und was sind neun Kilometer? Ein Siebenhundertstel der Entfernung zum Mittelpunkt der Erde. Und auf diese erbärmlich dünne Haut bauen wir

Wolkenkratzer und Bausparhäuschen, am liebsten „für die Ewigkeit“, wie wir bei Domen und Pyramiden sagen. Woher nehmen wir so viel Vertrauen?

Daher vor allem, dass wir, gemessen an den Zeitabständen geologischer Katastrophen, nur Eintagsfliegen sind mit unseren 80 Lebensjahren.

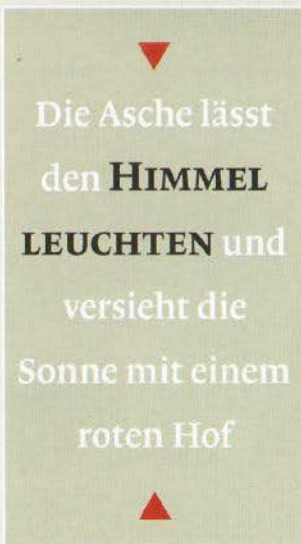
Es ist die Kürze unseres Daseins, die uns zu der Illusion verführt, er verspreche uns Beständigkeit – dieser im Inne-

ren kochende Planet, dem nicht etwa die Kruste die annähernde Kugelgestalt bewahrt, sondern die Rotation.


Wollte man einen Globus zu einem wirklich realistischen Modell der Erde machen, so dürfte er natürlich nicht hohl und schon gar nicht aus Pappe sein: Aus Eisen, Nickel, Stein wäre er zu formen, und das hieße, dass er bei einem Meter Durchmesser fast drei Tonnen wöge. Und ein Motor müsste ihn in permanenter Drehung halten, sonst sänke er langsam und zischend zu einem Pfannkuchen zusammen, von Flammen umzüngelt, nach Schwefel stinkend und bis zu 7000 Grad heiß.

So ist sie, die alte Erde, und hin und wieder erzählen uns Vulkane die Wahrheit über sie. □

**Wolf Schneider.** 84. ist seit mehr als 60 Jahren Journalist und Autor zahlreicher Reportagen, Essays, Polemiken und Sachbücher („Der Mensch. Eine Karriere“, Rowohlt 2008). Er war der erste Leiter der Hamburger Henri-Nannen-Schule. Schneider lebt in Starnberg.








Geowissenschaft

# Am Puls des Planeten

Sie steigen tief in finstere Höhlen hinab, wagen sich gefährlich nahe an die Magmakammern Feuer speiender Berge und harren monatelang in der Kälte der Antarktis aus: In waghalsigen Unternehmungen erforschen Geowissenschaftler die Kräfte unseres Planeten – auch, um den Naturgewalten ein wenig von ihrer Unberechenbarkeit zu nehmen

Text: Sebastian Witte



A full-page photograph of a person in a dark suit and headlamp exploring a vast, blue, textured ice cave. The person is positioned in the lower-left quadrant, facing away from the viewer and slightly to the right. The cave walls are composed of large, layered ice formations with visible striations and cracks. The lighting is dim, with the primary light source being the person's headlamp, which casts a warm, orange glow on the ice surface directly in front of them. The rest of the cave is bathed in a cool, blue light, creating a sense of depth and mystery. The overall texture of the ice is rough and uneven, with various ridges and depressions.

Mehrere Stunden dauert der Abstieg in die 172 Meter tiefe Gletscherhöhle auf Grönland. Der französische Glaziologe Janot Lamberton erforscht seit rund 20 Jahren die Architektur des nordpolaren Eisschildes und entnimmt unter anderem Gletscherproben, die Aufschluss über die Erdgeschichte geben



Die Lava des Ätna in Süditalien ist nicht so explosiv wie die anderer Vulkane. So kann sich die deutsche Geologin Gertrud Keim der glutflüssigen Masse bis auf wenige Meter nähern – jedoch nur im Hitze-Schutzanzug













Dampf bricht aus der Flanke des antarktischen Vulkans Mount Erebus und gefriert bei minus 30 Grad Celsius zu einem Eisschlot. Seit mehr als 30 Jahren dokumentieren Forscher der Universität New Mexico Tech jede Eruption des Feuerbergs, heute sogar mit Radarfallen und Videokameras





**M**it Hightech-Apparaten untersuchen Geowissenschaftler, nach welchen Gesetzmäßigkeiten Kontinentalplatten aneinander vorbeischieben, wann Erdbeben den Boden erschüttern, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Tsunami ausbreitet und weshalb sich Schneeflocken zu einer gefährlichen Rutschbahn für eine Lawine formen. Dafür simulieren die Forscher Monsterwellen am Computer, zerquetschen Steinblöcke unter Hochdruck, lassen Minivulkane im Labor ausbrechen und ahmen in Klimakammern Wetterverhältnisse nach. Ihr Ziel: Die Kräfte der Erde zu verstehen, um möglichst rasch zu erkennen, ob sich eine Naturkatastrophe anbahnt. Denn oft handelt es sich nur um wenige Sekunden, in denen eine Warnung Hunderttausende Menschenleben retten kann

## Lawine im Labor

**Um Schneekatastrophen vorherzusagen, muss Ed Adams Eiskristalle studieren: Er züchtet sie**

**E**d Adams weiß: Meist sind es die instabilen Schneeschichten, die eine Lawine auslösen. Denn sie wirken wie ein Gleitmittel, auf dem obere Schneelagen zu Tal donnern können.

Doch während die Arbeit vieler Experten darin besteht, solche schwachen Schichten in gefährdeten Hängen zu lokalisieren oder sie in Feldversuchen zu ergründen, will der 58-jährige Materialforscher der Montana State University auf andere Weise herausfinden, wie sie entstehen: mit der Erforschung des Schnees im Labor.

Denn Feldstudien allein erlauben keine verlässlichen Lawinenvorhersagen. Zu tückisch und unberechenbar verhält sich die weiße Materie: Ständig ändert sie ihre Form. „Selbst eine stabile Schicht aus relativ festem Schnee kann innerhalb von Stunden brüchig und schwach werden“, sagt Adams.

Unter kontrollierten Bedingungen will er deshalb erforschen, wie es dazu kommt: Wie Wind, Sonne, Niederschlag, Bodenwärme und Außentemperatur die Oberfläche einzelner Schneekristalle verändern und ihre Anordnung beeinflussen.

Im November 2008 haben Adams und seine Kollegen ein neues, 250 Quadratmeter großes und auf bis zu minus 40 Grad Celsius kühlabes Hightech-Labor in Betrieb genommen, erhellt von Speziallampen, in dem die Wissenschaftler unterschiedliche Sonneneinstrahlungen und Wetterbedingungen simulieren können – etwa die verschneiten Bergkuppen. Dank neuartiger Apparaturen vermögen die Forscher Schneekristalle jeder Art zu züchten. Und in einem Rasterelektronenmikroskop lässt sich im Detail studieren, wie die filigranen Gebilde auf veränderte Bedingungen reagieren.



Im Kältelabor analysiert Ed Adams (oben rechts) Schneekristalle

„Ich kenne weltweit nichts Vergleichbares“, schwärmt Adams. Und er ist zuversichtlich, dass seine Gruppe das komplexe Verhalten des Schnees schon bald besser verstehen wird. Die Experten vor Ort werden dann noch früher erkennen können, ob sich eine Schneeschicht zur Rutschbahn entwickelt.



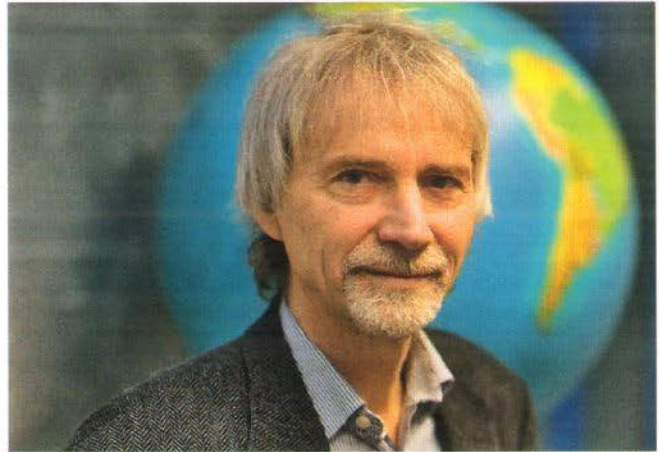
# Nach dem Beben

**Vom Grundlagenforscher zum Katastrophenschützer: Der Potsdamer Seismologe Jochen Zschau will Menschen retten**

Sein halbes Forscherleben glaubte Jochen Zschau daran, dass er eines Tages die Kräfte des Erdinneren begreifen und dann in der Lage sein würde, ein Erdbeben vorherzusagen. Heute weiß der 64-jährige Seismologe, dass so etwas prinzipiell nicht möglich ist. Dass es vielmehr auf die Sekunden nach der Erschütterung ankommt, wenn man die Bevölkerung warnen will.

Zschau leitet die Sektion „Erdbebenrisiko und Frühwarnung“ am Geoforschungszentrum in Potsdam. Er ist vom Grundlagenforscher zum Katastrophenschützer geworden – und versucht gemeinsam mit seinen Kollegen, zumindest die Auswirkungen eines Bebens zu mildern.

So vermessen sie derzeit vom Satelliten aus die besonders gefährdete Stadt Istanbul, peilen von oben Gebäudehöhen an und ermitteln die Bauqualität einzelner Häuser. „Würde man die fünf Prozent der unsichersten Gebäude verstärken“, so Zschau, „könnten 15 Prozent der zu erwartenden Opfer mit dem Leben davonkommen.“ Ein weiteres Viertel der geschätzten Todesopfer könnte gerettet werden, hielte man bei Neubauten die Vorschriften ein. „Und eine grundlegende



Jochen Zschau ist Abteilungsleiter für Desasterforschung in Potsdam

Verbesserung der medizinischen Vorsorge“, so Zschau, „würde die Opferzahl um weitere 20 Prozent reduzieren.“

Damit die offiziellen Stellen im Ernstfall reagieren können, überspannen die Forscher die gesamte Bosphorusregion mit einem dichten Netz seismologischer Geräte. Jedes einzelne vermag eine zerstörerische Erdbebenwelle blitzschnell zu detektieren und über Funk Alarm zu schlagen.

So weiß zwar auch Jochen Zschau nach wie vor erst hinterher, wann und wo die Erde gezittert hat, aber er hofft, dass die türkische Regierung seinen Empfehlungen folgen wird – und dass so vielen der Erdbebentod erspart bleibt.

# Die Stimme der Lava

**Donald Bruce Dingwell zündet »Magmabomben« im Labor und horcht auf die Geräusche des glutheißen Gesteins, um vor Eruptionen zu warnen**

Das Department für Geo- und Umweltwissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München besitzt einzigartige Maschinen zur Erforschung der Feuerberge: „Fragmentationsbomben“ und spezielle Hochdruckpressen, die vulkanische Eruptionen im Labor nachahmen.

Dabei handelt es sich um Versuchskammern, entwickelt von dem gebürtigen Kanadier Donald Bruce Dingwell, 50, in denen vulkanisches Gestein bei Drücken bis zu 50000 Bar und Temperaturen bis 1300 Grad zum Explodieren gebracht wird – unter Bedingungen also, wie sie in den Tiefen der Erdkruste herrschen.

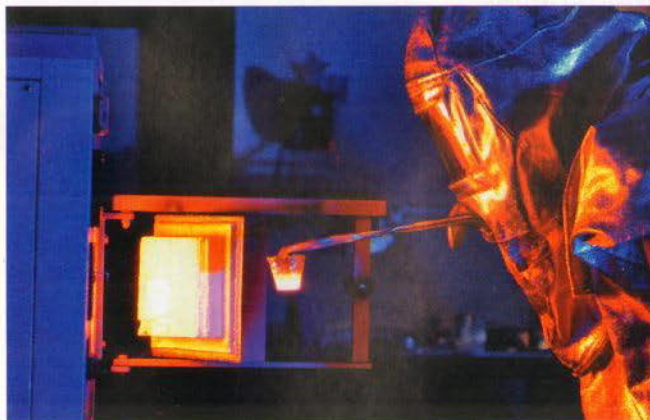
Hochgeschwindigkeitskameras verfolgen den künstli-

chen Ausbruch, und die ausgespienen Fragmente können aufgefangen und später analysiert werden.

So fanden die Forscher kürzlich heraus, dass das schnell aufsteigende Magma vor einer Eruption charakteristische Geräusche abgibt: Die zähflüssige Gesteinsschmelze verformt sich dabei derart stark, dass sie ihren inneren Zusammenhalt verliert und bricht. Das zerbrechende Magma verursacht Minibeben, und die lassen sich akustisch registrieren. Mit hochempfindlichen Sensoren ist es Dingwell und seinen Kollegen möglich, diese Bruchgeräusche aufzuzeichnen. Da die Signale eine unmittelbar bevorstehende Eruption

ankündigen, eignen sie sich insbesondere für die Entwicklung eines völlig neuen Frühwarnsystems.

Zwar funktioniert die seismo-akustische Überwachung eines Vulkans vorerst nur im Labor, doch Dingwell hofft, dass sie auch den Praxistest bestehen wird: „Sollten wir Erfolg haben, würden die Chancen, Menschenleben in von Vulkanen bedrohten Gebieten durch eine rechtzeitige Vorwarnung zu retten, erheblich steigen.“



In seinem Münchner Labor untersucht der Geologe Donald Bruce Dingwell, wie sich Magma vor einem Vulkanausbruch verformt



# Wächter der Wellen

**Jörn Lauterjung hat ein Tsunami-Frühwarnsystem mitentwickelt: Zahlreiche Sensoren erfassen jede Meeresschwingung vor der Küste Indonesiens**

**M**ehr als 225 000 Menschen kamen bei der Flutwelle vom Dezember 2004 ums Leben. Um eine solche Katastrophe in Zukunft zu verhindern, hat Jörn Lauterjung, 54, vom Geoforschungszentrum in Potsdam mit Kollegen ein Warnsystem entwickelt.

Dazu gehören mehr als 160 seismische Stationen an Land, die die gesamte Region kontinuierlich überwachen. Sie können innerhalb weniger Minuten einen Erdstoß lokalisieren, auch im Meer, und dessen Stärke ermitteln.

Doch nicht jedes Seebeben löst einen Tsunami aus. Je nach Tiefe und Typ der Er-



Am Computer berechnen Forscher um Jörn Lauterjung, mit welcher Kraft sich ein Tsunami nach einem Seebeben ausbreitet

schütterung hebt oder senkt sich der Ozeanboden mehr oder weniger stark – oder gar nicht. Ob wirklich eine Flutwelle droht, lässt sich nur durch Messungen im Meer ermitteln. Dazu haben die Potsdamer Hightech-Bojen konstruiert, die selbst zentimeterfeine Schwankungen des Meeresspiegels erfassen. Läuft eine Welle irgendwo auf das Festland zu, registrieren zudem Pegelstationen vor der Küste deren Höhe.

Da es zu lange dauern würde, die Gefährdung der Anrainerstaaten zu ermitteln, wenn sich die Welle bereits gebildet hat, simulieren die Forscher alle Szenarien: Für Hunderte mögliche Bebenherde und -stärken sowie unterschiedliche Meeresbodenreliefs berechnen sie, wie sich ein Tsunami entwickeln würde. So lässt sich im Ernstfall sofort auf jenes Modell zugreifen, das mit den aktuellen Daten am besten übereinstimmt.

Per Radio und TV, SMS oder Sirene soll die Bevölkerung dann gewarnt werden. Im Mittel, sagt Lauterjung, werden die Menschen so 20 Minuten Zeit gewinnen, um sich in Sicherheit zu bringen.

# Wenn Gestein bricht

**Um Erdbebenrisiken abzuschätzen, simuliert David Lockner in seinem kalifornischen Labor, wie Erdplatten aneinander vorbeirutschen**

**D**er Geophysiker David Lockner simuliert in seinem Labor südlich von San Francisco, was sich in Kalifornien seit Jahrmillionen abspielt: Die Pazifische Platte drückt nach Norden, die Nordamerikanische nach Süden. An den Grenzflächen können sie sich ineinander verkeilen und bauen über lange Zeiträume immense Spannungen auf, bis sie sich plötzlich lösen. Dann schnellte eine Platte ruckartig an der anderen vorbei – und die Erde bebt.

Im Labor ahmen Lockner und seine Kollegen diese Vorgänge mit einem Steinzyylinder nach, den sie Bedingungen aussetzen, wie sie ähnlich auch in großer Tiefe herrschen: mehreren Tausend Bar Druck und extremer Hitze. Sie ermitteln, wie stark ein Kolben auf die schräg angeschnittene Probe einwirken muss, um beide Hälften gegeneinander zu verschieben.

Akustische Sensoren zeichnen auf, wo und wann sich feinste Risse durch das Gestein fräsen, wie es dem Druck schließlich nachgibt und bricht. Am Computerbildschirm verfolgen die Geologen den gesam-

ten Prozess und werten ihn aus. Die Ergebnisse helfen zu verstehen, was genau bei einer tektonischen Bewegung vor sich geht. Dieses Wissen macht es etwa möglich, das Erdbebenrisiko für eine bestimmte Region besser angeben zu können.

Da die Bodenverhältnisse aber weitaus komplexer sind als die im Labor, können die Forscher nicht vorhersagen, wann genau es zum Beben kommt – wohl aber dessen Folgen: Bei einem Beben der Stärke 7,8 rechnen sie im Süden Kaliforniens mit 200 Milliarden Dollar Schäden und 1800 Toten.



Unter Hochdruck und Extremtemperaturen verformt sich Gestein, bis es bricht. David Lockner verfolgt diesen Prozess mit akustischen Sensoren



# Das Archiv im Eis

Aus winzigen Bläschen im antarktischen Eis liest der Glaziologe Heinrich Miller die Klimageschichte der vergangenen 900 000 Jahre ab

**Z**ehn Jahre lang, von 1996 bis 2006, hat Heinrich Miller, 65, vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven, Forscherteams aus zehn Ländern geleitet, die an zwei Bohrstationen in den antarktischen Eisanpanzer vordrangen. Je tiefer sie kamen, desto älter war das Eis. Schließlich erreichten sie eine Bohrtiefe von 3270 Metern, fünf Meter oberhalb des Felsuntergrunds, ein Rekord bis heute.

Das Eis in diesen Schichten ist mehr als 900 000 Jahre alt und enthält Eiskristalle von bis zu 40 Zentimeter Größe. Sie erlauben den Forschern einen einzigartigen Blick in die Klimageschichte der Erde. Denn die Eismassen haben sich in dieser Zeit Lage um Lage aus Schnee gebildet und dabei die einstige Atmosphäre in Form feiner Luftbläschen eingeschlossen.

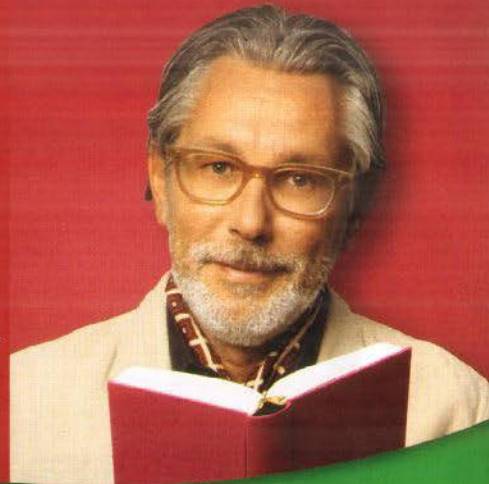
Deren Zusammensetzung analysieren die Wissenschaftler jetzt in Bremerhaven. Sie entlocken den armdicken, etwa drei Meter langen Eiskernen Informationen über vergangene Treibhausgas-Emissionen, Temperaturen, Niederschläge oder den Gehalt an Staubpartikeln – und rekonstruieren so unter anderem, wie das Eis im Laufe der Zeit immer wieder ganze Kontinente erobert hat. Auch helfen die Ergebnisse bei der Entwicklung und Prüfung von Rechenmodellen zur Vorhersage künftiger Klimaschwankungen.

Einen kleinen Teil jeder Probe lassen die Glaziologen stets unberührt. „Denn es könnte ja sein“, so Heinrich Miller, „dass in den nächsten zehn oder 20 Jahren jemand eine zündende Idee hat, was noch in dem Eis stecken könnte.“ □

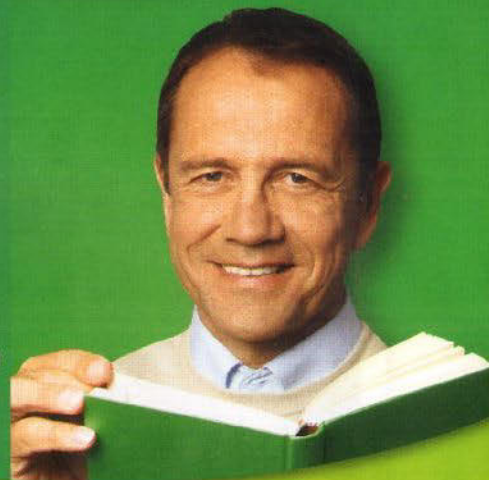


Mit modernsten physikalischen und chemischen Methoden untersucht Heinrich Miller Eisbohrkerne aus der Antarktis

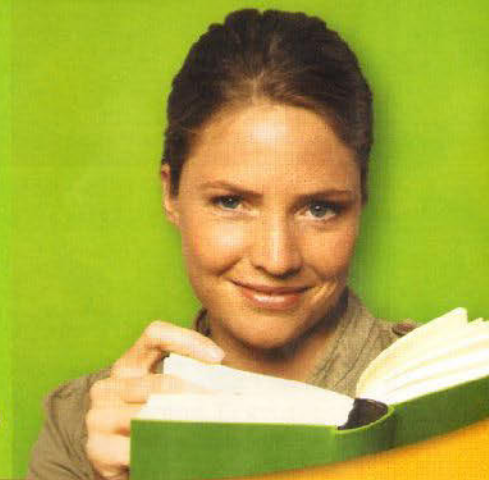
antiquarisch



vergriffen



gebraucht



## Hier findet jeder sein Buch.

- Mehr als 28 Mio. Bücher – die weltweit größte Auswahl deutschsprachiger Titel
- Über 4.100 professionelle Antiquariate
- Einfach & schnell online bestellen
- Viele Zahlungsarten, u.a. offene Rechnung

neu

**ZVAB.com**  
ZENTRALES VERZEICHNIS ANTIQUARISCHER BÜCHER

DAS ONLINE-ANTIQUARIAT





Erdbeben

# DAS RUMOREN AUS DER TIEFE

Text: Ute Kehse; Fotos: Chien-Min Chung

Erdbeben gehören zu den Naturkatastrophen mit den meisten Opfern. Verlässliche Warnungen wären deshalb ein Segen – doch sie sind bislang unmöglich. Zu komplex und zu schwer zu durchschauen sind offenbar jene Kräfte, die in den Tiefen der Erde walten und die katastrophalen Erschütterungen auslösen





**D**er chinesische Geophysiker Liu Qiyuan, Leiter des Instituts für Geologie der chinesischen Erdbebenbehörde, war sich sicher: In der Provinz Sichuan stand ein starkes Erdbeben bevor. Im Jahr 2006 ließ er deshalb 300 Seismographen im Bereich der Anninghe-Verwerfung aufstellen. Messungen hatten gezeigt, dass sich die Erdkruste dort um einen Zentimeter pro Jahr verschiebt – viel mehr als an anderen Stellen in Sichuan.

Das dichte Netz der Seismographen sollte leichte Erschütterungen von harmlosen Erdbeben registrieren, die regelmäßig in aller Welt auftreten und auch in Sichuan die Erde kaum merklich vibrieren ließen. Ähnlich wie ein Arzt mit Ultraschallwellen das Körperinnere sichtbar macht, wollte Liu Qiyuan mithilfe dieser leichten Bebenwellen in das Innere der Erde schauen und eine drei-

dimensionale Karte der gefährlichen Verwerfung erhalten – jener Fläche innerhalb der Erdkruste also, an der sich Gesteinsblöcke gegeneinander bewegen. Die genaue Kenntnis vom Aufbau dieses Bereiches sollte nun helfen, das nächste große Beben exakter vorauszusagen.

Am 12. Mai 2008 krachte es tatsächlich in Sichuan: Ein starkes Beben hob den Boden entlang einer 200 Kilometer langen Bruchfläche um gewaltige drei bis fünf Meter. Allerdings nicht dort, wo der Geophysiker es erwartet hatte, sondern einige Hundert Kilometer nordöstlich.

Rund 70000 Menschen starben, fast fünf Millionen wurden obdachlos. Liu Qiyuan hatte recht behalten – und sich dennoch schrecklich geirrt.

**AUCH IM 21. JAHRHUNDERT** scheint eine verlässliche Erdbebenvorhersage unmöglich zu sein. Offenbar verstehen die Geo-

**Fast fünf Millionen Chinesen** verlieren ihr Zuhause, als am 12. Mai 2008 der Boden in der Provinz Sichuan wankt. Forscher hatten ein solches Beben in der Provinz erwartet – allerdings an einem anderen Ort

wissenschaftler das Phänomen nach wie vor noch nicht gut genug. Es geht ihnen ähnlich wie einem Arzt, der den Körper seines Patienten zu wenig kennt, darum vorauszusagen, wie er reagieren wird.

Dabei hatten sich die Geowissenschaftler bereits in den 1960er Jahren am Ziel gewöhnt und geglaubt, die Erde zu begreifen. Der Mechanismus, der alles zu erklären schien, heißt: Plattentektonik.

Wegbereiter dieser revolutionär neuen Sicht der Erde war der Deutsche Alfred Wegener. Ihm war aufgefallen, dass die Kontinente perfekt zusammenpassen, offenbar zu Urzeiten eine einzige Landmasse gebildet hatten und später auseinandergedriftet waren. Bereits 1912 trug



er seine Theorie von der „Kontinentalverschiebung“ vor, löste bei den meisten Kollegen aber nur Gelächter aus.

Erst gut 40 Jahre später setzte sich seine Sicht durch und wurde um 1965 zur Theorie der Plattentektonik erweitert.

Dieses Modell, das bis heute ständig verfeinert wird, beschreibt, welche Kraft die Kontinente auf der Erdkugel driften lässt: Heißes, verformbares Gestein steigt langsam im Erdmantel auf und verschiebt dabei die 13 großen und einige kleinere Gesteinsplatten, aus denen sich die Oberfläche unseres Planeten zusammensetzt.

Mit einer Geschwindigkeit von zwei bis 15 Zentimetern pro Jahr gleiten die Platten so über die Oberfläche der Erdkugel (siehe auch Seite 82).

In bestimmten Regionen, etwa im Himalaya, stoßen zwei Platten frontal zusammen und türmen dabei riesige Gebirge auf. Anderswo, etwa in Südamerika, taucht eine Ozeanplatte in die Tiefe ab

und verschwindet im Erdmantel; dabei schiebt sie eine andere empor (und die bildet die Anden). Wieder andere Platten schrappen seitlich aneinander vorbei.

Die Theorie der Plattentektonik kann endlich erklären, weshalb sich Erdbeben

Zwei Krustenplatten  
gleiten aneinander  
vorbei, **VERHAKEN** sich  
und lösen sich ruck-  
artig – die Erde kracht

in bestimmten Gegenden häufen. Denn an den Nahtstellen zwischen den Platten haften die Gesteine zusammen; dort kommt die Bewegung vorübergehend

zum Stillstand. Die Hauptmassen der beiden riesigen Platten treiben hingegen weiter aneinander vorbei. Das ist möglich, weil die scheinbar so festen, starren Gesteine unter hohem Druck biegsam und elastisch werden können.

So baut sich allmählich Spannung in den verhakten Bruchzonen auf – wie in einem Gummiband, das in die Länge gezogen wird. Wird sie zu stark, lösen sich die aneinander haftenden Stellen mit einem Ruck: Es kommt zum Beben.

Um ein weiteres Bild zu nutzen: Der Vorgang ähnelt zwei Autos, die so dicht aneinander vorbeifahren, dass sich ihre Seiten berühren und ineinander verankern. Setzen die Fahrer unbeirrt ihren Kurs fort und bestehen die Karosserien aus flexiblem Material, dehnen sich die verhakten Teile ein Stück weit. Bis sie sich schließlich krachend voneinander trennen und in ihren Ausgangszustand zurückschnellen.





Dank dieser Erkenntnis schien nun auch eine grobe zeitliche Voraussage von Erdbeben möglich: Denn hatte es in einer Region ein Beben gegeben – hatte sich also die Verhakung gelöst –, müsste sich anhand der Plattengeschwindigkeiten im Prinzip ausrechnen lassen, wann die Spannung wieder groß genug ist, um das nächste Beben auszulösen.

Anfang 1975 sagten chinesische Wissenschaftler aufgrund dieser Erkenntnisse (sowie weiterer Indizien, etwa kleinerer Erdstöße, dem merkwürdigen Verhalten von Tieren und schwankenden Pegelständen in Brunnen) ein starkes Erdbeben in der Großstadt Haicheng voraus.

Als die Erde dann am 4. Februar 1975 schwankte, waren die meisten Bewohner zuvor bereits evakuiert worden. Zwar kamen etwa 2000 Menschen ums Leben – doch ohne die Warnungen hätte es vermutlich mehr als 100 000 Tote

und Verletzte gegeben. Die Seismologen triumphierten.

Doch schon im Jahr darauf kam es zu einer weiteren Katastrophe: Ohne dass irgendjemand es geahnt hätte, schüttelte ein noch stärkeres Beben die chinesische Stadt Tangshan durch; offiziell starben 290 000 Menschen (Schätzungen gehen sogar von bis 750 000 Toten aus).

Immer wieder bebt die Erde überraschend. Ende der 1990er Jahre resignierten deshalb viele Seismologen und fragten sich, ob es noch sinnvoll sei, weiter an Vorhersagemethoden zu arbeiten. Zu komplex scheint das System der Erdkruste zu sein – womöglich sogar chaotisch und damit nicht vorhersagbar.

**Die Erschütterungen** des Bebens vom Mai 2008 heben den Boden an manchen Stellen meterweit an. Doch viele Häuser brechen vor allem deshalb zusammen, weil sie nicht solide gebaut sind

Unser Planet ist weit davon entfernt, eine simple Kugel aus plastischem Gestein und einem Eisenkern zu sein, auf deren Oberfläche erstarrte Platten treiben. In seinem Inneren geschehen offenbar Dinge, von denen die Forscher bislang nur wenig Kenntnis haben.

**DIE ERDE, SO HAT** sich inzwischen gezeigt, bebt nicht nur an den Grenzen der tektonischen Platten, sondern auch mittendrin, und das nicht minder heftig. Für diese Vorgänge gibt es mehrere Theorien. Möglicherweise entsteht lokal Spannung innerhalb einer der Platten, wenn sich Gesteine in der Tiefe chemisch verändern und dabei ausdehnen.

Oder es kommt dort, wo sich ein Riss in einer Platte gebildet hat und dann wieder verheilt ist, zu Schwächezonen.

Die können auch entstehen, wenn an einer Stelle aus dem Erdinneren mehr Wärme aufsteigt als üblich: Das schwächt







**Auf einem riesigen Rütteltisch** im Forschungslabor der US-Universität in Buffalo testen Ingenieure mehrstöckige Holzhäuser, um erdbebensichere Konstruktionen zu entwickeln

den unteren Teil der Platte, sodass der obere mehr Spannung aushalten muss und leichter zu verformen ist.

Doch es gibt noch erstaunlichere, erst vor wenigen Jahren entdeckte Phänomene: Erdbeben, bei denen die Erde gar nicht bebt.

15. Januar 2007: Messgeräte registrierten unter dem Puget Sound – einem verzweigten Buchtsystem südlich von Seattle – tiefe, regelmäßige Schwingungen von weit aus dem Untergrund.

In den Tagen darauf bewegt sich dieses „Brummen“ nach Norden, unter der Olympic-Halbinsel hindurch bis nach Vancouver Island. Am 26. Januar wird deutlich, dass es sich um die Signale eines sehr langsam verlaufenden Erdbebens handelt, das nun die Oberfläche erreicht. Das erkennen die Seismologen an erstaunlichen Vorgängen an der Flanke der Olympic Mountains.

Dort berechnen etwa 30 Messstationen mithilfe der Satelliten des Global Positioning System ihre eigene Position auf der Erde millimetergenau – und registrieren jede Ortsveränderung. Normalerweise gleiten sie zusammen mit der Nordamerikanischen Kontinentalplatte knapp einen Zentimeter pro Jahr nach Osten. Doch nun haben sie ihren

Kurs geändert und bewegen sich in die entgegengesetzte Richtung, auf die Pazifikküste zu. Innerhalb von zwei Wochen rücken die Stationen um drei bis fünf Millimeter nach Südwesten.

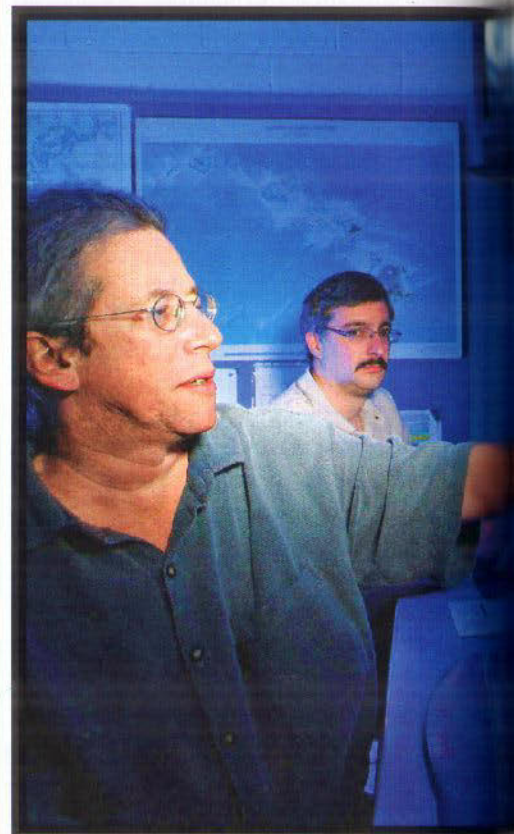
Zudem registriert ein hochempfindlicher Neigungsmesser – eine Wasserwaage von einem Kilometer Länge – in Shelton im US-Bundesstaat Washington Mitte Januar ein plötzliches Kippen der Erdkruste um wenige Millionstel Grad.

Am 2. Februar ist der Spuk vorbei. Das Brummen verstummt, die GPS-Stationen auf Vancouver Island nehmen ihren Kurs gen Nordosten wieder auf.

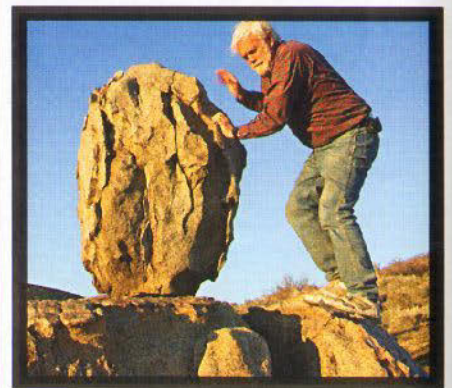
Außer den Forschern hat freilich niemand etwas bemerkt. Das seltsame Ereignis war ein „stilles Erdbeben“ – eine Verschiebung der Erdkruste, die so langsam ablief, dass sie keine zerstörerischen seismischen Wellen abstrahlte.

Dabei hat sich unterhalb des Puget Sound ein gut 300 Kilometer langes und 50 Kilometer breites Stück der Juan-de-Fuca-Platte etwa drei Zentimeter weiter unter den nordamerikanischen Kontinent geschoben. Wäre die Bewegung in-

\* Die Stärke und Energie eines Erdbebens geben die Seismologen heute als „Moment-Magnitude“ an. Sie hängt von der Größe der Rissfläche im Untergrund und der Verschiebung der Gesteinsblöcke ab. Die Skala ist logarithmisch: Nimmt die Magnitude von sechs auf sieben zu, bewegt sich der Boden zehnmal so stark. Die freigesetzte Energie ist sogar 30-mal höher. Die ältere Richter-Skala, bei der die Erdbebenstärke anhand des Ausschlags des Seismographen und der Entfernung zum Bebenherd ermittelt wird, ist nicht mehr offiziell in Gebrauch.



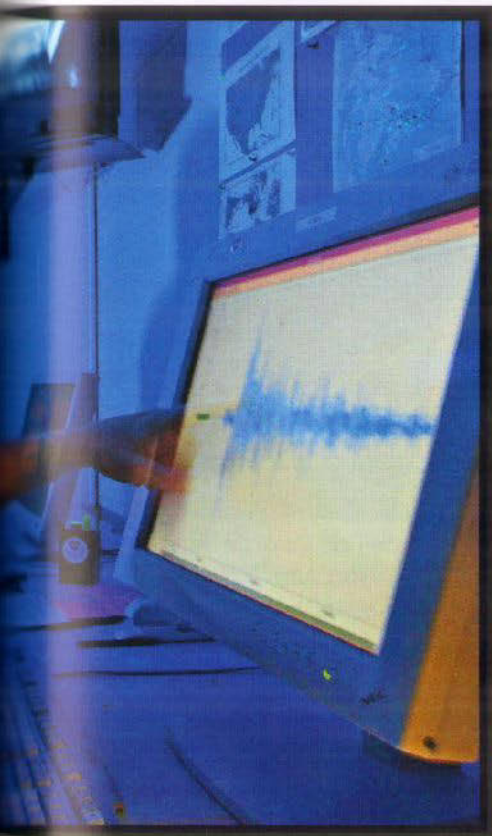
**Seismologen auf Hawaii** begutachten die auf 26. Dezember 2004 den verheerenden Tsunami



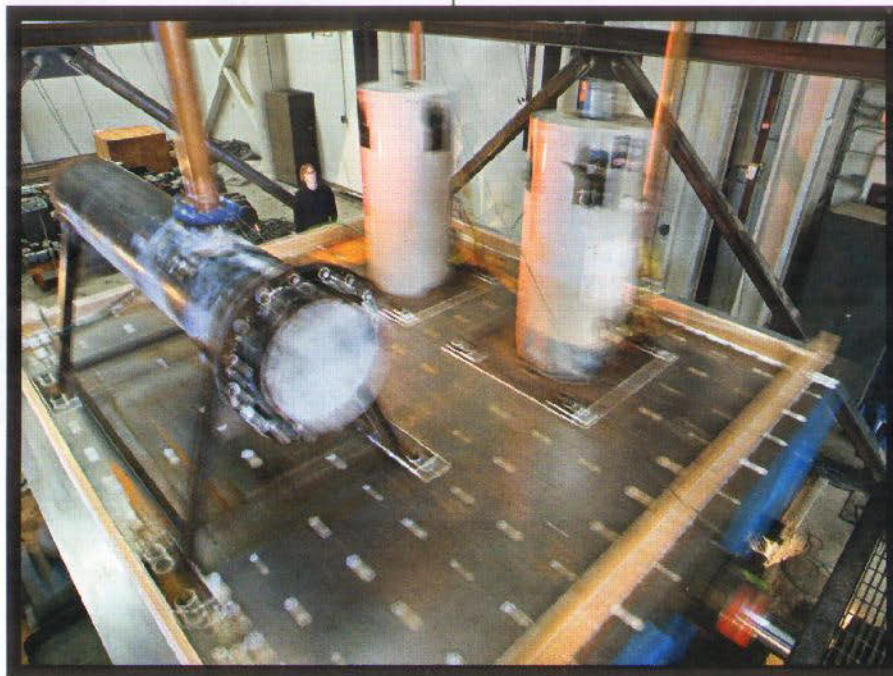
**Anhand fragiler Steinstrukturen** versucht der US-Forscher James Brune zu ermitteln, wie stark Beben am Standort des Steins maximal gewesen sein können

nerhalb weniger Sekunden abgelaufen, hätte sie einem Beben der Magnitude\* 6,6 entsprochen – vergleichbar jenem Beben von 1994 in der Nähe von Los Angeles, das 57 Menschen tötete und Schäden





gezeichnete Kurve jenes Seebebens, das am 26. Dezember 2004 an den Küsten des Indischen Ozeans auslöste



**Die Erdbebentauglichkeit** einer Warmwasseranlage für Krankenhäuser samt Leitungen testen Ingenieure in diesem Bebensimulator an der Universität von Nevada in Reno

Südwesten. Doch die Seismographen schwiegen, obwohl die freigesetzte Energie einer Magnitude von 7,5 entsprach. Denn das Beben lief in extremer Zeitlupe ab: innerhalb von sechs Monaten. Nur ein paar GPS-Empfänger registrierten die Erdbewegung.

Wie die Forscher inzwischen wissen, bebt die Erde auch vor Japan, Neuseeland und Alaska auf diese stille Weise. Solche Ereignisse richten zwar keine Schäden an. Doch sie können vermutlich dazu beitragen, die Erdbebenzone mit Energie aufzuladen – und deshalb ein großes Beben wahrscheinlicher machen.

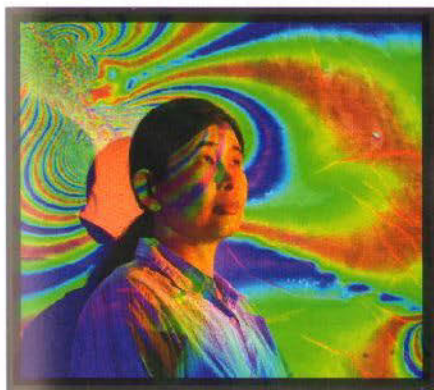
Oder aber auch genau das Gegenteil bewirken und Spannung abbauen.

Denn die Geologie der Erdkruste ist derart komplex, dass tatsächlich *beides* möglich ist. In jeder Störungszone treffen verschiedene Gesteinsarten aufeinander, jeder Bruch verhält sich anders. Selbst benachbarte Abschnitte der gleichen Verwerfung können auf das Zerren der Platten unterschiedlich reagieren.

So gleitet ein 175 Kilometer langer Abschnitt der San-Andreas-Verwerfung in Mittelkalifornien nahezu kontinuierlich weiter – wahrscheinlich, weil in der Tiefe das extrem weiche Mineral Talk quasi als Schmiermittel wirkt. Der nördliche und

südliche Teil der Verwerfung besteht dagegen aus festerem Gestein und lässt die Erde selten, aber heftig erzittern.

**WENN ES AN** genauen geologischen Daten mangelt, versuchen die Seismologen die Gefährdung aus Erfahrungswerten abzuschätzen – indem sie festhalten, wie viele Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte zwischen zwei starken Erschütterungen



**3-D-Computersimulationen** von Erdbeben an der kalifornischen San-Andreas-Verwerfung sollen helfen, das Phänomen besser zu verstehen

in Höhe von mindestens 40 Milliarden Dollar anrichtete.

Das bislang stärkste stille Erdbeben begann im Oktober 2001 in Süd Mexiko. Die Erdkruste brach in 25 Kilometer Tiefe und verschob sich um bis zu 22 Zentimeter. Ein 250 Kilometer breiter und 550 Kilometer langer Streifen an der Erdoberfläche glitt um sechs Zentimeter nach

Manche Erdbeben setzen eine ungeheure **ENERGIE** frei. Doch sie laufen so langsam ab, dass niemand etwas spürt

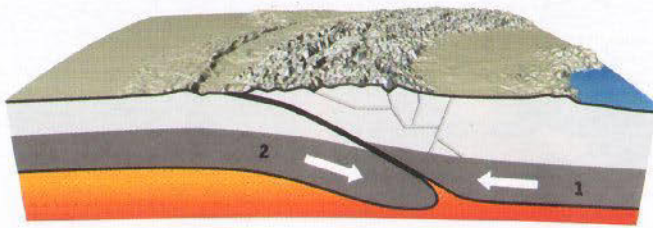
an der gleichen Stelle liegen. Denn viele Beben scheinen einem Zyklus zu folgen.

Um solche historischen Daten zu gewinnen, verfallen Forscher zuweilen auf verblüffende Methoden. Der Geologe James Brune von der University of Nevada nutzt sogenannte Wackelsteine: riesige Felsblöcke mit unsicherem Stand,

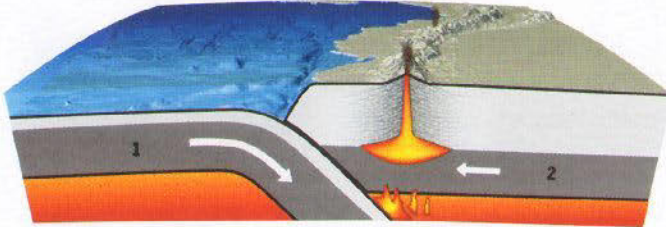


# Das Auf und Ab der Erdkruste

Vulkane, Gebirge und Erdbeben entstehen meist als Folge von Bewegungen der Oberfläche unseres Planeten



**Die Alpen in Europa** haben sich als Resultat einer Kollision zweier kontinentaler Platten aufgetürmt: Die Adriatische Platte (1; ein Teil der Afrikanischen Platte) schiebt sich hier mit einer Geschwindigkeit von 0,8 Zentimetern pro Jahr über die Eurasische Platte (2). Wo immer zwei kontinentale Platten kollidieren, verdickt sich die Kruste. Es bilden sich Bruchlinien und Falten. Auch der Himalaya hat sich auf diese Weise geformt.



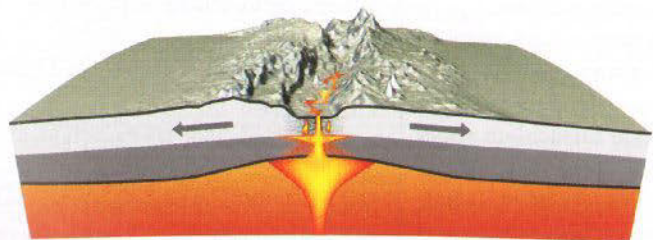
**Die Anden Südamerikas** entstanden, weil sich eine schwere ozeanische Platte – die Nazca-Platte (1) – unter eine leichtere Kontinentalplatte – die Südamerikanische (2) – schiebt. Bei einer solchen Kollision sinkt die ozeanische Platte in den Erdmantel hinab und trägt dabei Wasser mit in die Tiefe. Durch die Hitze dort steigt das Wasser wieder auf und verflüssigt dabei Teile der Kontinentalplatte zu Magma. Die Folge: Ein Gürtel aus Vulkanen entsteht.



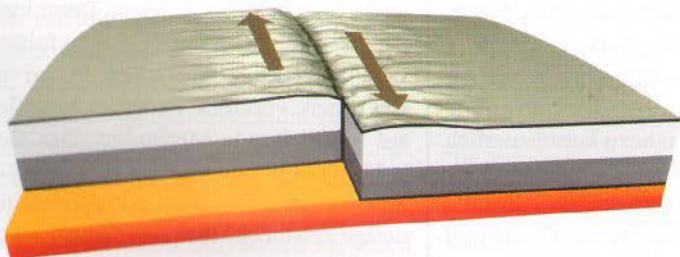
**Der ostpazifische Rücken** ist eine Kette von Gebirgen am Boden der Tiefsee. Hier streben – wie auch am Mittelatlantischen Rücken – zwei ozeanische Platten auseinander, die Pazifische (1) und die Antarktische (2). Der Grund: Aus der Tiefe des Erdinneren strömt heißes Magma hoch (3), drängt sich durch die Nahtstelle der Platten, schiebt die Platten auseinander und türmt untermeerische Berge auf. Ständig entsteht so neuer Meeresboden.



**Am Marianengraben** schiebt sich die Pazifische (1) unter die Philippinische Platte (2). Ähnlich wie bei den Anden schmilzt das Gestein in der Tiefe und sorgt für aufsteigendes Magma, das eine Vulkankette entstehen lässt – in diesem Fall am Boden des Ozeans. Vermutlich sind beim Absinken der Platte in die Tiefe – wie auch bei den Anden – nicht nur schiebende Kräfte von Bedeutung, sondern zusätzlich der Sog der Schwerkraft.



**Im Ostafrikanischen Grabenbruch** entsteht derzeit vermutlich ein neuer Ozean. Hier zerbricht die Afrikanische Kontinentalplatte, und die Bruchstücke driften in unterschiedliche Richtungen davon. Magma aus der Tiefe drängt in die Lücke und füllt sie aus: der Boden eines Meeres, das sich hier möglicherweise in zehn Millionen Jahren bilden wird. Vulkanausbrüche sowie Erdbeben begleiten den Vorgang, und ein tiefer Graben entsteht.



**Entlang der San-Andreas-Verwerfung** in Kalifornien kommt es häufig zu Erdbeben. Hier schieben sich zwei Platten der Erdkruste aneinander vorbei. An diesen Nahtstellen verhaken sich die Gesteine und stoppen, während der Rest der Platten weiterwandert. Das ist möglich, weil das Material in gewissem Maß plastisch und dehnbar ist. Wird die Spannung zu groß, kommt es zu einer ruckartigen Ausgleichsbewegung – zu einem Beben.





wie sie in den Wüsten Nevadas und Kaliforniens durch Verwitterung entstehen.

Brune und seine Kollegen bringen die Brocken vorsichtig mit Seilen, Winden und Kolben nahe an den Punkt, wo sie das Gleichgewicht verlieren. So lässt sich ermitteln, welche Erschütterung nötig wäre, um die Steine umzukippen. Da die Geologen deren Alter bestimmen können, erhalten sie eine Vorstellung davon, wie stark die Beben hier seit der Entstehung des Steins maximal gewesen sein können.

Etwas präzisere Erdbebenarchive sind kleine Korallenatolle vor der Westküste Sumatras. Die Kolonien wachsen im flachen Wasser direkt unter der Oberfläche. Bei stärkeren Erdbeben wird der Meeresboden ein Stück in die Höhe gedrückt, danach sinkt er allmählich wieder. Die Korallen zeichnen dieses Auf und Ab der Erdkruste auf: Sobald sie aus dem Meer herausragen, sterben sie ab; wenn die Oberfläche wieder abtaucht, beginnen die Tiere das Riff erneut zu besiedeln.

Aus dem Korallenarchiv ermittelten Forscher, dass ein etwa 110 Kilometer langer Abschnitt des Sundagrabens vor den indonesischen Großstädten Padang und Bengkulus in den vergangenen sieben Jahrhunderten alle 200 Jahre durch eine Reihe von Beben stark erschüttelt wurde, das letzte Mal um 1800. Im September 2007 kam es nach knapp 200 Jahren Ruhe erneut zu einem Erdbeben.

Die Wissenschaftler sind sich sicher, dass dieses Beben nur der Anfang einer weiteren Serie war und dass es dort jederzeit zu einer unterseeischen Erschüt-

terung kommen kann, die vermutlich einen verheerenden Tsunami auslösen würde – ähnlich dem Beben vom 26. Dezember 2004, das in der gleichen Verwerfung etwa 600 Kilometer nordwestlich von Padang ausgelöst wurde.

Die ersten beiden Bojen eines neuen, deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystems liegen daher vor Padang. Es wurde Ende 2008 in Betrieb genommen.

**TROTZ SOLCHER** Ansätze sind Vorhersagen auf den Tag genau bislang unmöglich. Worin das grundlegende Problem besteht, glauben die Seismologen inzwischen zu wissen: Ihnen fehlen einfach die nötigen Daten.

Erdbebenprognosen sind  
so, als wollte man  
das **WETTER** anhand der  
untersten zehn Meter der  
Atmosphäre vorhersagen

Ein Vergleich mit der Wettervorhersage mag das Dilemma verdeutlichen: Ebenso wie die Atmosphäre ist die Erdkruste ein chaotisches System, in dem kleine Ursachen große Wirkungen haben können; für den nächsten Tag lässt sich das Wetter mittlerweile recht genau vorhersagen – nicht aber für Wochen.

**In Schutzkleidung** erwarten Soldaten den Antransport von Erdbebenopfern, die in einem Massengrab beigesetzt werden sollen. Rund 70 000 Menschen kamen bei der Katastrophe von Sichuan ums Leben

„Zudem haben die Meteorologen einen Riesenvorteil. Sie können ihre Sensoren mit Wetterballons genau dahin bringen, wo das Wetter entsteht“, erklärt Jochen Zschau vom Geoforschungszentrum Potsdam. Seismologen dagegen bleibt der direkte Blick in die Erdbebenzone verwehrt. Die Keimzone der meisten Brüche liegt zehn bis 20 Kilometer unter der Erdoberfläche – zu tief für routinemäßige Bohrungen.

Wie Gesteine sich in der Tiefe verhalten, wann sie brechen und ob sie vorher irgendwelche Warnzeichen aussenden, ist daher noch kaum bekannt. Die Erdbebenforscher können nur die Bodenbewegungen an der Oberfläche beobachten und versuchen, sie zu interpretieren.

Es ist, als müsste man das Wetter vorhersagen mit den Daten aus den untersten zehn Metern der Atmosphäre.

**DOCH IMMERHIN** kennen die Seismologen die Ursachen eines Erdbebens inzwischen gut genug, um daraus Nutzen zu ziehen. Sie wissen etwa: Ist die Spannung in den kritischen Bereich gestiegen, reicht ein winziger Auslöser, ein kaum merklicher Spannungszuwachs, um die Erdkruste reißen zu lassen. Häufig sind es Erdbeben in benachbarten Abschnitten einer Verwerfung, welche die Spannung über die kritische Grenze heben.





**Mithilfe eines Suchhundes** versuchen Helfer, Verschüttete aufzuspüren. Eine Krankenschwester wurde nach 96 Stunden lebend geborgen, und ein Schwein überstand sogar 36 Tage unter den Trümmern

So zog das Tsunami-Beben vom 26. Dezember 2004 in den Jahren 2005 und 2007 drei weitere starke Erschütterungen in den weiter südlich gelegenen Abschnitten des Sundagrabens nach sich. Der nächste, noch nicht vollständig gebrochene Abschnitt in dieser Reihe ist der vor Padang – für die Forscher ein weiteres Indiz für ein bevorstehendes großes Beben in diesem Gebiet.

Auch der Verlauf eines solchen Ereignisses ist grob bekannt: Innerhalb von Sekundenbruchteilen schnellen die Gesteinsblöcke auf beiden Seiten der Verwerfung ruckartig los und bewegen sich um genau jene Strecke voran, die der Rest der Platten schon gedriftet ist. Bei den stärksten Beben sind das bis zu 20 Meter.

Mit einer Geschwindigkeit von zwei bis drei Kilometern pro Sekunde pflanzt sich der Bruch entlang der Störungszone fort, bis die Energie nicht mehr ausreicht, um die Erde weiter aufzureißen.

Meist endet der Bruch an einer Art Erdbebenbarriere, etwa einem Knick in einer Plattengrenze oder einem Unterwasser-Gebirge auf einer abtauchenden Ozeanplatte. Das kann nach 30 Kilometern der Fall sein oder erst nach 1200 Kilometern, wie 2004 vor Sumatra. Dann endet das eigentliche Erdbeben.

Aber die unglaubliche Kraft, die das Gestein auseinandergerissen hat, ver-

pufft nicht sofort. Sogenannte Primär-Wellen breiten sich mit einer Geschwindigkeit von sechs Kilometern in der Sekunde in alle Richtungen aus; dabei wird das Gestein in Ausbreitungsrichtung der Wellen periodisch zusammengepresst und auseinandergezogen.

Diese P-Wellen ähneln physikalisch den Schallwellen, bei denen ja Luft in Richtung der Welle abwechselnd zusammengepresst und expandiert wird.

Danach durchlaufen die langsameren Scherwellen die Erde; im Unterschied zu den P-Wellen schwingen die Gesteinsteilchen nun senkrecht zur Bewegungsrichtung der Welle.

Schließlich folgen Oberflächenwellen, die sich ausschließlich entlang der

Bereits Minuten nach einem Beben wissen die  
**SEISMOLOGEN**, wo die schlimmsten Zerstörungen zu erwarten sind

Erdoberfläche fortpflanzen. Sie lassen den Boden auf- und abhüpfen oder seitlich hin- und herschwingen – ähnlich den Wellen auf einem Teich, welche die Wasserteilchen auf- und abbewegen.

Die Oberflächenwellen richten die schlimmsten Verwüstungen an.

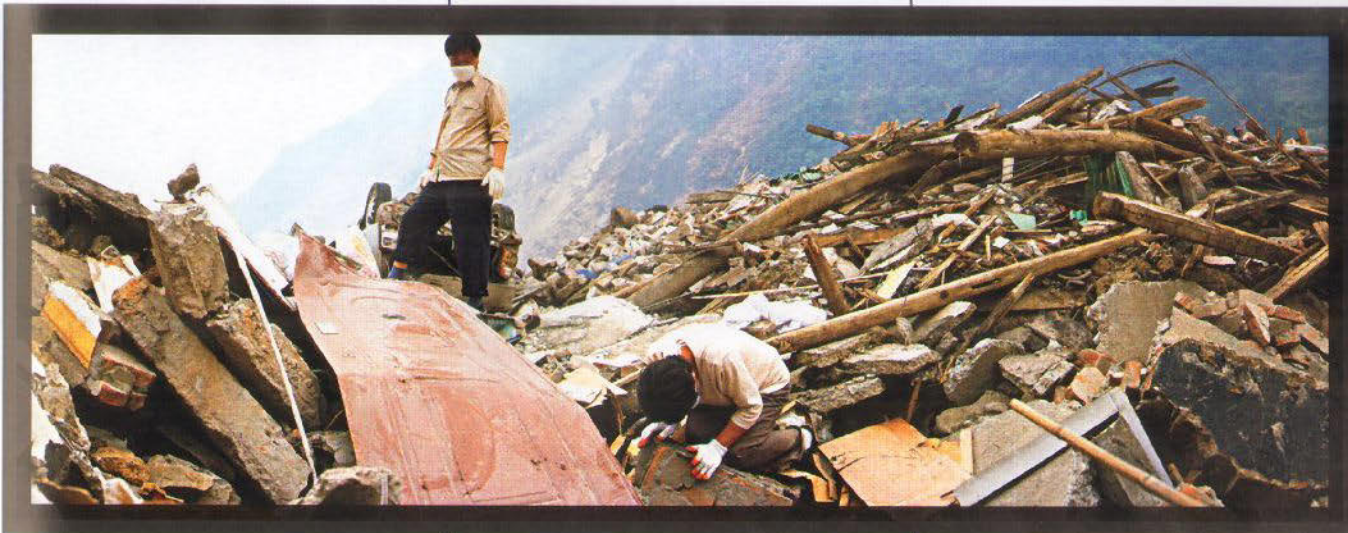
All diese Kenntnisse erhöhen die Chancen, die Gefahren von Erdbeben zu mildern:

- Seismologen können inzwischen jene Gebiete identifizieren, in denen die Erschütterungen besonders drastisch ausfallen werden und wo daher strengere Bauvorschriften nötig sind. Eine solche Empfehlung veranlasste 1997 die Universität von Berkeley (deren Campus auf einer besonders gefährlichen Bruchzone liegt), bis 2017 rund 20 Millionen Dollar pro Jahr einzuplanen, um alle Gebäude erdbebensicher umzubauen. Und weil das Risiko bekannt war, überstand in Alaska eine äußerst aufwendig konstruierte Pipeline fast unversehrt ein Magnitude-7,9-Beben, obwohl sie die Bruchzone kreuzte und der Boden sich dort um 5,5 Meter verschob.

- Ingenieure sind nach Erkenntnissen über typische Bodenbewegungen heutzutage eher in der Lage, erdbebensicher zu bauen. Zum einen können sie ausrechnen, welche Bauweisen besonders sicher sind. Zum anderen setzen sie auf riesigen Schütteltischen Versuchsbauten realistischen Erschütterungen aus und analysieren anschließend die Schäden. So lässt sich bereits während der Planung eines Neubaus festlegen, wie gut er ein Erdbeben einer bestimmten Stärke überstehen wird.

- Bereits wenige Minuten nach einem Beben vermögen die Seismologen Karten zu präsentieren, welche die Orte mit den stärksten Erschütterungen und den vermutlich schlimmsten Schäden anzeigen –





um Rettungskräfte dorthin zu lenken, wo sie besonders dringend benötigt werden.

• Frühwarnsysteme können innerhalb weniger Sekunden nach den ersten Erdstößen Alarm auslösen. Da die zerstörerischen Wellen eine gewisse Zeit brauchen, um sich auszubreiten, verschaffen solche Warnsysteme den Menschen ein paar Sekunden oder sogar mehr als eine Minute, um sich in Sicherheit zu bringen. Die Zeit reicht zudem, um S- und U-Bahnen anzuhalten, Gasleitungen zu schließen oder Ampeln vor einsturzgefährdeten Brücken auf Rot zu stellen.

**DIE IDEE FÜR** solche Frühwarnsysteme ist zwar schon älter, aber die Umsetzung ist nicht einfach.

Das Problem besteht darin, die zu erwartende Stärke eines Bebens möglichst schnell und korrekt abzuschätzen: um einerseits rechtzeitig zu warnen, andererseits aber die Menschen nicht durch einen Fehllarm zu verunsichern.

Inzwischen wissen die Seismologen: Bereits die ersten vier Sekunden einer Aufzeichnung geben genug Informationen her, um die Stärke des gesamten Erdbebens zuverlässig voraussagen zu können.

Erste Frühwarnsysteme in Europa gibt es nun in Bukarest, Istanbul und Neapel. In Japan registriert ein Netz von gut 1000 Seismographen im ganzen Land Erschütterungen und warnt seit Oktober 2007 sofort bei einem Beben.

Seither kam es zu zwei relativ starken Erdbeben. Die Öffentlichkeit erfuhr per Radio, TV oder Mobiltelefon von der Gefahr. U-Bahnen hielten automatisch an, und in einem Krankenhaus eilten die Schwestern los, um die Beatmungsgeräte ihrer Patienten zu überprüfen.

Bislang ist das System aber noch unvollkommen: Einmal gab es Fehllarm, ein anderes Mal reichte es nur für drei Sekunden Vorwarnzeit.

In Kalifornien testen die Forscher ihr System noch. „Aber auch wir hatten schon unsere Erfolge“, erklärt der Seismologe Richard Allen. „Unser System registrierte am 30. Oktober 2007 ein Beben der Magnitude 5,4 und berechnete das Gefahrenpotenzial, noch ehe die Wellen das 100 Kilometer entfernte San Francisco erreichten.“

#### MEMO | ERDBEBENVORHERSAGE

- » **VIELE BEBEN** scheinen einem Rhythmus zu folgen.
- » **PROGNOSEN** eines Erdbebens auf den Tag genau wird es noch lange nicht geben – falls überhaupt jemals.
- » **BESCHLEUNIGUNGS-SENSOREN** in Laptops und Handys können Erdbeben registrieren.

Weil die Frühwarnung besser funktioniert, je dichter der nächste Seismograph sich am Ausgangspunkt des Bebens befindet, sind kalifornische Forscher auf eine originelle Idee gekommen: Sie wollen jene Beschleunigungssensoren für sich nutzen, die heutzutage in Laptops und Mobiltelefonen eingebaut sind.

**Auf den Überresten** eines eingestürzten Gebäudes trauert eine Frau um ihren Sohn. Warnsysteme und erdbebensichere Bauten könnten die meisten Opfer vermeiden – doch solche Maßnahmen sind sehr teuer

Eigentlich versetzen diese Sensoren die Geräte in einen Sicherheitsmodus, wenn sie herunterfallen – aber sie registrieren auch die Beschleunigung durch ein Erdbeben. Tausende freiwilliger Nutzer sollen nun die Messdaten ihrer Laptop-Sensoren in ein Netz einspeisen. Es könnte die Bodenbewegungen bei einem Beben möglicherweise flächendeckend aufzeichnen.

Dank all dieser Fortschritte, besonders beim Bauen und bei den Kenntnissen über die Anatomie der Störungszonen, hat sich die Gefahr, durch ein Erdbeben umzukommen, in den Industrienationen während der vergangenen 100 Jahre um den Faktor zehn verringert. Auch in den übrigen Ländern würden vernünftige Bauvorschriften die Sicherheit deutlich verbessern. Erdbeben könnten ihren traurigen Spitzenplatz als Naturkatastrophen mit den höchsten Opferzahlen verlieren.

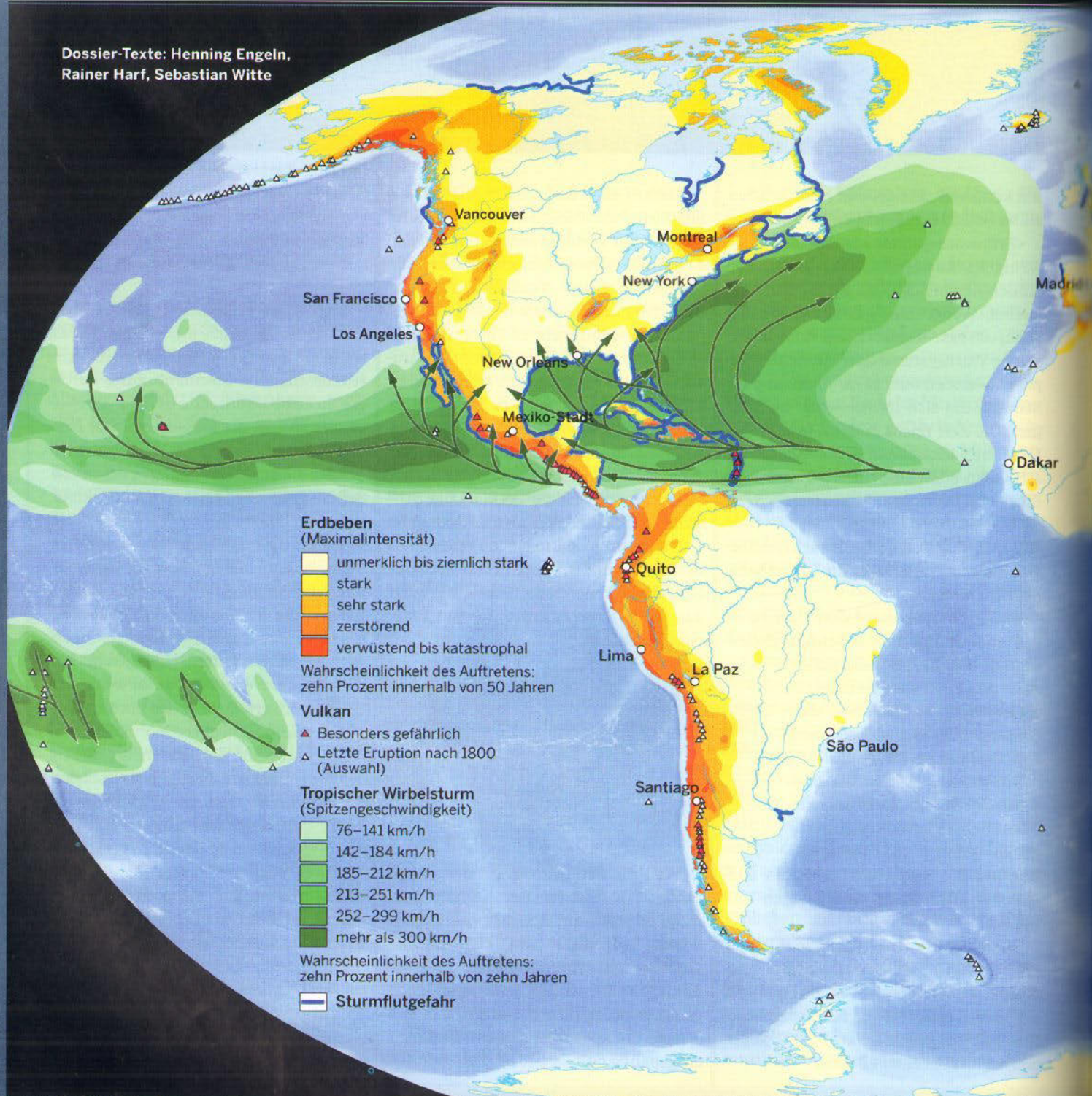
Dann, sagt der Kalifornier Richard Allen, müsste kein Mensch mehr bei einem Erdbeben sein Leben lassen – auch ganz ohne Vorhersage. □

**Ute Kehse**, 40, ist Wissenschaftsjournalistin in Delmenhorst. Der in den USA aufgewachsene Fotograf **Chien-Min Chung** lebt heute in Peking. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Jochen Zschau**, Geoforschungszentrum Potsdam.



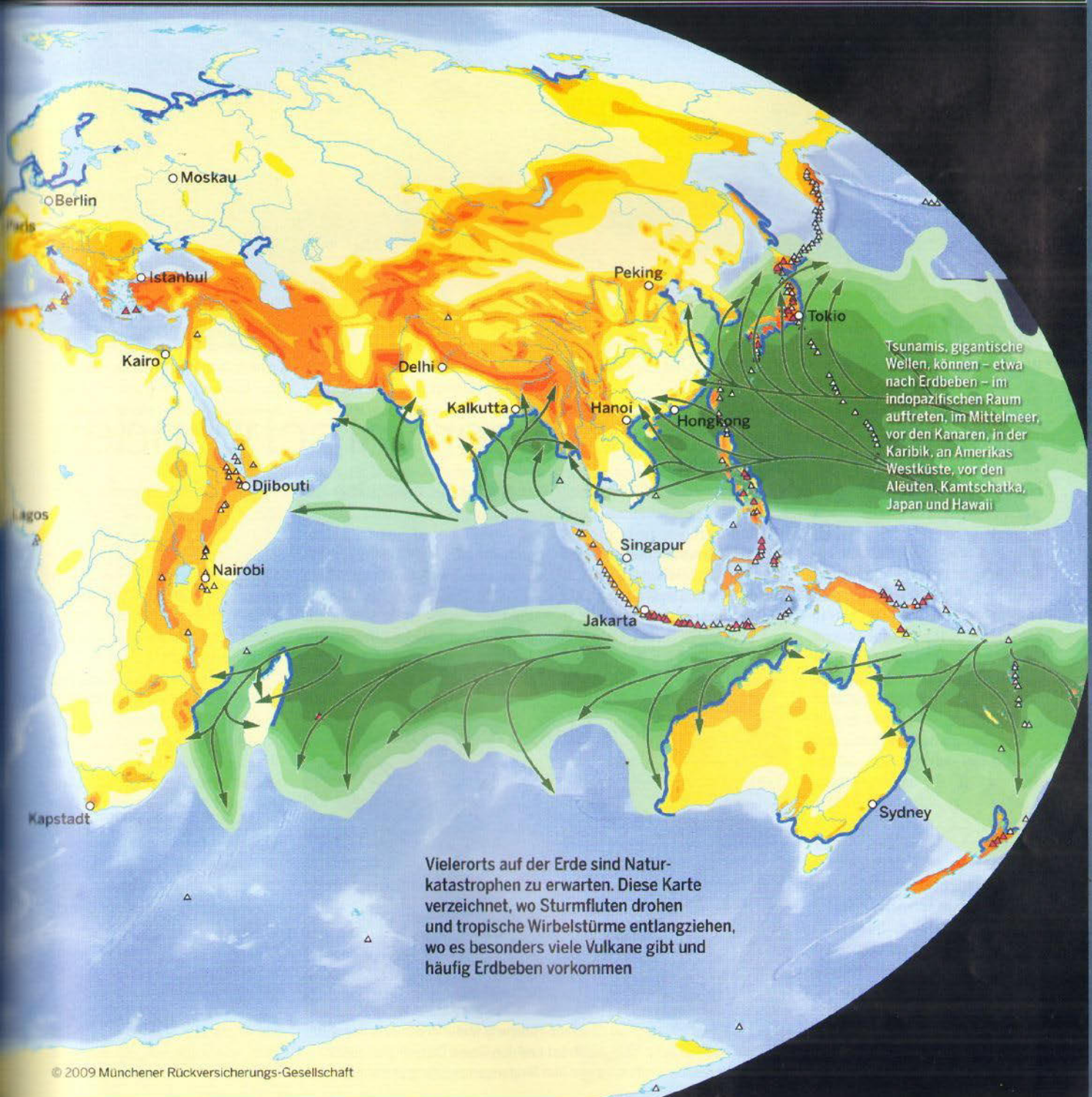
# II. Die äußeren Kräfte

Dossier-Texte: Henning Engeln,  
Rainer Harf, Sebastian Witte

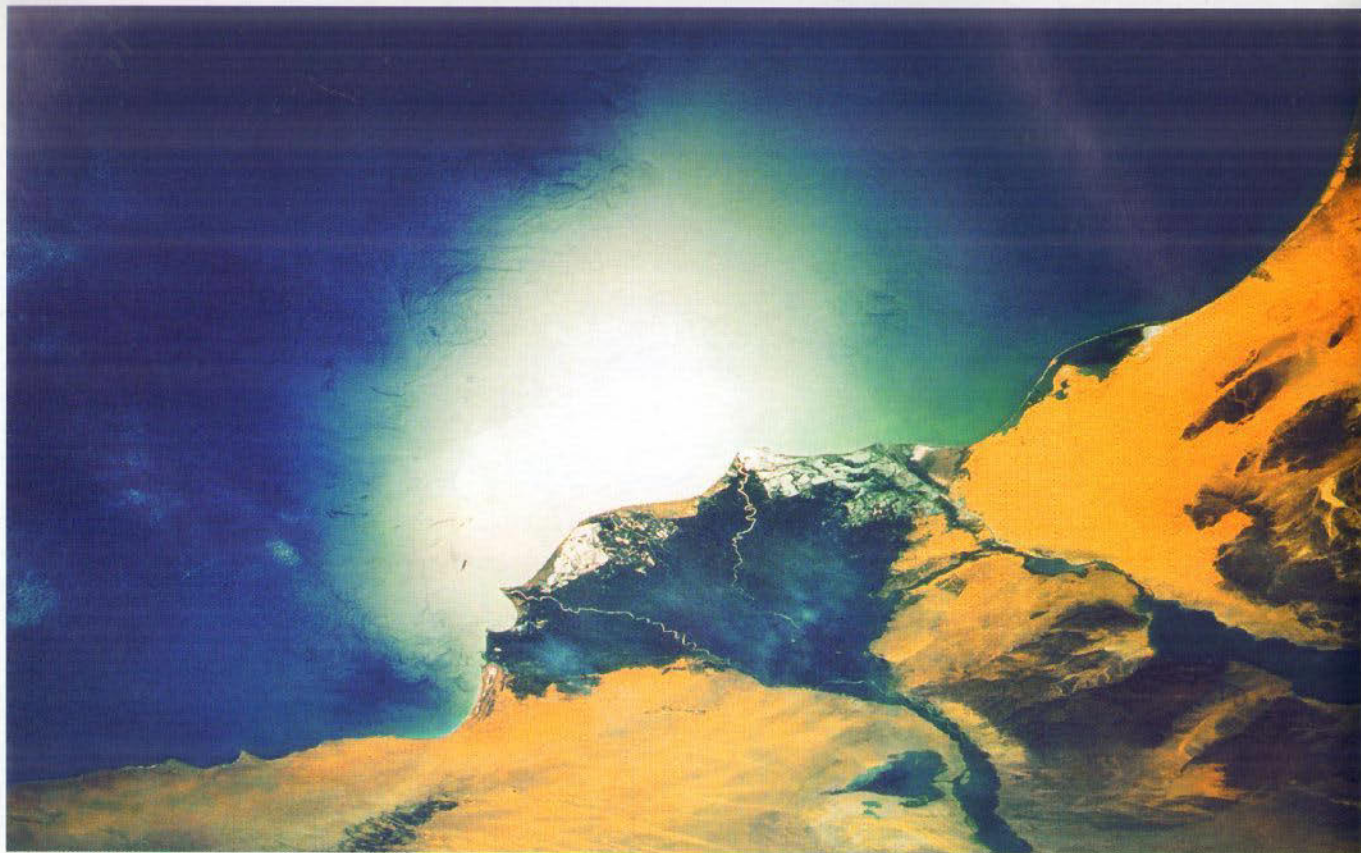




Neben den Gewalten aus dem Erdinneren, die etwa Vulkanausbrüche und Erdbeben auslösen, gibt es auch exogene Faktoren, die unseren Planeten prägen. All diese äußeren Kräfte werden von der Energie der Sonne gespeist. Die Hitze ihrer Strahlen lässt große Mengen an Wasser verdunsten und treibt die Klimamaschine an. Die bewirkt, dass Schnee fällt und Gletscher wachsen, Flüsse sich füllen und zuweilen Berge oder Schlammlawinen ins Rutschen geraten. Sie versorgt das Leben mit Energie und lässt Feuer wüten. Sie setzt Wirbelstürme in Bewegung, lässt Blitze aufzucken und in den Ozeanen verheerende Riesenwellen entstehen







Flüsse, wie hier der Nil, verlieren im Mündungsgebiet an Geschwindigkeit, Schwebepartikel sinken zu Boden. Es entsteht eine Aufschüttungsebene: ein Delta

# Wenn Gebirge im Meer verschwinden

Nichts prägt Landschaften so wie Flüsse: Sie tragen Berge ab, schneiden Schluchten, bauen Deltas

**D**ie Katastrophe ereignete sich vor etwa 12 000 Jahren, doch ihre Spuren sind noch heute sichtbar: Auf 40 000 Quadratkilometer Fläche durchziehen Furchen und Kanäle den US-Bundesstaat Washington. Bizarre Strudelkessel winden sich durch glatt poliertes Basaltgestein.

Geschaffen hat die einzigartigen Erosionsspuren eine „Megaflut“ am Ende der letzten Eiszeit.

Denn als es damals immer wärmer wurde, sammelte sich ein mächtiges Binnenmeer voller Schmelzwasser in einem Tal, dessen Ausgang durch einen gewaltigen Eisdamm versperrt war.

Schließlich hoben die Wassermengen den darunterliegenden Gletscher aus seinem Felsfundament und schossen dem Pazifik entgegen: 40 Kubikkilometer Wasser pro Stunde – mehr als alle Flüsse weltweit heute in der gleichen Zeit transportieren.

Die Fluten schleuderten Findlinge hoch, meielten Gräben und Buchten in die Landschaft.

Was eine solche Megaflut in wenigen Stunden an Gestein wegfräst, vermag auch ein Gebirgsbach abzutragen – wenn man ihm

genügend Zeit lässt. Denn für den Grad der Erosion ist vor allem wichtig, welche Menge Wasser über den Boden spült. So hat sich der Colorado River über Millionen Jahre bis zu 1800 Meter tief in die Rocky Mountains geschürft.



In Jahr­millionen hat sich der Colorado Hunderte Meter in den Fels des nordamerikanischen Hochplateaus gefräst und den Grand Canyon geschaffen. Das Wasser raspelt Gestein ab und löst Bindungen zwischen Mineralkörnern

Doch nagt nicht das Flusswasser selbst an der Erde, sondern das mitgeführte Geröll. Die Gesteinsbrocken höh­len das Flussbett aus, schneiden Senken und Schluchten in die Landschaft.

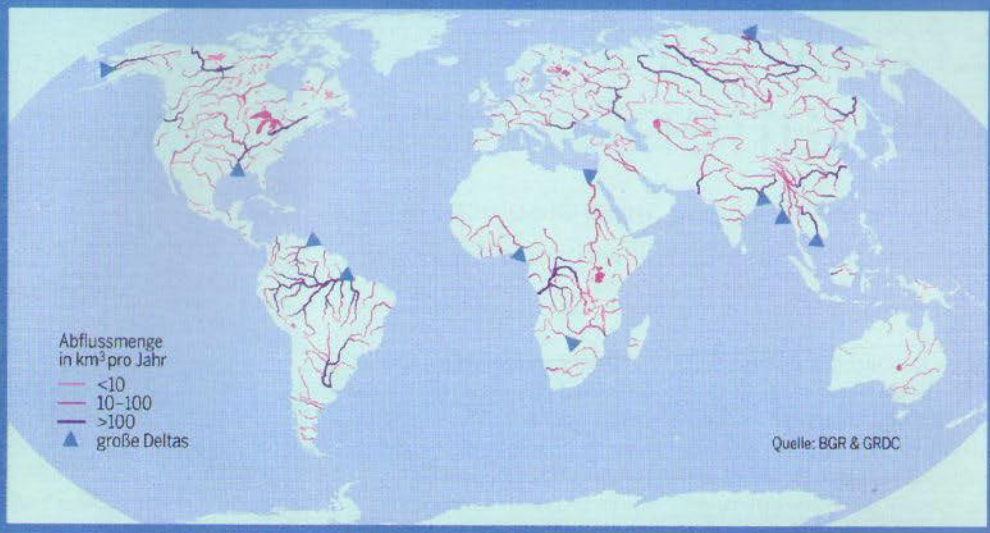
Im Oberlauf eines Flusses sind die Steine größer, scharfkantig und spitz, im Unterlauf hingegen häufig oval bis rund mit glattpolierter Oberfläche – zertrümmert und abgeschliffen durch den langen Transport. Jeder Brocken verkleinert sich dabei mit eigenem Tempo: Ein weicher Sandstein ist bei mäßigem Gefälle oft schon nach anderthalb Kilometern auf ein Zehntel seiner ursprünglichen Größe geschrumpft, Granit dagegen erst nach elf Kilometern.

Neben der schieren Wassermenge bestimmen daher auch die Höhe des Gefälles und die daraus resultierende Fließgeschwindigkeit, wie stark sich ein Fluss in sein Bett gräbt.



## FLUSSLÄUFE UND DELTAS

Ein dichtes Netz von Flüssen durchzieht die Kontinente. Obwohl sich in den Strömen und Seen nur 0,02 Prozent des weltweiten Wassers befinden, sind Flüsse die wichtigsten Landschaftsgestalter des Planeten: Fortwährend tragen sie Gestein ab, graben Schluchten und Canyons in den Untergrund und transportieren jährlich 18 Milliarden Tonnen Sedimente in die Meere. An der Mündung einiger Ströme bilden sich ausgedehnte Deltas; der Ganges und der Brahmaputra haben in Bangladesch und Westbengalen das größte Delta der Erde geschaffen. Nicht alle Flüsse enden im Meer: Der Okavango bildet in Botswana das größte Inlanddelta.



Mal wirken die Kräfte der Erosion stärker in die Tiefe des Bodens, mal in die Breite – und bringen so je nach Beschaffenheit des Untergrunds unterschiedliche Täler hervor: mal mit steilen Hängen, mal mit sanft geneigten Flanken.

In den ruhigeren Unterläufen eines Flusses reicht die Schleppkraft des Stroms kaum noch aus, größere Steine zu transportieren. Das mitgeführte Material wird immer kleiner. Es schwebt im

Wasser und wird bei weiterer Verlangsamung abgelagert.

Tritt der Fluss bei Hochwasser über seine Ufer, verfrachtet er die Sedimente in die Auenlandschaft und sorgt für deren Fruchtbarkeit.

Seit der Mensch Flüsse begradigt und künstliche Dämme errichtet, entwickeln sich solche Überflutungen allerdings immer häufiger zu Katastrophen. So in St. Louis am Mississippi, wo 1993 bei einem Hochwasser 487 Menschen ums Leben kamen.

In der Regel aber transportiert das Wasser die Schwebeteilchen bis ins Meer: weltweit mehr als 18 Milliarden Tonnen pro Jahr. Allein in den Tiefebene südlich des Himalaya und im Gangesdelta, so schätzen Forscher, haben sich im Laufe der Zeit Verwitterungsprodukte mit einem Volumen von 8,5 Millionen Kubikkilometern angehäuft; das entspricht dem doppelten Fassungsvermögen des Mittelmeeres.

Auch die Meere treiben die Erosion der Kontinente stetig voran. An den Steilküsten etwa schlägt jeder Wellenzug mitgeführtes Geröll gegen die Felswände und höhlt sie aus.

Vertiefungen und Höhlen entstehen, bis die darüber lagernden Gesteinsschichten den Halt verlieren und abstürzen. Der Schutt sammelt sich am Fuß der Küste und wird erneut gegen die Felsen geschleudert – so lange, bis die Brandung das Kliff nicht mehr erreichen kann.

Küstenverluste von einem halben bis zwei Meter Breite pro

## GROSSE FLUTEN

**1362:** Die Marcellus-Flut, auch „Grote Mandränke“ genannt, überschwemmt die gesamte Nordseeküste. Die Küstenlinie verändert sich nachhaltig. Chroniken sprechen von 100 000 Opfern.

**1887:** Gewaltige Überschwemmungen in China; der Gelbe Fluss tritt über die Ufer, etwa 900 000 Menschen sterben.

**1896:** Eine meterhohe Welle, ausgelöst durch ein Seebeben, trifft Japan. Mehr als 20 000 Menschen sterben.

**1931:** Überschwemmungen in China verwüsten 100 000 Quadratkilometer.

**1970:** Bei einer Flutkatastrophe in Bangladesch sterben 200 000 Menschen.

Jahr sind keine Seltenheit. Einige Ufergebiete Chinas büßen per annum sogar bis zu 85 Meter ein.

In Deutschland graben Sturmfluten der Nordseeinsel Sylt Jahr für Jahr Land von der doppelten Größe eines Fußballfeldes ab.

Gerade die flachen, sandigen Uferzonen sind der rauen See oft schutzlos ausgeliefert.

Viele Geologen gehen deshalb davon aus, dass Sylt irgendwann in ferner Zukunft auseinanderbrechen wird. □

## ZWISCHEN EROSION UND ABLAGERUNG



Nimmt die Strömung ab, sammelt sich Sediment in der Fließrinne. Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen Erosion und Ablagerung: Der Fluss schneidet sich nicht weiter ins Land



In steilen, niederschlagsreichen Gebieten ist die Energie eines Flusses besonders hoch: Die Strömung reißt das erodierte Gestein mit sich, es lagert sich nicht ab, eine Schlucht entsteht



Nimmt das Gefälle und damit die Geschwindigkeit des Flusses weiter ab, sedimentieren derart viele Gesteinspartikel, dass die Fließrinne aufgeschüttet wird: Allmählich erhöht sich der Grund des Tales



Gezeitenkraftwerk in Kanada

## Die Macht des Mondes

Neben der Kraft von Flüssen und Stauseen lässt sich auch die der Gezeiten zur Stromerzeugung nutzen. Schließlich erzeugt die Anziehungskraft des Mondes die weltweit größten Wellen: Ebbe und Flut. Ältere Gezeitenkraftwerke wandeln die Bewegungsenergie, die der Tidenhub mit sich bringt, in elektrische Energie um – beispielsweise das weltweit größte an der Mündung der Rance in Frankreich. In modernen Anlagen treiben die durch Ebbe und Flut verursachten Meeresströmungen Turbinen und daran angeschlossene Stromgeneratoren an.



# Erosion im Zeitraffer

Erdbeben, Niederschläge, Vulkanausbrüche bringen Berge ins Rutschen – oft mit verheerenden Folgen

**A**m 9. Oktober 1963 lösen sich im Vajont-Tal in den Norditalienischen Alpen etwa 250 Millionen Kubikmeter Gestein und stürzen in einen Stausee. Gewaltige Wassermengen rasen daraufhin als 70 Meter hohe Flutwelle durch das Tal. Sie töteten etwa 2000 Bewohner.

Noch schlimmer trifft es sieben Jahre später Menschen in Peru. Am 31. Mai 1970 setzt ein Erdbeben eine gewaltige Eismasse am Gipfel des Nevado de Huascarán in Bewegung, die sich mit Schutt vermischt.

Mit fast 300 km/h rast die Lawine talwärts und läuft erst nach 17 Kilometern aus. Mehr als 50 Millionen Kubikmeter Material begraben mehrere Orte.

Fast 70 000 Menschen sterben.

Und im November 1998 löst Hurrikan „Mitch“ in Mittelamerika eine Katastrophe aus. Seine Niederschläge durchweichen Böden, setzen Erdbeben und Schlammströme in Gang.

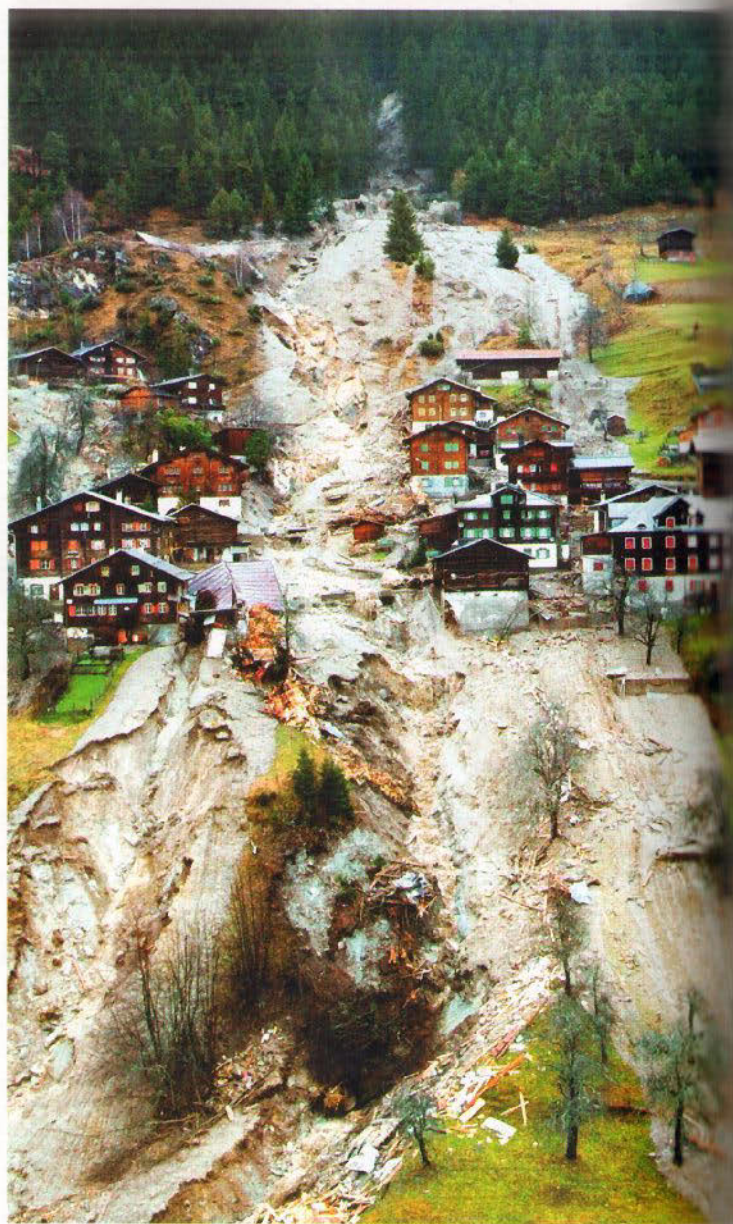
Mehr als 9000 Menschen kommen ums Leben.

Drei Katastrophen, eine Gemeinsamkeit: Stets haben sich riesige Massen an Gestein, Schutt oder Schlamm gelöst und auf ihrem Weg nach unten alles vor ihnen zermalmt oder erstickt.

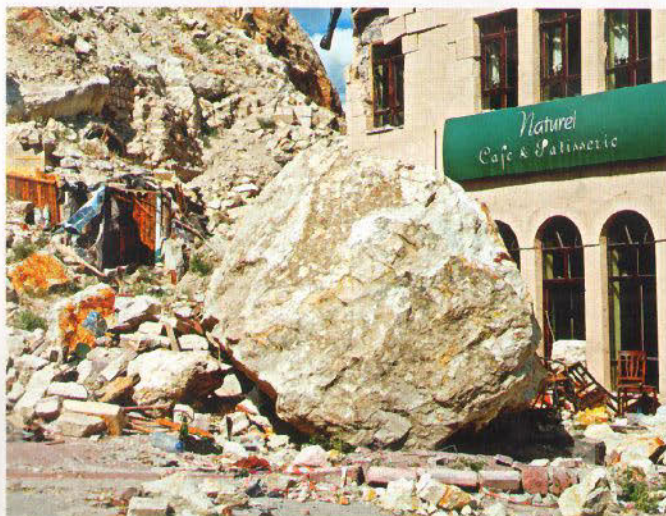
Bergstürze, Schlammlawinen oder Erdbeben sind sozusagen Erosionsvorgänge im Zeitraffer. Material, das sich aufgrund von Verwitterungsvorgängen – etwa Frost, Wasser oder chemischen Prozessen – allmählich gelockert hat, gerät plötzlich in Bewegung und lagert sich in tieferen Regionen ab.

Geologen unterscheiden solche „Massenbewegungen“ jeweils nach Art des Materials (etwa festes Gestein oder lockerer Schutt), nach der Geschwindigkeit oder der Art der Bewegung (zum Beispiel rutschend oder fließend).

Bei einem Bergsturz lösen sich größere Brocken von einer steilen Felswand, bei einer Steinlawine rast zerkleinertes Gesteinsmaterial auf einem Luftpolster abwärts. Von einem Bergrutsch spricht man, wenn Gesteinsmassen als



16. November 2002, Schlans in der Schweiz: Eine gewaltige Schlammlawine löst sich auf 1650 Meter Höhe und rast über die Ortschaft hinweg



Bei Steinlawinen (hier in der Türkei) poltern manchmal tonnenschwere Felsbrocken Hunderte Meter in die Tiefe. Bei solchen Massenbewegungen brechen mitunter sogar mehrere Millionen Kubikmeter Gestein ab

mehr oder weniger geschlossene Einheit einen Hang hinabgleiten.

Gerät ein feuchtes Gemisch aus Schlamm, Boden und Gestein in Bewegung, heißt das Schuttstrom oder bei höherer Geschwindigkeit Schuttlawine. Ist das Material feiner, also zum Beispiel mit der Asche eines Vulkans durchsetzt, wird es zum Schlammstrom oder zur Schlammlawine.

Die höchsten Geschwindigkeiten erreicht lockeres Material, das durch einen hohen Wassergehalt noch beschleunigt wird – etwa Schuttlawinen, die oft bis zu 70 km/h, manchmal sogar mehrere Hundert Kilometer pro Stunde schnell sind.

Die langsamste Massenbewegung dagegen ist das „Bodenkriechen“: Mit Geschwindigkeiten von nur wenigen Millimetern pro Jahr gleiten komplette Schichten des Bodens ganz allmählich hangabwärts.

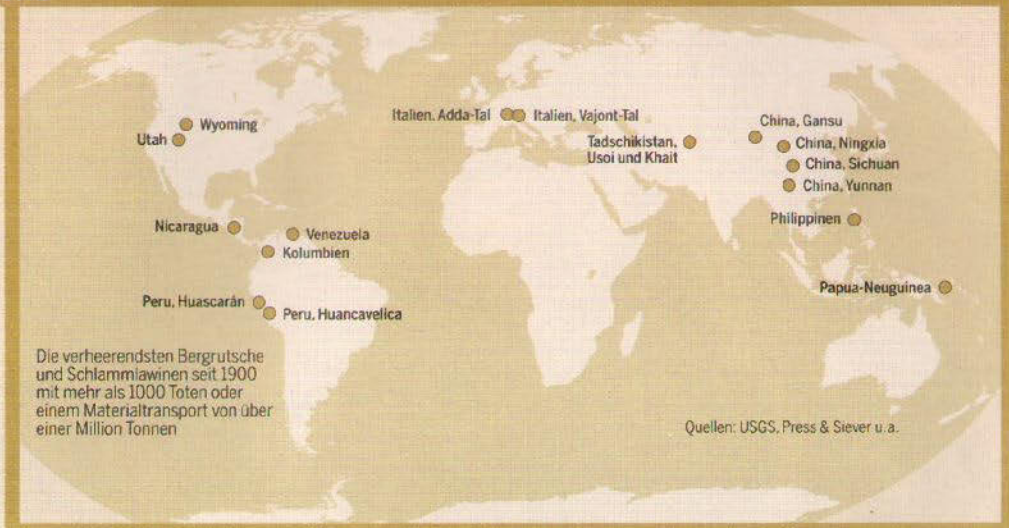
Erkennbar sind solche Phänomene vor allem an schief stehenden Zäunen, Grabsteinen oder Leitungsmasten, an Rissen in Straßen oder den Fundamenten von Häusern.

Auslöser für all diese Massenbewegungen können Erdbeben, starke Regenfälle, Hochwasser nach einer Schneeschmelze oder andere geologische sowie meteorologische Ereignisse sein.



## DIE GRÖSSTEN ERDRUTSCHE

Massenbewegungen treten oft als Folge anderer Katastrophen auf – etwa wenn ein Beben die Erde erschüttert und Gesteinsschichten löst. Dazu kam es 1933 in der chinesischen Provinz Sichuan: Mehr als 150 Millionen Tonnen rutschten hangabwärts. Auch langanhaltende Regenfälle und Schneeschmelze können Erdbeben verursachen: 1983 stürzten vier Millionen Kubikmeter Schlamm und Schutt von einer Wand des Spanish Fork Canyons in Utah. Schließlich können Vulkane Massenbewegungen auslösen. 1985 spie der Nevado del Ruiz in Kolumbien Asche und Gestein aus, eine gewaltige Schlammlawine begrub die Stadt Armero unter sich.



Wie sie zu Tal rutschen, hängt vor allem von drei Faktoren ab: vom Material, von der Hangneigung, vom Wassergehalt.

Wie komplex der Flüssigkeitsanteil die physikalischen Eigenschaften eines Materials prägt, kann man sich an einem Badestrand klarmachen: Ist der Sand dort staubtrocken, rieselt er locker und ist recht beweglich. Feuchter Sand hingegen ist fester und ideal, um Sandburgen zu bauen – hier wirkt die Oberflächenspannung

des Wassers zwischen den Sandkörnern stabilisierend, hält sie zusammen. Ist der Sand aber mit Flüssigkeit durchtränkt, sind die Körner komplett von Wasser umgeben – und es wird zum Gleitmittel: Der Sand zerfließt.

Geschieht so etwas, sprechen die Geologen von Bodenverflüssigung: ein Vorgang, der ganze Erdschichten ins Abrutschen bringen kann.

Bergstürze, Schlammlawinen und Hangrutschungen entfalten eine extreme Zerstörungskraft. Zu den gewaltigsten Katastrophen kam es in der Vorgeschichte; so löste sich am Ende der Eiszeit, vor rund 10 000 Jahren, in den Schweizer Alpen ein 800 Meter dickes, drei Kilometer breites Felspaket. Wohl 13 Milliarden Kubikmeter Gestein stürzten zu Tal und begruben eine Fläche von 51 Quadratkilometern.

Noch gewaltiger war eine Massenbewegung, zu der es vor 450 000 Jahren kam – unter Wasser: Am untermeerischen Rückens sackte ein vier mal fünf Kilometer großes Wandstück in die Tiefe und breitete sich als Schuttfächer mit einem Volumen von fast 20 Milliarden Kubikmetern aus.

Auch an der submarinen Flanke des Vulkans Mauna Loa auf Hawaii sowie an den Hängen mehrerer Kanarischer Inseln entdeckten die Forscher am Meeresboden Überreste enormer Rutschungen.

Das Brisante an diesen Erkenntnissen: Ein gigantischer Bergsturz

## GEWALTIGE MASSENBEWEGUNGEN

**Vor etwa 10 000 Jahren, Schweizer Alpen:** Ein 800 Meter dickes, drei Kilometer breites Felspaket stürzt ins Tal und bedeckt 51 Quadratkilometer Fläche.

**1949, Tadschikistan:** Nach einem Erdbeben kommt es zu einem Bergsturz, der 33 Dörfer zerstört und mehr als 12 000 Menschen tötet.

**1963, Italien:** 250 Millionen Kubikmeter Gestein stürzen in einen Stausee, lösen eine 70 Meter hohe Flutwelle aus; 2000 Menschen sterben.

**1987, Italien:** 40 Millionen Kubikmeter Gestein lösen sich und stürzen mit 400 km/h in die Tiefe; der Fluss Adda staut sich zu einem See.

**1999, Venezuela:** Regenfälle lösen Schlammlawinen aus; etwa 30 000 Tote.

unter oder ins Wasser könnte sich jederzeit wieder ereignen.

Forscher haben errechnet, dass die Westflanke des Vulkans Cumbre Vieja auf La Palma (Kanarische Inseln) abrutschen könnte; dabei würden bis zu 500 Kubik-

kilometer Felsen ins Meer stürzen. Der dadurch ausgelöste Tsunami hätte nach einer Strecke von 50 Kilometern eine Höhe von 500 Metern, und selbst an der Küste Floridas wären die Wellen noch immer bis zu 25 Meter hoch. □

## SYSTEMATIK DER FALLENDEN BERGE



**Berg- oder Felssturz:** Ausgelöst durch den Druck etwa von gefrorenem Wasser, fallen einzelne Blöcke frei aus einer Felswand oder von steilen Hängen in die Tiefe



**Bergsturz:** Zusammenhängende Gesteinsmassen rasen als Einheit ins Tal. Mit hohem Tempo gleiten sie auf tieferen Felsschichten, die parallel zum Hang stehen



**Schuttstrom:** Ein Gemisch aus lockerem Material (Schlamm, Boden und Gesteinsbrocken) wird von starken Niederschlägen durchnässt und fließt mit bis zu 100 km/h hangabwärts



Tourismus fördert Bergstürze

## Menschengemachte Hangrutsche

Zwar werden die meisten Erdbeben durch natürliche Ereignisse wie Niederschläge oder Erdbeben ausgelöst. Doch fast 40 Prozent aller Massenbewegungen gehen auf den Menschen zurück: So werden etwa in touristenreichen Bergregionen Wälder gerodet, Skipisten errichtet, Hänge für den Straßenbau angeschnitten. Auch Luftschadstoffe lassen ganze Baumbestände sterben. Dadurch verlieren Gesteinsmassen an Halt; das Risiko einer Katastrophe nimmt zu.





Junge Wurzeln vermögen sich in enge Gesteinsspalten zu schieben. Wenn sie wachsen, bauen sie einen enormen Druck auf – und können selbst Felsen sprengen

# Die Baumeister des Planeten

Ohne Lebewesen sähen Landschaften anders aus, gäbe es manche Gebirge nicht – und keinen Boden

An den Ufern der Shark Bay, einer Bucht an der Westküste Australiens, ragen merkwürdige Gebilde aus dem Meer: Tausende steinerne Knollen, kniehocher Säulen, wuchtig und zerfurcht. Ein schleimiger Film überzieht ihre warzige Oberfläche. Es ist eine millimeterdünne Grenzschicht zwischen Gestein und Wasser, in der sich das Leben tummelt.

Der schmierige Überzug wird von Bakterien gebildet: urchinigen Mikroben, die in ähnlicher Form bereits vor Jahrmilliarden in den seichten Gewässern der Ozeane lebten – und die noch heute davon zeugen, mit welcher Kraft das Leben seit seiner Entstehung das Bild des Planeten prägt.

Denn jene Kalksteine, auf denen die Winzlinge leben, werden von ihnen selbst gebildet. Die Bakterien betreiben – wie grüne Pflanzen auch – Photosynthese: Sie verwandeln die Energie des

Sonnenlichts in chemische Energie. Durch eine damit verbundene komplexe Reaktionskette entsteht Kalk. Ganz allmählich, bis zu einem Millimeter im Jahr, wachsen Schicht um Schicht sogenannte Stromatolithen heran



Gesteinsbildner: Schicht um Schicht bauen Bakterien diese Kalksteine auf (Shark Bay, Australien)

(griech. *stroma* = Decke; *lithos* = Stein). Die von Lebewesen gebildeten Gesteine gehören zu den ältesten Fossilien der Erde.

Auf ganz ähnliche Weise sind auch die größten je von Organismen errichteten Bauwerke entstanden: Korallenriffe. Allein das Große Barriereriff erstreckt sich über mehr als 2000 Kilometer entlang der Ostküste Australiens.

Myriaden nur wenige Millimeter großer Polypen scheiden dort unablässig Kalk ab. Weltweit produzieren die gehirnlosen Baumeister Jahr für Jahr etwa zweieinhalb Milliarden Tonnen des weißlichen Gesteins – vergleichbar mit einem etwa 1000 Meter hohen Berg.

Im Laufe der Erdgeschichte trockneten manche Meere aus, Riffe fielen trocken, wurden durch Kontinentalbewegung emporgehoben oder zu Gebirgen gefaltet. Die steinerne Substanz

der Dolomiten etwa wurde vor 250 Millionen Jahren von Korallenriffen gebildet, bis sie sich Millionen Jahre später zu den schroffen Massiven auftürmte. Mancher Kalkstein stammt auch von jenen unzähligen Muschelschalen, die am Grund des Ozeans sedimentierten und unter Druck zu dicken Lagen zusammengepresst wurden.

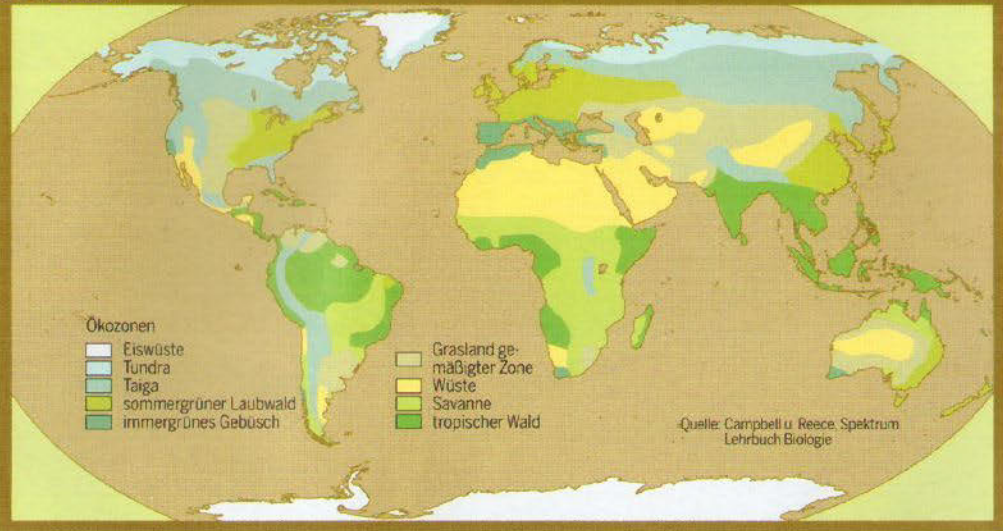
Doch nicht nur die unterseeische Organismenwelt formt die Erdoberfläche. Termiten etwa prägen mit ihren aus Erde und Speichel konstruierten meterhohen Wohntürmen ganze Landschaften: In den westafrikanischen Savannen stehen auf manchem Quadratkilometer Tausende der kathedralenartigen Behausungen.

Und immerhin leben mehr als die Hälfte aller Tiere nicht auf, sondern in der Erde: Mäuse bauen weit verzweigte Gang-



## DIE VEGETATIONSZONEN DER ERDE

Pflanzen prägen weltweit Landschaftsbild und Böden; so bedecken Wälder ein Drittel des Festlands. Manche Nadel- und Laubwälder wachsen auf meterdicken Humusschichten, gebildet aus toten Pflanzen. Regenwaldböden dagegen sind humusarm: Das Klima fördert die Zersetzungskraft von Mikroben, Pflanzenreste werden rasch abgebaut und können sich nicht ansammeln. Grasländer bedecken 15 Prozent des Landes und bringen die fruchtbarsten Böden hervor. Wüsten überziehen etwa ein Drittel der Kontinente. Der Grund wird hier nur von einer spärlichen Pflanzendecke geschützt und ist daher Wind und Wasser besonders stark ausgesetzt.



systeme, Dachse und Füchse graben ihre Höhlen, Abermilliarden Regenwürmer fressen sich weltweit durch den Boden. Wissenschaftler schätzen, dass pro Hektar Land jährlich bis zu 250 Tonnen Erde allein in Wurmärdern verarbeitet werden.

Ohne die Landlebewesen gäbe es überhaupt keine Muttererde. Denn diese fruchtbare Bodenschicht entsteht erst im Wechselspiel zwischen unbelebter und belebter Natur. Zunächst brechen

Regen und Wind, Hitze und Kälte den nackten Fels auf, zermürben ihn, lassen ihn verwittern. Dann besiedeln Pflanzen das bröckelige Gestein. In enge Spalten schieben sie ihre zunächst noch zarten Wurzeln. Beim Wachstum vergrößert sich der Durchmesser der unterirdischen Triebe, manche vermögen dabei einen derart großen Druck aufzubauen, dass sie ganze Felsen sprengen.

Sobald Vegetation auf dem zuvor leblosen Untergrund gedeiht, siedeln sich Tiere, Pilze und Bakterien an. Auf abgestorbene Pflanzenreste, den Kot und die Kadaver von Tieren stürzen sich Insekten und Mikroben. Sie fressen die organische Substanz und scheiden Stoffe (etwa Mineralien) aus.

Mit der Zeit bildet sich eine meist energiereiche Humusschicht, die wiederum den Pflanzen als Nährstoffquelle dient: der Mutterboden. Doch bis diese Bodenentwicklung so weit vorangeschritten ist, dass darauf Wälder wachsen, können mitunter mehrere Tausend Jahre vergehen.

Nicht nur verleiht die jeweilige Vegetation den Lebensräumen ihre Gestalt. Bäume und Wurzeln halten zudem die erosiven, zerstörerischen Kräfte der Erde auf. Wälder federn Lawinen ab. Wurzelgeflechte schützen Hänge davor, ins Tal zu rutschen. Blätter mindern den Aufprall von Regen, Graupel und Hagel auf den Untergrund.

Zudem geben Bäume, Sträucher, Gräser der äußeren Schicht der Erde eine völlig neue Form –

## WIE DIE PFLANZEN DAS LAND EROBERTEN

**Vor rund 3,5 Mrd. Jahren:** Erste Photosynthese bei Bakterien, mit der später auch Pflanzen die Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln. Bei der Reaktion entsteht Sauerstoff, der sich in der Luft anreichert.

**Vor 480 bis 440 Mio. Jahren:** Grüne Pflanzen besiedeln das Land.

**Vor 440 bis 416 Mio. Jahren:** Als früheste Gefäßpflanzen entstehen Farne.

**Vor 416 bis 360 Mio. Jahren:** Erste Bäume erobern die Kontinente.

**Vor 360 bis 299 Mio. Jahren:** Gewaltige Wälder (etwa aus Farnen) wachsen heran. Aus den Überresten dieser Wälder bilden sich später die Kohlelager.

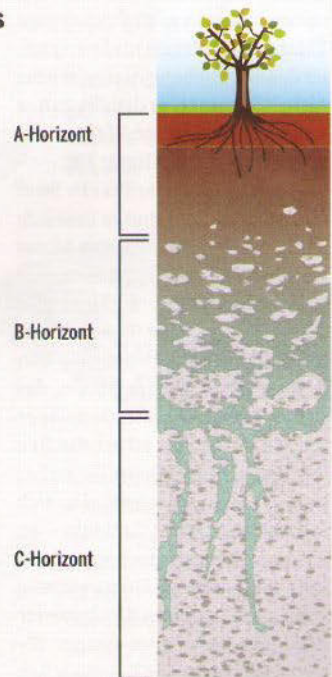
**Vor 100 Mio. Jahren:** Blütenpflanzen werden erstmals von Insekten bestäubt.

sie vergrößern ihre Oberfläche um ein Vielfaches. Allein das Laub einer einzelnen, rund 80 Jahre alten Buche würde, nebeneinander gelegt, eine Fläche von mehr als 250 Quadratmetern bedecken. Wälder schaffen gleichsam ge-

waltige Mengen an Raum und machen ihn bewohnbar für andere Lebewesen. Nicht zuletzt daher sind die Tropenwälder mit ihrem Netzwerk aus Billiarden Zweigen und Blättern die artenreichsten Ökosysteme des Planeten. □

## DER AUFBAU DES BODENS

Boden entsteht durch Verwitterung von Gestein: Wasser dringt in Spalten ein, gefriert im Winter und sprengt den Fels. Sobald Lebewesen in der Lage sind, in das aufgebrochene Gestein einzudringen, beschleunigen sie den Verwitterungsprozess. Bakterien, Pilze, Flechten, Moose und die Pflanzenwurzeln scheiden Säuren aus, die das umliegende Material angreifen. Allmählich bildet sich so aus den Gesteinspartikeln, den Bodenorganismen und dem Humus der „Oberboden“ (A-Horizont). Versickerndes Regenwasser transportiert Mineralstoffe aus dieser humusreichen Lage in eine tiefere Bodenschicht, den Anreicherungs- oder B-Horizont. Darunter liegt das Ausgangsgestein (C-Horizont).



Stelzwurzeln von Mangroven

## Verlandung

Mangrovenwälder wirken wie natürliche Bollwerke gegen die zerstörerische Gewalt des Meeres: Ihre Wurzeln bremsen Wellen ab und schützen das Hinterland vor der erodierenden Kraft des Wassers. Zudem bleiben aufgewirbelte Schwebeteilchen an dem weitverzweigten Wurzelgeflecht hängen; mit der Zeit bilden sich daraus festere Sedimentschichten. Nach und nach entsteht so neues Land, auf dem andere Pflanzenarten Fuß fassen können, während die Mangroven weiter in Richtung Meer wachsen.





Wie gewaltige Flüsse aus Eis treffen sich Gletscher im Kuane National Park, Kanada. Die schnellsten Eismassen bewegen sich fast sieben Kilometer im Jahr

# Unter der Last des eisigen Panzers

Sie sind kraftvoller als Wind und Wasser: Jährlich reißen Gletscher Milliarden Tonnen Gestein los

**E**s ist ein ganz besonderer Stoff, der die Oberfläche der Erde mitgestaltet: Er schürft gewaltige Täler aus Gebirgen und verfrachtet das abgeriebene Material über viele Kilometer, er drückt ganze Landschaften in die Tiefe – und er verändert das Klima: Eis.

Für Geologen ist Eis ein Stoff fast wie Gestein. Denn es lässt sich ähnlich definieren: als feste Masse aus mineralischen Kristallen.

Auch bei der Entstehung gibt es Parallelen. Die Masse etwa eines Gletschers formt sich ähnlich wie ein Sedimentgestein, das sich aus übereinander abgelagerten Schichten von mineralischen Partikeln bildet. Beim Gletscher sind es Schneeflocken, die sich Schicht für Schicht sammeln – zunächst locker mit etwa 90 Prozent Luft dazwischen. Doch ständig neue Lagen pressen die darunterliegenden Schichten immer fester zusammen. Wie bei manchen

Gesteinen wandelt der ungeheure Druck die Kristalle der Schneeflocken dann langsam um, bis sie zu Eis werden. Ihre Dichte nimmt dabei um fast das Fünffache zu; sie enthalten schließlich nur noch zehn Prozent Luft.



Schmelzwasser wirkt wie eine Schmierschicht am Grunde eines Gletschers: Er rutscht schneller

Und ähnlich wie die Gesteine des Erdmantels unter dem ungeheuren Druck und der Hitze in der Tiefe plastisch verformbar werden (aber nicht flüssig sind), beginnt das Eis eines Gletschers unter dem Gewicht der darüber liegenden Eis- und Schneemassen langsam zu fließen.

Dabei nimmt es eingeschlossenes, lockeres Gestein mit und schleift, schrammt, kratzt damit über den Untergrund. Mehrere Millionen Tonnen Gestein kann ein Talgletscher von einigen Hundert Meter Breite so pro Jahr vom Untergrund abschleifen.

Weil das Eis ab etwa 50 Meter Tiefe plastisch ist, kann es Unebenheiten am Boden überfließen und den Windungen eines Tals folgen. Das können die weiter oben liegenden, spröden Eisschichten nicht: Sie brechen und reißen; es entstehen die gefährdeten Gletscherspalten.

Bewegt sich das Eis nur durch plastische Verformung, legt es einige Zentimeter pro Tag zurück. Weitaus höhere Geschwindigkeiten – mehr als ein Meter binnen 24 Stunden – können Gletscher erreichen, wenn sich an ihrer Basis Schmelzwasser bildet, das dann wie eine Schmierschicht wirkt. Die schnellsten Eismassen haben in Grönland gut 19 Meter pro Tag zurückgelegt; das ergibt sieben Kilometer im Jahr.

Weil das Eis eines Gebirgsgletschers wie ein Bulldozer an den Talwänden entlangschrammt, schürft es eine Form mit steilen Wänden und breitem Boden heraus: das Trog- oder U-Tal.

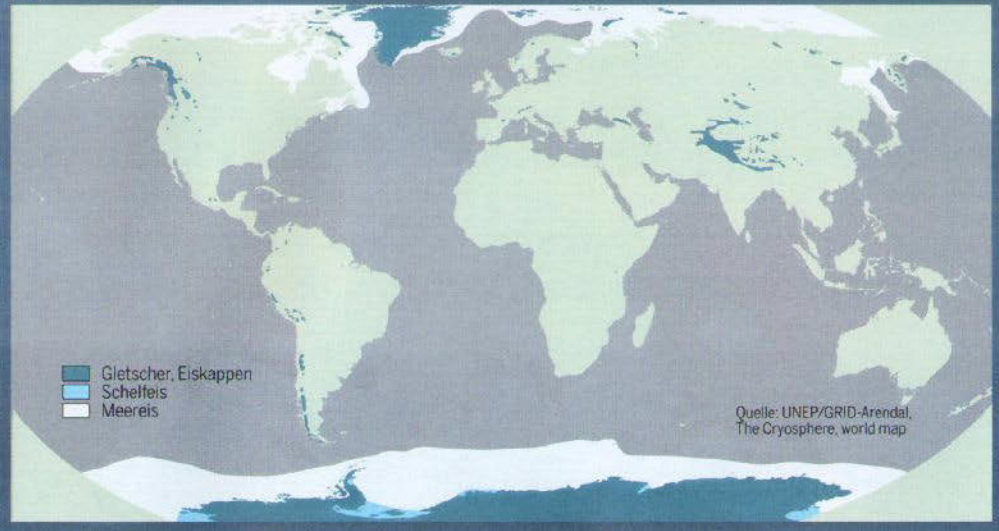
Flüsse dagegen kerben V-förmige Täler aus, weil das Wasser zu den tiefsten Punkten fließt und sich dort immer tiefer in den Boden einschneidet.

In der Eiszeit haben Gletscher gewaltige Trogtäler aus den Ge-



## WELTWEITES EISVORKOMMEN

Rund zehn Prozent der Landfläche sind von Eis bedeckt. Der größte Teil davon, rund 25 Millionen Kubikkilometer, liegt auf dem antarktischen Kontinent. In dessen Zentrum sind die Eismassen am stärksten, sodass sie von ihrem eigenen Gewicht nach außen gepresst werden und sich langsam, aber stetig fortbewegen. Bei gleich bleibendem Klima verliert ein Gletscher genau die Menge an Eis (etwa durch Kalben oder Schmelzen), die in der gleichen Zeit neu gebildet wird. Wenn Inlandeis auf Seewasser trifft und darauf schwimmt, nennt man es Schelfeis. Die nordpolare Eiskappe besteht größtenteils aus gefrorenem Seewasser (Meereis).



birgen gehobelt und die zum Teil mehr als 1000 Meter tiefen Fjorde in Norwegen, Alaska, British Columbia, Chile und Neuseeland geschaffen. Viele Landschaften wurden auch durch die abgeschmirgelten Massen an Sand, Schutt und Steinen geprägt, die die Flüsse aus Eis mit sich nahmen und nach dem Abschmelzen als „Moränen“ hinterließen – so die Geestlandschaft Schleswig-Holsteins, große Teile Niedersachsens, Mecklenburg-Vorpommerns und Brandenburgs sowie das Bayerische Alpenvorland.



Gletscherschwund im Aostatal

### Rückzug der Riesen

Der Treibhauseffekt lässt weltweit die Gletscher schrumpfen. Das vermeintlich „ewige Eis“ der Alpen etwa ist aufgrund des Klimawandels höchst vergänglich geworden: Seit 1980 haben die Eispanzer weltweit jedes Jahr durchschnittlich 30 Zentimeter an Dicke verloren. Falls sich die Erdatmosphäre weiterhin derart schnell erwärmt, werden die Gletscher noch vor Ende des 21. Jahrhunderts bis auf winzige Inseln verschwunden sein.

Erosion und Ablagerung sind aber nicht der einzige Weg, wie Eis unseren Planeten formt.

Allein das schiere Gewicht der Gletschermassen hat zum Teil dramatische Folgen. So lastete während der letzten Eiszeit eine etwa 2500 Meter mächtige Eiskappe auf Skandinavien. Als sie abtaute, stieg die von dem Druck befreite Kontinentalkruste darunter in die Höhe.

Die Folge war unter anderem vor rund 8000 Jahren ein Erdbeben, bei dem sich der Boden ruckartig um zehn Meter anhub – und die über 150 Kilometer völlig gerade verlaufende Parve-Verwerfung in Nordschweden schuf.

In Grönland ist der Eisschild noch heute bis zu 3200 Meter dick und drückt die muldenförmige Insel so weit nach unten, dass der Boden Zentralgrönlands unter dem Meeresspiegel liegt.

Auch die Reflexionseigenschaften des Eises beeinflussen unseren Planeten. Weil die weiße Oberfläche 80 bis 90 Prozent der Sonnenstrahlen – und damit der Energie – unseres Zentralgestirns ins All zurückwirft, setzt eine zunehmende Vereisung einen Rückkopplungs-Effekt in Gang: Die Erde kühlt stärker aus, es bildet sich noch mehr Eis.

So geschah es während der Eiszeiten. Damals waren mehr als 30 Prozent der Landoberfläche von Schnee und Eis bedeckt.

Heute sind es lediglich zehn Prozent. Dennoch enthält das Eis rund 75 Prozent aller Süßwasservorräte, über vier Fünftel davon

## CHRONIK DER EISZEITEN

**Vor 2,3 Mrd. Jahren:** Die früheste Eiszeit, die Forscher bisher ermitteln konnten, beherrscht das Klima auf der Erde.

**Vor 750 bis 580 Mio. Jahren:** Die Erde vereist mehrmals in Folge, mindestens einmal friert sie fast völlig zu. Selbst äquatornahe Gebiete vereisen.

**Vor zehn Mio. Jahren:** Es kommt zu einer allgemeinen Abkühlung der Polargebiete. Die heutigen Eiskappen der Pole beginnen zu wachsen.

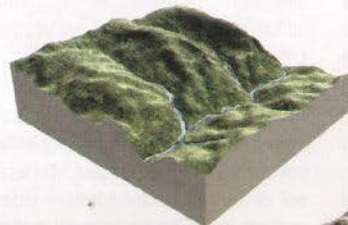
**Vor 1,8 Mio. bis 11 000 Jahren:** Eiszeitalter (Pleistozän); mehrfach wechseln sich Kalt- und Warmphasen ab. Vor 20 000 Jahren erreicht die Vereisung ihren Höhepunkt: 30 Prozent der Landflächen vergletschern.

in der Antarktis. Mehr als 3600 Meter dick ist der Eispanzer im Inland des südlichen Kontinents.

Am Boden dieses Panzers haben Forscher in den vergangenen Jahren eine Sensation entdeckt: Der ungeheure Eis-

druck und die Wärme aus dem Erdinneren verflüssigen einen Teil des Eises – am Grund der Antarktis existiert ein gigantisches, weit verzweigtes Netz aus Flüssen und mindestens 180 Seen. □

## WIE GLETSCHER LANDSCHAFTEN FORMEN



Das Klima hat sich abgekühlt: Gletscher sind an die Stelle der Flüsse getreten. Sie schürften U-förmige Täler aus dem Gestein

Noch ist das Wasser nicht gefroren: Mehrere Flüsse haben V-förmige Täler in das Gebirge gekerbt



Schmilzt das Eis, bleiben Hängetäler zurück, die in das tiefer liegende, sogenannte Trogtal münden. Das wird mitunter von Meerwasser überflutet: Fjorde mit hochaufragenden Wänden entstehen, so in Norwegen





Feuer (hier im Westen der USA) verstärken den Treibhauseffekt. Ihre Rauchschwaden verhindern mitunter sogar, dass sich Regenwolken bilden können

## Die Macht der Feuerwalzen

Waldbrände vernichten große Teile der Vegetation. Doch viele Arten überleben erst durch das Feuer

**E**in Jahr lang, von Sommer 1997 bis Herbst 1998, standen weltweit jeden Tag irgendwo Wälder in Flammen. Feuer wüteten in Brasilien und Borneo, in Peru und Neuguinea, in Florida und in Griechenland. Allein in Indonesien vernichteten die Brände rund zehn Millionen Hektar tropischer Vegetation.

Eine Ursache war die alle drei bis fünf Jahre wiederkehrende Klima-Anomalie El Niño, die vielerorts für sehr lange Dürreperioden sorgte. Gerade in Zeiten extremer Trockenheit entstehen Flächenbrände besonders leicht.

Jeder Brand erzeugt sein eigenes Windsystem, das treibt das Feuer zusätzlich an: Heiße Luft steigt auf, kühle strömt nach und liefert neuen Sauerstoff. So entstehen regelrechte Feuerstürme, die auf Tornadostärke beschleunigen und sich mehrere Hundert Meter hoch auftürmen können.

Jahr für Jahr brennen in den Tropen und Subtropen 30 bis 50 Millionen Hektar Wald, fressen sich Flammen durch Landschaften – und formen so die Oberfläche der Erde neu.

Doch nur jedes siebte Buschfeuer entsteht auf natürliche Weise, etwa durch Blitzschlag. Die meisten Brände legt der Mensch, sei es aus Fahrlässigkeit – oder gezielt. Die UN-Welternährungsorganisation schätzt, dass in den Tropenländern Afrikas, Asiens und Südamerikas durch Brandrodungen jedes Jahr zwischen zehn und 20 Millionen Hektar Wald für immer zerstört werden.

In den Graslandschaften der Savannen kommt es dagegen zu einem regelmäßigen Zyklus von Aufbau und Zerstörung: Was über den Boden herausragt, vertrocknet in regenarmen Perioden und gibt den Flammen leichte Nahrung. Die in den Überresten

enthaltenen Mineralien düngen die nachwachsenden Pflanzen. Und weil sich der größte Teil ihrer Biomasse ohnehin im Boden konzentriert (in Form unterirdischer Sprossen und Wurzeln), sprießt nach der Trockenzeit rasch das neue Grün – bis sich wieder eine

trockene Grasschicht herausbildet, die dafür sorgt, dass sich das nächste Feuer ausbreiten kann.

So entstehen in den Savannen die größten zusammenhängenden Brandflächen der Erde: Häufig lodern Millionen Tonnen Biomasse auf 100 000-Hektar-

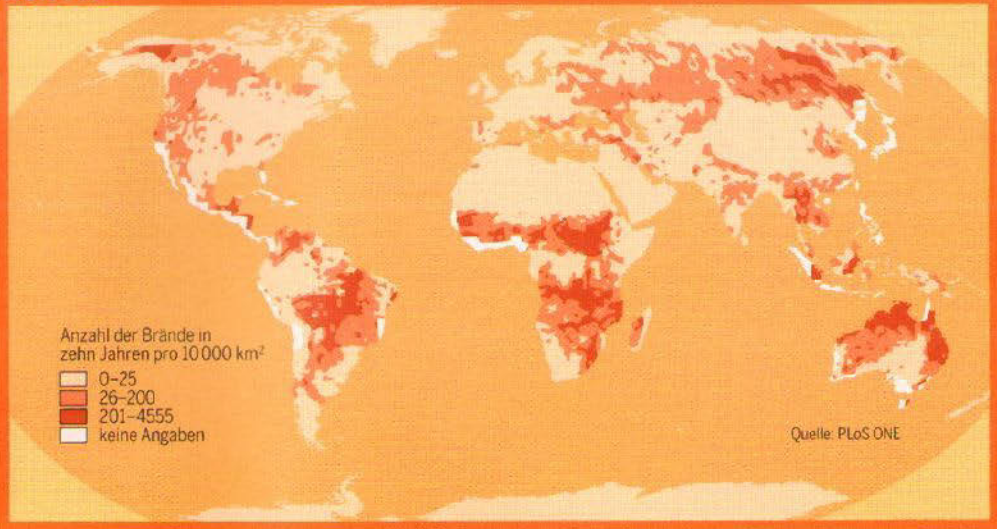


Brände verjüngen die Flora, wie hier auf den Kanaren: Die alte Vegetation hinterlässt mineralreiche Asche, auf der sich neue Pflanzen ansiedeln



## WELTKARTE DER FEUERSBRÜNSTE

Wissenschaftler haben Satellitendaten über die Feuerereignisse der vergangenen zehn Jahre ausgewertet und daraus eine Weltkarte erstellt. Darauf ist die Anzahl der Brände auf je 10 000 Quadratkilometern verzeichnet. Besonders häufig brennt es in tropischen und subtropischen Regionen: Jedes Jahr stehen dort 30 bis 50 Millionen Hektar Wald in Flammen. In manchen Gegenden (etwa Nordaustralien) loderten im letzten Jahrzehnt sogar bis zu 4500 Feuer. Heiße und regenarme Trockengebiete dagegen wie die Sahara oder die Namib bleiben größtenteils von Feuern verschont: Zu wenig Pflanzen wachsen, ein Brand kann sich nicht ausbreiten.



Gebieten gleichzeitig. Jedes Jahr qualmen insgesamt etwa 500 Millionen Hektar.

Die dabei entstehenden Gase und Rauchpartikel haben Folgen für das Klima. Experten gehen davon aus, dass seit 1880 durch Brandrodungen rund 130 Milliarden Tonnen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre gelangt sind. Etwa 1,1 Milliarden Tonnen kommen jährlich durch Rodungen hinzu.

In den Savannengebieten gelingt es der Folgevegetation,

ebenso viel CO<sub>2</sub> zu binden, wie zuvor beim Brennen freigesetzt worden ist – bei allen anderen Landschaftsarten fällt die Kohlenstoffbilanz dagegen negativ aus.

Feuersbrünste verstärken aber nicht nur den weltweiten Treibhauseffekt: Sie können auch verhindern, dass es regnet.

Denn feine Rauchpartikel wirken zwar als Kondensationskeime bei der Wolkenbildung – herrscht aber ein Überangebot von Partikeln in der Luft, entstehen sehr viele kleine Wassertröpfchen, und es bildet sich Dunst statt Regen: Die Feuer heizen sich dabei weiter auf, statt auf natürliche Weise gelöscht zu werden.

Für viele Ökosysteme sind regelmäßige Brände gar keine Bedrohung: Je häufiger etwa das Unterholz in den Koniferenwäldern Nordamerikas ungestört fackeln kann, desto weniger abgestorbenes Buschwerk sammelt sich an und desto geringer ist die Intensität der einzelnen Brände.

Manche Landschaften benötigen Feuer sogar zum Leben: Viele Samen treiben erst aus, wenn ein Brand die keimungshemmende Schicht aus abgestorbenen Pflanzenteilen beseitigt hat. Andere lagern über Jahre im Erdboden, bis sie von der Glut aktiviert werden. Und bestimmte Kiefern- und Fichtenarten sind so abhängig von Feuer, dass sie ihre in Zapfen oder Kapseln eingeschlossene Saat erst freisetzen, wenn Hitze die Samenbehälter aufsprengt hat.

Auch hätten einige tropische Baumarten wie Teak und Sal oh-

## BRANDCHRONIK EINES JAHRES

**Juli–Sept. 1997:** Buschfeuer auf Sumatra und Borneo außer Kontrolle. Brände in Brasilien und Kolumbien. In Ostafrika verbrennen 5000 Hektar Wald.

**Okt. 1997–Jan. 1998:** Feuer in Peru und Kasachstan, in Westaustralien bedrohen Buschbrände ein Gebiet von der Größe Englands. Vorstädte von Sydney werden evakuiert. In Brasilien brennt es weiter.

**Feb.–Juni 1998:** Lösversuche in Ostborneo scheitern. Wälder in Mittelamerika, Mexiko, Kanada, den USA und Russland lodern.

**Juli–Sept. 1998:** In Italien wüten Buschbrände, in Kenia Steppenbrände, Blitze entzündeten Wälder in Südkalifornien.

ne wiederkehrende Brände keine Chance zu bestehen: Sie würden auf Dauer von anderen Arten verdrängt werden. Die Bodenfeuern lichten den Wald, halten die Zahl der Schädlinge in Grenzen und

schaffen Platz für junge Pflanzen. Oft sind versengte Flächen schon nach einem Jahr wieder grün. Der Wald erholt sich, atmet auf.

Und harrt der nächsten Flammenfront. □

## WIE EIN WALDBRAND STURM ERZEUGT



Wenn große zusammenhängende Waldflächen Feuer fangen, kommt es zu einem Luftsog (blaue Pfeile): Heiße Luft steigt auf, kalte fließt von außen nach

Die sauerstoffreiche Luft, die dem Brandherd zuströmt, facht das Feuer weiter an. Es kommt zu einem sich verstärkenden Prozess: Das Feuer wird größer, der Luftsog intensiver



Mit der Zeit führt dieser Kamineffekt dazu, dass ein Feuersturm entsteht. Immer schneller breitet sich der Brand aus, erfasst die Baumkronen und wächst, sich selber schürend, zu einer gewaltigen Flammenfront heran



Verbrannter Wald in Brasilien

## Die Zukunft des Feuers

In vielen Lebensräumen wird der Klimawandel vermutlich zu drastischen Veränderungen führen: In den Nadelwäldern nördlicher Breiten etwa wird es wärmer und trockener: Forscher erwarten, dass sich dort die Brände mehren. Bereits ein Blitzschlag könnte dann ausreichen, um große Gebiete der Taiga zu vernichten. Nicht nur die Artenvielfalt würde darunter leiden: Verbrennt der in den Wäldern gespeicherte Kohlenstoff zum Treibhausgas Kohlendioxid, könnte das den Klimawandel verschärfen.




An aerial photograph of a city, likely Dubai, under a massive, towering sandstorm. The sky is filled with thick, orange-brown sand that reaches high above the city. The city below is a dense urban landscape with many buildings, including a prominent orange building in the center. A multi-lane highway with heavy traffic runs diagonally across the right side of the image. The overall scene conveys a sense of scale and environmental impact.

Luft

# Der Atem der Erde



An aerial photograph showing a dense urban area, likely Riyadh, Saudi Arabia, completely obscured by a towering, thick wall of orange-brown sand. The sandstorm fills the upper two-thirds of the frame, creating a dramatic and overwhelming scene. The city below is visible as a patchwork of buildings and roads, with a major highway running diagonally from the bottom left towards the center. The sky is a pale, hazy blue, contrasting with the intense color of the sand.

In Wüstengebieten treiben Winde mitunter gewaltige Sandmassen empor. Mehr als 100 Meter hoch türmte sich diese Sandwalze im März 2009 auf, als sie über Saudi-Arabiens Hauptstadt Riad rollte

Die Luft ist eine unscheinbare Naturgewalt. Wenn sie sich nicht zum Sturm erhebt, scheint sie wenig auszurichten. Und doch bearbeitet sie fortwährend die Oberfläche der Erde, hebt enorme Mengen an verwittertem Material empor, treibt Stäube über Tausende Kilometer. Sie schleift und poliert Steine, höhlt Felsen aus, türmt Dünen auf – und hat im Laufe von Jahrmillionen ganze Landschaften modelliert



Text: Rainer Harf

a

n manchen Tagen im Frühjahr, wenn der Wind von Süden weht, beginnt der Himmel über den Alpen zu bluten. Dann fällt Regen in feurigem Rot und lässt die Berge dunkel leuchten. Im Mittelalter fürchtet man, der „Blutregen“ sei ein Vorbote für Pestilenz und Siechtum.

Mitte des 19. Jahrhunderts findet Christian Gottfried Ehrenberg, Professor an der Berliner Friedrich-Wilhelm-Universität, eine Erklärung für das unheimliche Phänomen: Er entdeckt Tausende mikroskopisch kleiner Teilchen in einem rotbraunen Belag, den der Regen auf der Erde zurückgelassen hat. Darunter sind Bruchstücke von Mikroorganismen, die Ehrenberg aus Nordafrika kennt.

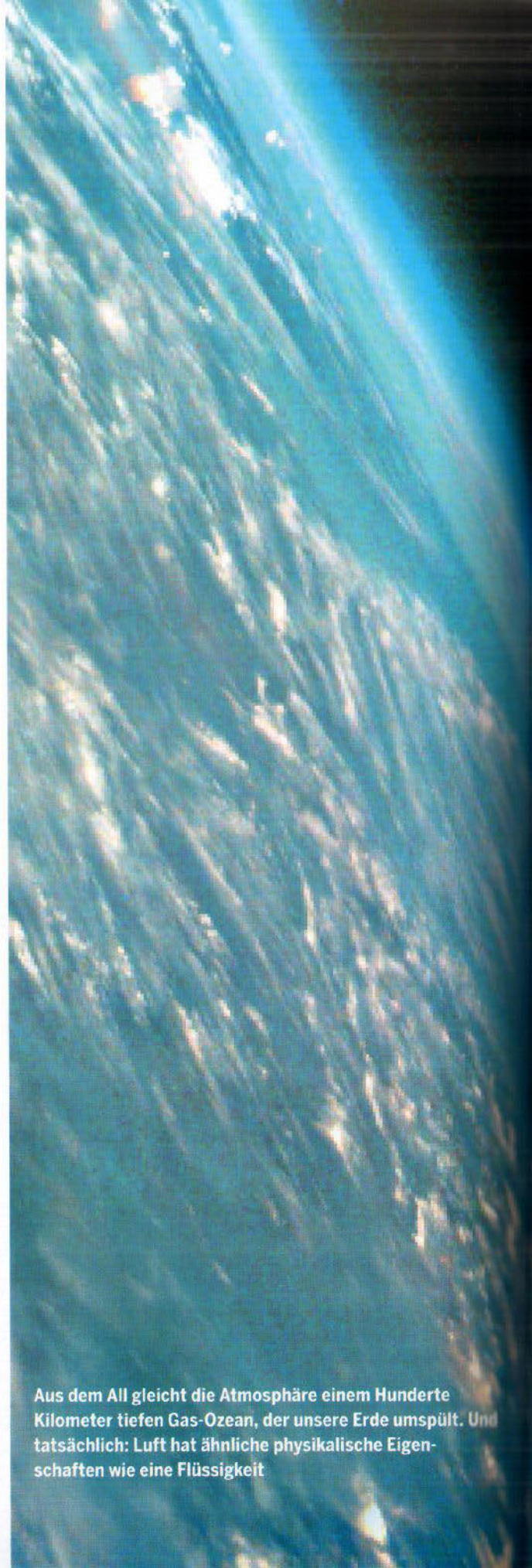
Sie lassen ihn schließen, dass Passatwinde rötlichen Saharastaub bis nach Europa treiben, wo er vom Niederschlag ausgewaschen wird. Es sei „ein großes organisches unsichtbares Wirken und Leben in der Atmosphäre“, überschreibt der Pionier der Staubforschung eine Abhandlung von 1847.

Luft ist damals ein noch wenig untersuchtes Medium, doch Ehrenbergs Analysen deuten bereits darauf hin, dass es sich um weit mehr handelt als eine simple Melange aus Stickstoff, Sauerstoff und ein paar Edelgasen. „Es ist nur der Anfang einer künftigen großen Erkenntnis“, resümiert er gegen Ende seines Werkes.

Heute gehen Meteorologen davon aus, dass Luft Abermillionen unterschiedlicher Ingredienzien enthält. Mehr noch: dass es kaum einen Stoff gibt, der sich nicht – wenn auch in geringsten Konzentrationen – in der Atmosphäre finden ließe. Wir atmen die Asche ausgebrochener Vulkane, die Rauchrückstände ferner Urwaldbrände und sogar kosmischen Sternenstaub.

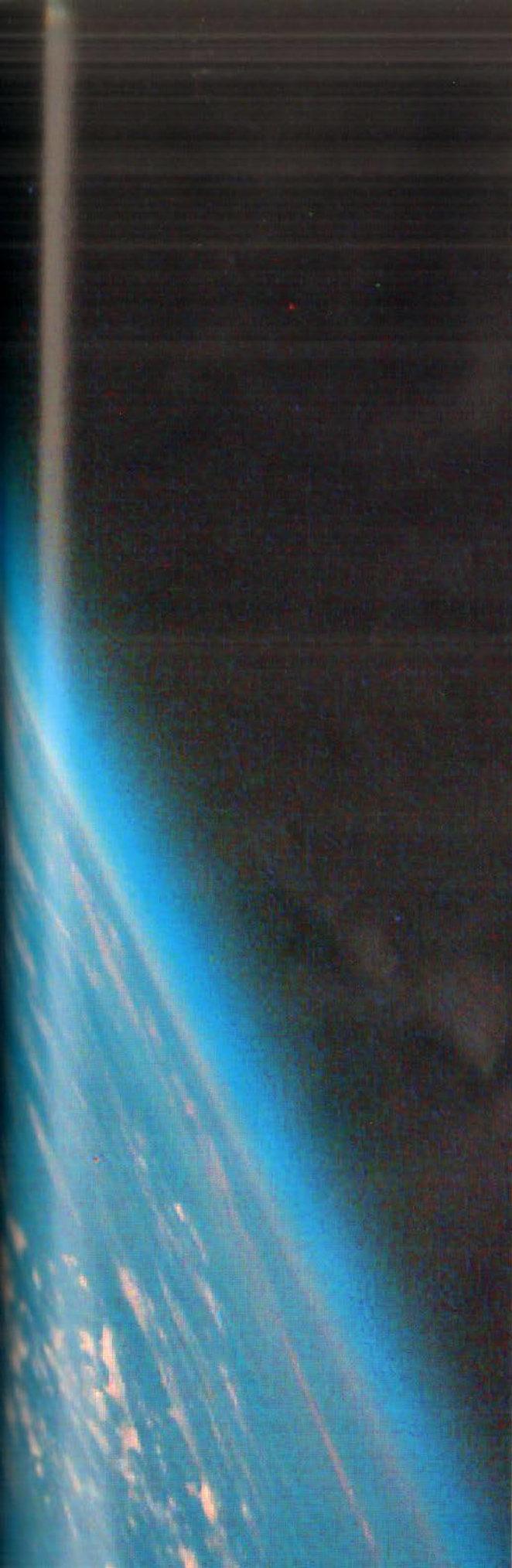
**DIE LUFT IST GLEICHSAM** ein Sammelbecken der Erdgeschichte. Und obwohl ihre Kräfte oft im Verborgenen wirken, bearbeiten ihre Gase ständig die Oberfläche unseres Planeten. Schleifen Steine, höhlen Felsen aus, türmen Dünen auf, färben Gesteine.

So hat beispielsweise der in der Atmosphäre gelöste Sauerstoff ganzen Landstrichen ihre Farbe verliehen – das Atemgas reagiert mit mineralischem Eisen, einem der häufigsten Elemente der Erdkruste, zu rotbraunen Oxiden. Wie eine Haut überziehen sie manche Böden der Mittelmeergebiete, die feuerroten Savannen Afrikas, die ockerfarbenen Felsen des Monument Valley.



Aus dem All gleicht die Atmosphäre einem Hunderte Kilometer tiefen Gas-Ozean, der unsere Erde umspült. Und tatsächlich: Luft hat ähnliche physikalische Eigenschaften wie eine Flüssigkeit





Luft hat zwar nur ein Tausendstel der Dichte von Wasser, doch verblüffenderweise einige ähnliche Eigenschaften. Die atmosphärischen Gase umfließen Hindernisse, schwappen über Bergketten, wirbeln als Tornados nach den gleichen physikalischen Gesetzen wie Strudel im Meer.

Und wie jedes Gewässer bildet die Atmosphäre auch Wellen. Sogar die größten der Welt: Vor der Küste des australischen Bundesstaats Queensland bäumt sich regelmäßig im Frühjahr eine bis zu 2000 Meter hohe Wellenwelle auf und rollt kilometerweit ins Landesinnere. Sie entsteht dadurch, dass sich die feuchte Meeresluft über dem Land aufheizt und aufsteigt. In der Höhe kühlt sie wieder ab, wodurch der Wasserdampf kondensiert.

„Wir leben am Grunde eines Ozeans aus Luft“, sagt Professor Boris Bonn vom Institut für Atmosphäre und Umwelt in Frankfurt. „Auf jedem Zentimeter unserer Haut lastet das Gewicht von einem Kilogramm. Geradeso, als wären wir von einer zehn Meter dicken Schicht aus Wasser bedeckt.“

Doch wie die Krabben auf dem Meeresboden haben wir uns dem Druck angepasst. Ohne die Last des Luftozeans könnten wir gar nicht leben. In 30 Kilometer Höhe etwa, wo die Atmosphäre dünn ist und kaum Druck herrscht, würde unser Blut zu kochen anfangen, unser Speichel brodeln, unsere Augen aus den Höhlen quellen.

Auf Dauer hält  
selbst der härteste  
Fels einem steten  
Luftstrom nicht stand

Der Luftocean schützt und umströmt uns. Bereits geringe Bewegungen der Luft bringen genug Energie auf, feinste Partikel aufzuwirbeln und emporzuheben. Schon die Wärme unserer Haut ruft einen schwachen Luftsog nach oben hervor, der kräftig genug ist, mikroskopisch kleine Hautschüppchen mitzureißen.

Nagellacksplitter, Seifenreste, Schweißtröpfchen und Stofffasern fliegen davon. Bakterien und Viren schweben wie Plankton in den Fluten des luftigen Meeres. Selbst winzige Gesteinskrümelchen fegt eine schwache Brise hoch und lagert sie häufig Kilometer entfernt ab.

Und so verdanken manche Bodenarten ihre Entstehung den Winden: Vor Jahrzehntausenden, wäh-



rend der letzten Eiszeit, bliesen beispielsweise schwere Stürme Gesteinsmehle aus den riesigen Schotterflächen, die sich vor den Gletschern auftürmten. Sie transportierten den feinkörnigen Flugstaub bis an die Nordhänge der deutschen Mittelgebirge, wo durch weitere Verwitterung die fruchtbaren Lössböden entstanden.

Mancherorts sind die Löss 60 Meter mächtig, in China schichten sie sich gar mehrere Hundert Meter hoch. Heutzutage bedecken Lössböden etwa zehn Prozent der weltweiten Landoberfläche.

**AUF IHRER REISE** mit der Luft prallen solche Flugsande oft wie kleine Geschosse auf andere Steine und reißen weiteres verwittertes Material mit. Auf Dauer hält daher auch der härteste Fels einem solchen steten Luftstrom nicht stand: Zwar erodiert Luft das Gestein langsamer

## Weltweit wirbeln jährlich fünf Milliarden Tonnen Mikropartikel in der Luft herum

als Wasser, doch mit vergleichbaren Resultaten. In Aber-tausenden von Jahren haben Winde auf diese Weise bizarre Formen aus dem Erdmantel gefräst und ganze Landschaften modelliert.

Im Südwesten Australiens etwa hat nicht nur Wasser, sondern vor allem ein permanenter Luftstrom eine 110 Meter lange und 15 Meter hohe Felsfront derart ausgehöhlt und glatt geschliffen, dass es wirkt, als sei eine Monsterwelle zu Stein erstarrt.

Weiter nördlich, an der Westküste, haben Winde einen ganzen Skulpturenpark geschaffen: Tausende Kalkstein-Säulen ragen meterhoch aus dem ockerfarbenen Sand. Einige von ihnen sind dünn wie Finger, andere wuchtig und zerfurcht. Vor Tausenden von Jahren waren diese *Pinnacles* noch eingebettet in eine dicke Sedimentschicht. Im Laufe der Zeit haben Winde das weichere Material abgetragen, die härteren Kalksteinkerne blieben stehen.

Ähnliches geschah auch auf dem Plateau Tassili du Hoggar im Süden Algeriens, wo nur noch das Gerippe der ehemaligen Gebirgslandschaft steht. Vor Jahr-millions hoben vulkanische Kräfte die Massive des Hoggar und warfen gewaltige Felsplatten auf. Sie wurden zu natürlichen Steinbrüchen: Seither zermürben Wind

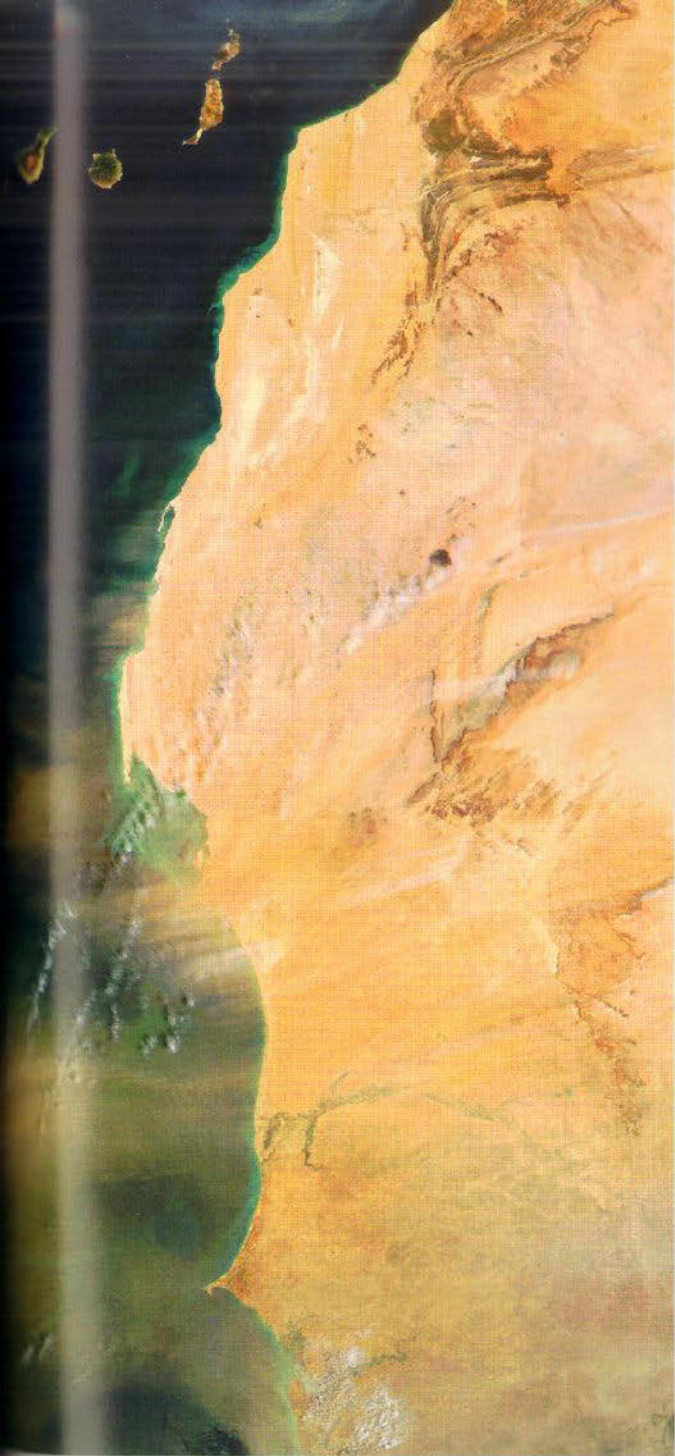


Jährlich treiben Winde rund 250 Millionen Tonnen Staub aus der Sahara nach Westen. Der Großteil fällt in den Atlantik, ein Fünftel gelangt bis in die Neue Welt – und düngt dort den Regenwald

und Wasser das Gestein zu Schutt und Sand, der bis in die zentrale Sahara geblasen wird. Dort haben Lüfte die Sandmassen zu Hunderte Quadratkilometer großen Dünenfeldern aufgetürmt.

**DER LUFTOZEAN** scheint vor allem in Trockengebieten besondere Kräfte zu entfalten. Weil dort kaum Vegetation den Untergrund schützt, vermögen starke Winde sogar größere Sandkörner mitzureißen, die herumliegende Steine spiegelglatt polieren, schleifen oder zerschmir-

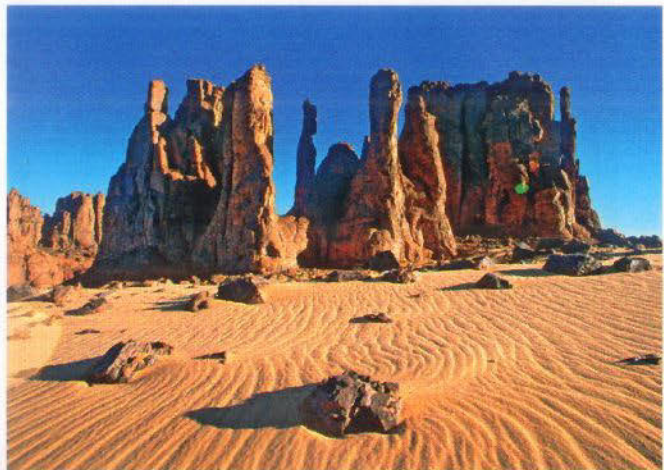




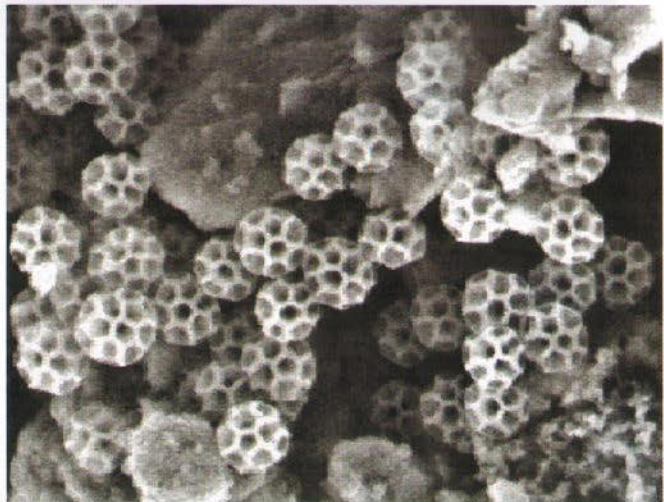
geln – wie ein starkes Sandstrahlgebläse in einer Kettenreaktion der Selbstverwüstung.

Selbst bei völliger Windstille treibt die Thermik in Trockengebieten gewaltige Massen an feinsten Partikeln empor: Im Sommer etwa, wenn die Sonne auf den Sand brennt, hängen Staubnebel über weiten Wüstenstrichen, oft monatelang. Sie machen jedwede Orientierung unmöglich. Mancher Karawanenführer fürchtet sie mehr als Sand-Orkane.

Gelangt der staubige Atem der Sahara in höhere Luftschichten, weht er mitunter weit hinaus und regnet Tausende Kilometer entfernt ab – nicht nur als Blutregen über den Alpen. Der weitaus größte Teil der Wüsten-



Das Plateau Tassili du Hoggar in Algerien zeugt von der Kraft des Windes. In Jahrtausenden haben die Luftmassen einen Gebirgszug abgetragen. Heute ragen nur noch Säulen härteren Gesteins empor



In der Atmosphäre schweben Myriaden mikroskopisch kleiner Teilchen (hier Sekretpartikel von Insekten). An ihnen kann sich Wasserdampf anlagern, es bilden sich Tröpfchen und schließlich Wolken

stäube wird nach Westen getrieben. Jährlich fliegen rund 250 Millionen Tonnen Staub Richtung Atlantik, durchschnittlich 685 000 Tonnen pro Tag – so viel, wie auf einen 340 Kilometer langen Güterzug passen würde.

Vor der Küste Westafrikas fallen Jahr für Jahr Abermillionen Tonnen in den Ozean, wo sich Myriaden einzelliger Algen von dem mineralreichen Exportgut ernähren.

Ein Fünftel der Masse aber treibt der Wind noch weiter, über den Atlantik hinweg bis in die Neue Welt. Über dem Amazonas- und Orinokobecken spülen Gewitter den Staub herab. Und dort sorgt die unsichtbare Luftfracht dafür, dass einer der produktivsten Lebensräume des Planeten gedeiht: Die Nährstoffe düngen Bakterien und Pilze, Flechten und Dschungelpflanzen.





Obwohl viel leichter als Wasser, verhält sich Luft fast wie eine Flüssigkeit: umströmt Hindernisse, schwappt über Berge und bildet Wellen. Wie diese 2000 Meter hohe Wolkenwoge in Australien

Ohne den Saharastaub würde der südamerikanische Regenwald in seiner jetzigen Form möglicherweise sogar kollabieren. Denn der Amazonas spült jedes Jahr gewaltige Mengen an mineralischen Nährstoffen ins Meer. Erst der tonnenschwere Staubeintrag kompensiert diesen Verlust.

**JÄHRLICH WERDEN** weltweit etwa fünf Milliarden Tonnen Mikropartikel in die Luft gewirbelt. Das ist so viel, als würde man eine Pyramide aus Granit von zwei Kilometer Höhe und anderthalb Kilometer Breite zerkrümeln und

Stünde die Luft  
still, wäre die Erde ein  
lebensfeindlicher Ort

in der Atmosphäre verteilen. Allein in einem einzigen Kubikmeter deutscher Luft fliegen zwischen 100 Millionen und einer Billion Staubeilchen. Die meisten dieser Aerosolpartikel sind gerade mal den Bruchteil eines Millimeters groß und für das bloße Auge unsichtbar.

Und doch würde die Erdoberfläche ohne sie vollkommen anders aussehen: Deutschland gliche einer Wüste, das nordamerikanische Colorado Plateau wäre von keinem Canyon durchschnitten, über Hochgebirge würden keine Gletscher kriechen. Und die Antarktis wäre eisfrei.

Denn ohne Aerosolpartikel gäbe es weder Regen noch Schnee – und damit keine Flüsse. Zwar würden noch immer große Mengen an Wasser verdunsten. Doch selbst bei 100 Prozent wasserdampfgesättigter Atmosphäre könnten sich keine Wolken bilden: Bei deren Entstehung lagert sich gasförmiges Wasser stets an die Schwebeteilchen an.

Nur so kann der Wasserdampf zu flüssigem Wasser kondensieren – daher nennen Forscher die Partikel auch „Wolken-Kondensationskeime“. Anfangs sind die Tröpfchen Millimeterbruchteile klein, mit der Zeit wachsen sie und werden in ihrer Masse als Wolken sichtbar.

Die Luft enthält zwar nur einige Zehntausendstel Prozent des gesamten Wassers auf der Erde. Aber dennoch ist sie der bei Weitem aktivste Transporteur der Leben spendenden Flüssigkeit: Denn anders als in den Meeren und Eisdecken – in denen Wassermoleküle oft über Jahre verharren, sich langsam oder gar nicht bewegen – werden sie in der Atmosphäre rasch mit den Winden befördert und regnen im Mittel nach zehn Tagen wieder ab.

Dabei transportieren sie stets auch Energie. Denn damit flüssiges Wasser verdunstet, sich also in Gas verwandelt, müssen sich die einzelnen Wassermoleküle voneinander trennen. Dafür brauchen sie Energie, die fast ausschließlich von der Sonne als Wärmestrahlung geliefert wird. Pro Liter Wasser sind dafür 540 Kilokalorien nötig. Sobald



die Wassermoleküle wieder kondensieren, geben sie genau diese Menge wieder als Wärme an die Umgebung ab.

Ständig zirkulieren riesige Mengen an Wasser um den Erdball, rund 15 Billionen Tonnen (das entspricht dem 300-fachen Volumen des Bodensees). Die Atmosphäre wirkt also wie eine gigantische Energieumwälzpumpe. Die ewigen Turbulenzen des erdumschlingenden Luftozeans befördern Wärme aus den Tropen über die mittleren Breiten bis zu den Polregionen.

Stünde die Luft still, wäre unsere Erde ein lebensfeindlicher Ort: Die Tropen wären um 14 Grad Celsius wärmer als heute, die Pole dagegen um 25 Grad kälter.

VOR JAHRMILLIARDEN spien Vulkane heiße Gase aus, die mit der Zeit eine Uratmosphäre bildeten. Später produzierten unzählige Generationen von Bakterien und Algen Sauerstoff – und reicherten die Luft mit dem

lebenswichtigen Gas an (siehe Seite 38). Diese Atmosphäre prägt den Planeten nicht nur, sie schützt ihn auch vor Veränderung. Denn ohne die unsichtbare Hülle wäre die Erde nicht nur eiskalt – das verhindert der Treibhauseffekt –, sondern auch einem ständigen Bombardement aus dem All ausgesetzt. Zahllose kleinere Meteoriten würden ungehindert auf ihre Oberfläche prasseln.

Dank der Atmosphäre aber prallen die kosmischen

Geschosse in einigen Hundert Kilometer Höhe auf die Luft. Erhitzen sich dort durch Reibung mit den Gasmolekülen.

Und verglühen als Sternschnuppen. □

**Rainer Harf**, 32, ist Redakteur bei GEOkompakt. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Boris Bonn**, Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe Universität Frankfurt.

**Literatur:** Gabrielle Walker, „Ein Meer von Luft“, Berlin Verlag; Detlev Möller, „Luft“, de Gruyter Verlag.

## MEMO | LUFT

» **DIE ATMOSPÄRE** enthält Abermillionen unterschiedlicher Stoffe.

» **OHNE SCHWEBETEILCHEN** in der Luft könnten sich keine Wolken bilden.

» **RUND 15 BILLIONEN TONNEN** Wasser zirkulieren in der Atmosphäre um den Erdball.

» **STÜNDE DIE LUFT STILL**, wären die Tropen um 14 Grad Celsius wärmer, die Pole um 25 Grad kälter.

## ANZEIGE

# Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



**Tebonin®**

\* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit  
infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. Anwendungsgebiete: Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe

Stand: April 2009 1/04/09/1

## Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.\*

Ginkgo-Spezialextrakt  
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.  
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

[www.tebonin.de](http://www.tebonin.de)



# Wenn der Himmel explodiert

Blitze sind gewaltige Naturphänomene: Ihre Kraft vermag Menschen meterweit durch die Luft zu schleudern, Kommunikationsnetze zu unterbrechen und Sand zu Glas zu schmelzen. Und womöglich hat ihre Energie vor Urzeiten zur Entstehung des Lebens beigetragen. Doch obwohl sich Forscher seit mehreren Jahrhunderten mit den Riesenfunkeln beschäftigen, rätseln sie bis heute, wie genau das Himmelsleuchten entsteht





Ausbruch des Vulkans Chaitén in Chile, Mai 2008: Elektrisch geladene Partikel in den Aschewolken verursachen Blitzentladungen



A

m Abend des 8. Dezember 1963 dreht der Flug 214 der Gesellschaft Pan American eine Warteschleife über dem Nordosten des US-Bundesstaates Maryland. Die Landung in Philadelphia verzögert sich, der Pilot der Boeing 707 will auf ein Abflauen des Windes über dem Zielflughafen warten.

In 1500 Meter Höhe fliegt die im Funkverkehr auch „Clipper“ genannte Pan-Am-Maschine durch Wolken und leichten Regen – genau wie es der Wetterbericht für diese Region vorhergesagt hat. Doch dann, um 20.58 Uhr, erreicht die Flugkontrolle in Philadelphia unvermittelt ein Hilferuf: „Mayday, Mayday, Mayday! Clipper 214 außer Kontrolle.“

„Clipper 214 stürzt brennend ab“, meldet sich Sekunden später der Pilot einer zweiten, in der Nähe kreisenden Maschine. Etwa zur gleichen Zeit beobachten Zeugen am Boden ein leuchtendes Zucken am Nachthimmel, dann einen Feuerball. Danach regnen Trümmer herab.

Keiner der 81 Insassen überlebt das Unglück. Die Untersuchung ergibt: Ein Blitz war in die Tragfläche eingeschlagen und hatte Treibstoff im Reservetank entzündet. Die Explosion riss die Maschine im Flug auseinander.

Der Absturz gilt bis heute als eine der schlimmsten durch Blitzschlag ausgelösten Katastrophen. Zwar wird ein Verkehrsflugzeug im Schnitt einmal pro Jahr vom Blitz getroffen. Doch gehen die meisten dieser Vorfälle glimpflich aus – auch deshalb, weil nach dem Unglück von 1963 die Bauweise der Tanks verbessert wurde.

Genau vorhersagen lassen sich die Einschläge nicht. Es ist diese Unberechenbarkeit, die Flug 214 zum Verhängnis wurde – und die Menschen seit jeher an diesem Naturphänomen fürchten. Weil Blitze zudem oft Gebäude,

## Weltweit fordern Blitze Jahr für Jahr mehrere Tausend Todesopfer

Bäume oder andere erhöhte Punkte treffen, galten sie jahrtausendlang als übernatürliche Kräfte.

Die Griechen glaubten, in dem himmlischen Zucken entlade sich der Zorn des Göttervaters Zeus. Bei den Germanen schlug Thor mit seinem Hammer Mjölnir die Funken, während sein Wagen donnernd über die Wolken fuhr. Und in der chinesischen Mythologie war gleich ein ganzes Gremium aus fünf himmlischen Würdenträgern für die Gewitter verantwortlich – den Vorsitz hatte Donnergott Lei Tsu.



Bei einem Gewitter, hier über Provincetown, Massachusetts, baut sich Spannung zwischen Wolken und Erde auf. Ist sie groß genug, bricht der Widerstand der Luft – sie wird elektrisch leitend. Strom rast durch den dabei entstehenden, zunächst unsichtbaren Kanal und erhitzt ihn schlagartig: Ein Blitz leuchtet auf

Bis in die Neuzeit hinein versuchten die Menschen in Europa, ein Gewitter etwa durch Glockenläuten zu vertreiben – doch es half nichts.

Im Gegenteil: Weil Blitze besonders häufig in Kirchtürme einschlugen, wurden dabei oft auch die Glöckner zum Opfer. So klagte 1784 beispielsweise der bayerische Astronom Johann Nepomuck Fischer, das „leidige Wettergeklingel“ habe im Verlauf von 33 Jahren 103 Menschen das Leben gekostet.

Viele Bauwerke traf es gleich mehrmals. So wurde der fast 100 Meter hohe Markusturm in Venedig zwischen 1388 und 1766 mindestens neunmal durch Blitzschlag beschädigt oder zerstört. Dann ließen die Domherren einen Blitzableiter installieren – und seither ist das Wahrzeichen von der Wettergewalt verschont geblieben.





Erst diese 1752 von dem US-Amerikaner Benjamin Franklin erfundene Vorrichtung brachte einen wirkamen Schutz: Dabei leitet ein Metallstab auf dem Dach einen einschlagenden Blitz direkt in den Erdgrund – und bewahrt so Gebäude und Bewohner vor größerem Schaden.

**TROTZ SOLCHER VORSICHTSMASSNAHMEN** richten Blitze noch immer Zerstörungen an. Sie können Kommunikationsnetze unterbrechen und verursachen etwa in den USA jeden dritten Stromausfall.

Manchmal setzen sie auch empfindliche Elektronik außer Kraft – beispielsweise in Fabriken oder Kraftwerken, wo solche Ausfälle im schlimmsten Fall katastrophale Auswirkungen haben.

Nicht immer bleibt es bei Sachschäden. Obwohl heute deutlich weniger Menschen im Freien arbeiten als noch vor wenigen Jahrzehnten – und vom Blitz Getroffene oft schnell genug medizinisch versorgt werden –, sterben jedes Jahr zwischen vier und zehn Menschen in Deutschland am Blitzschlag. Weltweit fordert das Himmelsphänomen mehrere Tausend Todesopfer pro Jahr, schätzen Experten.

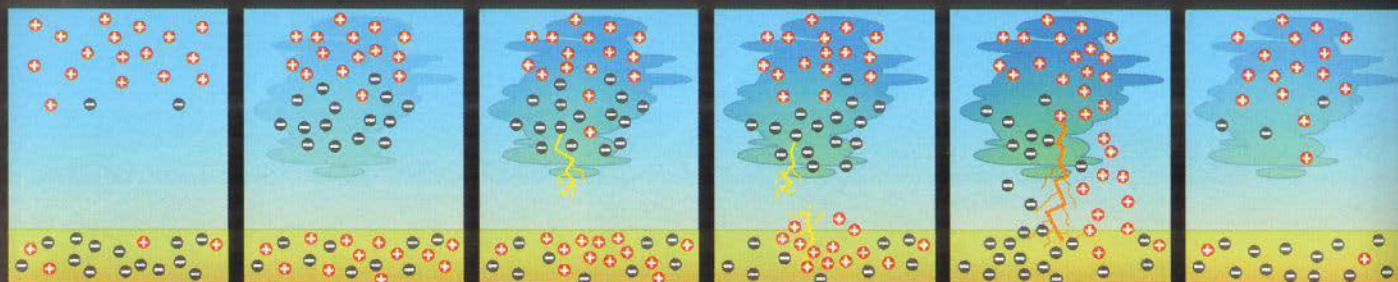
Vom Blitz Getroffene können eine Vielzahl von Verletzungen erleiden. Ist der Strom stark genug, überbrückt er den Körper und fließt an dessen Oberfläche entlang in die Erde. Er versengt die Kleidung, lässt Metallschmuck schmelzen, reißt Schuhe und Socken von den Füßen.

Manchmal wird das Opfer meterweit durch die Luft geschleudert, ist vorübergehend taub, blind oder gelähmt. Doch schwere Verbrennungen der Haut sind selten.



# Tanz der elektrisierten Teilchen

Blitze entstehen, wenn sich zwischen Himmel und Erde starke Ladungsunterschiede aufbauen



1. Die im All herrschende kosmische Strahlung erzeugt elektrisch geladene Atome (Ionen). In einem „Schönwetterfeld“ konzentrieren sich positive Ionen oben in der Atmosphäre, negative an der Erdoberfläche.

2. In einer Gewitterwolke wehen positiv geladene Eiskristalle nach oben, negative Wasserteilchen sinken nach unten. Weil sich an der Wolkenunterseite negative Ladungen sammeln, ziehen sie positive im Boden an.

3. Die Spannung zwischen Wolke und Boden steigt; überschreitet sie ein gewisses Maß, kommt es zum Ausgleich. Dazu bewegt sich ein unsichtbarer, negativer „Leitblitz“ aus der Wolke in Richtung Boden.

4. Kurz vor dem Boden reckt sich dem negativ geladenen Leitblitz eine positive „Fangentladung“ entgegen (siehe auch Kasten Seite 111). Meist geht sie von erhöhten Orten aus, etwa einem Kirchturm oder Hausdach.

5. Berühren sich Leitblitz und Fangentladung, kommt es zum „Hauptblitz“. Dabei fließt ein starker Strom, der die Luft auf bis zu 30 000 Grad aufheizt und dabei einen hellen Lichtschein sowie den Donner erzeugt.

6. Nachdem der Blitz die Ladungen ausgeglichen hat, herrschen wieder ähnliche Verhältnisse wie beim „Schönwetterfeld“.

Während der größte Teil des Stroms dabei außen am Körper entlangfließt, läuft ein geringerer Teil durch ihn hindurch. Dieser schwächere Strom ist noch immer sehr gefährlich: Er kann zu Herzstillstand oder schweren Gehirnschäden wie einer Lähmung des Atemzentrums führen – und dadurch oft auch zum Exitus.

Selbst über mehrere Meter Distanz vermag ein Blitz noch zu töten: etwa durch einen zur Seite zuckenden Lichtbogen.

Auch durch den Boden fließt direkt nach dem Einschlag ein starker Strom nach allen Seiten. Stehen Menschen in Schrittstellung in der Nähe, kann sich zwischen ihren Füßen eine Spannung aufbauen, die einen gefähr-

## Blitze werden bis zu 30 000 Grad heiß – fünfmal so heiß wie die Sonnenoberfläche

lichen Stromfluss im Körper nach sich zieht – so können durch einen einzigen Blitz mehrere Personen ums Leben kommen. Um sich bei einem Gewitter im Freien zu schützen, sollte man sich deshalb niederhocken und dabei die Füße eng nebeneinander stellen.

Der Gefahr ganz auszuweichen ist dagegen schwer – denn in vielen Regionen der Erde blitzt es häufig. Bis zu 100 Lichtfunken durchzucken pro Sekunde die Atmosphäre. Besonders oft schlagen sie in Zentralafrika ein.

Über Deutschland leuchten jährlich immerhin noch mehr als eine Million Blitze auf. Dagegen bleiben manche Inselgruppen und die Polarregionen weitgehend verschont.

Rund drei Viertel all dieser Lichterscheinungen erreichen ohnehin nicht den Boden, sondern entladen sich in den Wolken. Und solche Energieausbrüche beschränken sich nicht nur auf die niederen Atmosphärenschichten: Auch in großer Höhe gibt es Blitze, wie Forscher erstmals 1989 auf Videoaufnahmen nachweisen konnten.

Einige davon sehen aus wie blaue Lichtfontänen, andere wie rote Riesebäume. Wieder andere erscheinen als Leuchtringe und erreichen mehr als 500 Kilometer Durchmesser. Manche der gigantischen Ausbrüche können von der Wolkenoberseite bis zu 70 Kilometer hoch in die Atmosphäre emporwachsen.

Die elektrischen Funken sind keine Eigenart der Erde: Sie zucken auch auf anderen Planeten des Sonnensystems. In der Gashölle des Saturn, wo regelmäßig schwere Stürme wüten, erreichen sie sogar eine 10 000-mal höhere Energie als auf der Erde.

Dabei entfalten bereits irdische Blitze eine enorme Wirkung: In einer Drittelsekunde setzen sie bis zu zehn Milliarden Joule frei – das entspricht etwa der Energie, die ein Zweipersonenhaushalt im Jahr verbraucht. Sie erhitzen die Luft auf rund 30 000 Grad, fünfmal so heiß wie die Sonnenoberfläche. Schlagen sie in Sand ein, schmilzt dieser und wird zu Glas. Solche röhrenförmigen Blitzspuren haben sich zum Beispiel in der Sahara erhalten.

**DOCH DIE GEWALT** hat auch ihr Gutes. Blitze krachten wohl schon in die Erde, als es noch gar keine Lebewesen



gab – und vielleicht hätte es sie ohne die elektrischen Entladungen auch nie gegeben. Denn Blitze könnten zur Entstehung jener Moleküle beigetragen haben, aus denen sich später erste Organismen entwickelten.

Manche Forscher gehen davon aus, dass die Bausteine solcher chemischer Verbindungen erstmals in den Aschewolken von Vulkanen entstanden: Weil die Partikel darin elektrisch geladen sind, entladen sich in solchen Wolken auch heute noch häufig Blitze; damals könnten sie die Vulkangase so erhitzt haben, dass sich Bestandteile späterer organischer Moleküle bildeten.

Auch in der Zeit danach haben Blitzeinschläge womöglich die Evolution vorangetrieben. In Versuchen haben Forscher Bakterien mit künstlichen Blitzen traktiert: Ein solcher Energieschub machte die Hülle der Mikroben durchlässig und half ihnen, genetisches Material aus ihrer Umgebung aufzunehmen. Womöglich haben sich auch die ersten Organismen auf diese Weise weiterentwickelt.

Zudem spielen die Riesenfunkeln bis heute eine wichtige Rolle in der Natur. In ursprünglichen Wäldern entzündeten sie regelmäßig Brände, die lediglich das Unterholz aufzehren und Nährboden sowie Platz für neue Pflanzengenerationen hinterlassen.

So konnten die spektakulären Riesenmammutbäume in Kalifornien vermutlich nur deshalb heranwachsen,

weil ihre Samen vor Jahrhunderten in der Asche eines Waldbrandes aufkeimten.

Auch die Zusammensetzung der Atmosphäre wird von Blitzen beeinflusst. Wegen ihrer großen Hitze können sie Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle in der Luft aufbrechen – aus ihnen entstehen Stickoxide. Die dienen zum einen den Pflanzen als wichtiger Nährstoff zum Wachsen. Zum anderen aber könnten die Stickoxide, wenn ihre Konzentration durch weltweit steigende Temperaturen und damit auch häufigere Gewitter zunehmen sollte, auf bislang kaum bekannte Weise die Konzentration von Treibhausgasen verändern – und so das Klima.

**T**ROTZ IHRER BEDEUTUNG für das Leben sind Blitze noch immer rätselhafte Erscheinungen: Auch nach Jahrhunderten der Forschung ist nicht einmal genau geklärt, wie sie entstehen.

Nach der bislang vorherrschenden Theorie kommt es zu dem Naturphänomen, weil in Gewitterwolken verschieden schwere Partikel durcheinanderwirbeln und sich dabei elektrisch aufladen.

In oberen Wolkenbereichen bilden sich zunächst Graupeln, indem immer mehr unterkühlte Wassertröpfchen an Eiskpartikeln anfrieren. Werden die Körner zu schwer, beginnen sie als Niederschlag durch einen Schleier aus schwebenden Eiskristallen herabzusinken.

Stoßen diese Teilchen nun zusammen, kommt es häufig zu einem Austausch von Elektronen.

Die leichteren, im Aufwind nach oben treibenden Eiskristalle werden dabei meist positiv aufgeladen, die schwereren Graupeln dagegen negativ. Sie fallen weiter nach unten und transportieren Ladung in tiefere Wolken-schichten: Die laden sich dadurch stark negativ auf.

Weil sich gleiche elektrische Ladungen aber abstoßen, werden zur selben Zeit im Erdboden freie Elektronen verdrängt; dort entsteht deshalb eine zu den tieferen Wolkenschichten entgegengesetzte positive Ladung.

Kurz gesagt: Zwischen den beiden elektrischen Polen – dem Grund und der negativ geladenen Unterseite der Wolke – baut sich eine Spannung auf (siehe Illustration links).

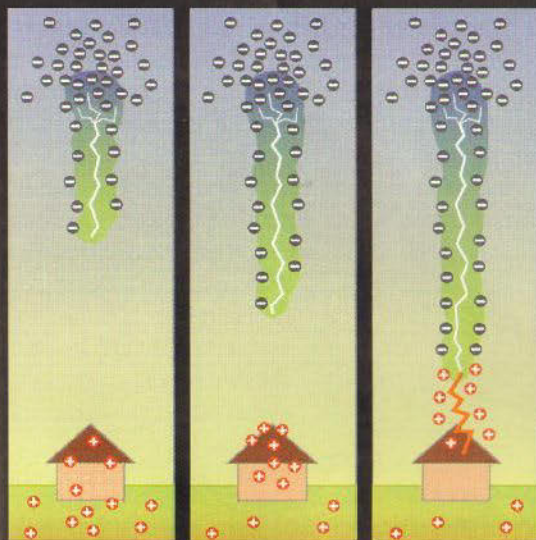
Normalerweise verhindert die Luft den Ladungsaustausch. Doch wenn die Spannung zu stark wird, bricht ihr Widerstand zusammen. Dann werden Elektronen aus den Molekülen der Luft herausgeschlagen: Sie wird elektrisch leitend.

In einer solchen Gasse aus ionisierter Luft bahnt sich negative Ladung aus der Wolke einen Weg nach unten.

Dieser zunächst noch unsichtbare Kanal, der „Leitblitz“, pflanzt sich in Richtung Erde fort – oft im Zickzack und mit mehreren Verästelungen. Vom Boden, insbesondere von Bäumen, Türmen oder anderen Erhöhungen, züngeln ihm ähnliche Ladungskanäle (Fangentladung) entgegen, mit denen er sich zusammenschließen kann: Deshalb trifft der Blitz solche Objekte besonders häufig.

## Kanal am Himmel

Wie sich ein Blitz aufbaut



Kurz bevor es zum Blitz kommt, wird die Luft elektrisch leitend. Aus der negativ geladenen Wolkenunterseite bahnt sich der Kanal des Leitblitzes (blau-grün) in Richtung Boden. Umgekehrt wächst ihm eine positive Fangentladung entgegen. Wenn sich beide vereinigen, kommt es zum Hauptblitz. Es fließt ein starker elektrischer Strom, die Ladungen werden ausgeglichen



Sobald zwischen Wolke und Grund eine durchgehende Verbindung hergestellt ist, kommt es zu einer Art Kurzschluss: Durch die nur etwa einen Zentimeter breite, vom Leitblitz geschaffene Bahn (den „Blitzkanal“) fließt plötzlich ein starker elektrischer Strom.

Die schlagartig erhitzte Luft strahlt dabei Licht ab – das Ergebnis ist der grelle Hauptblitz. Zugleich dehnt sie sich explosionsartig aus: So entsteht der Donner. Weil sich der Schall langsamer fortpflanzt als das Licht, hört ein entfernter Beobachter dieses Grollen jedoch erst nach dem hellen Aufzucken. Mit jedem Kilometer Entfernung vom Blitz trifft der Donner etwa drei Sekunden später ein.

**D**OCH DIESES HERKÖMMLICHE Modell der Blitzentstehung hat einen Makel: Die bislang in Gewitterwolken gemessenen elektrischen Felder sind eigentlich nicht stark genug, um eine Entladung auszulösen.

Manche Forscher glauben deshalb, dass der Ursprung der Blitze in weitaus höheren Regionen liegt als bisher angenommen: an der Grenze zum Weltall. Dort prallen ständig enorm energiereiche (etwa bei Sternexplosionen

## Möglicherweise liegt der Ursprung von Blitzen in den Tiefen des Weltalls

entstandene) kosmische Partikel auf die Erdatmosphäre, in der sie einen Schauer aus schnellen Elektronen erzeugen.

Gerät eines dieser Elektronen nun in eine elektrisch geladene Gewitterwolke, kann es darin zusätzlich beschleunigt werden – und bei der Kollision mit Luftmolekülen immer weitere Elektronen freisetzen, die wiederum vom elektrischen Feld der Wolke beschleunigt werden. Eine solche Teilchenkaskade könnte schließlich einen Blitzkanal von der Wolkenunterseite bis zum Boden bahnen, durch den sich die Gewitterwolke in Form des eigentlichen Blitzes entlädt.

Die entfesselten Elektronen würden dabei so schnell auf die Erde herunterrasen, dass beim Zusammenstoß mit Luftmolekülen energiereiche Röntgenstrahlung entsteht.

Und tatsächlich: Im besonders häufig von Gewittern heimgesuchten US-Bundesstaat Florida haben Blitzforscher bei Beobachtungen des Himmelsphänomens diese Röntgenstrahlung gemessen – ein möglicher Hinweis darauf, dass Blitze wirklich durch Partikel aus den Tiefen des Alls angestoßen werden.

Dieser Nachweis gelang den Forschern in Florida an Entladungen, die sie zum Teil selbst ausgelöst hatten. Solche künstlichen Blitze erzeugen die Wissenschaftler auf spektakuläre Weise: Sie lassen bei Gewitter ferngesteuert eine Rakete aufsteigen, die über einen Metalldraht mit ihrem Abschussturm verbunden ist.

In rund 700 Meter Höhe stellt das Geschoss über den Draht eine elektrische Verbindung zwischen Grund und Wolken her – fast so wie der natürliche Leitblitz. Auf diese Weise entlädt sich entlang des vom Draht vorgezeichneten Weges ein Blitz, der dann meist in den Turm einschlägt und aus nächster Nähe von Detektoren erfasst wird.

Ein ähnliches Phänomen kann bei großen Raketen freilich auch ganz ohne Draht auftreten – und völlig unbeabsichtigt. So geschah es am 14. November 1969.

Als an jenem Tag die Apollo-12-Mission zum Mond starten sollte, zogen Regenwolken über das Kennedy Space Center in Florida. Weil aber in den sechs Stunden zuvor kein Blitz beobachtet worden war, hob die Rakete planmäßig um 11.22 Uhr ab.

Nach 36 Sekunden, in einer Höhe von zwei Kilometern, bemerkte Charles Conrad, einer der drei Astronauten in der Kommandokapsel, ein weißes Licht: Die aufsteigende Rakete hatte einen Blitz ausgelöst, der erst am Raumfahrzeug, dann an den heißen und elektrisch leitenden Abgasen entlang zu Boden schoss. Schaulustige sahen ein helles Zucken in der Nähe der Abschussrampe.

In der Kommandokapsel schrillte der Hauptalarm, Warnlampen blinkten. Weil der Blitz die Apollo-Elektrik überlastete, brachen vorübergehend die Stromversorgung und die Kommunikation mit der Bodenkontrolle zusammen. Wenige Sekunden später fielen nach einem weiteren Blitzschlag auch Teile des Navigationssystems aus.

Im Kontrollzentrum erwog man, die Kapsel mit den Astronauten von der Rakete abzutrennen und notlanden zu lassen. Doch schließlich gelang es, die wichtigsten technischen Systeme wiederherzustellen.

Die Astronauten erreichten sicher den Mond und kehrten später wohlbehalten zur Erde zurück.

Immerhin: Die Beinahe-Katastrophe zwang die US-Raumfahrtbehörde NASA, die Wetterbedingungen für die Startfreigabe zu überdenken.

Bis heute dürfen Spaceshuttles nicht abheben, wenn sie ihre Flugbahn näher als neun Kilometer an verdächtig erscheinende Wolken heranführen würde. □

### MEMO | BLITZE

» **DIE SPANNUNG** zwischen einer Wolke und dem Erdboden kann sich als Blitz entladen.

» **ZUNÄCHST WIRD DIE LUFT** elektrisch leitend, und dann fließt Strom.

» **DABEI ERHITZT SICH** die Luft und strahlt Licht ab.

» **JEDE SEKUNDE** zucken bis zu 100 Blitze durch die Atmosphäre.

**Martin Paetsch**, 38, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

**Literatur:** Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, „Lightning. Physics and Effects“, Cambridge University Press.





**Gratis!**

### 3-teiliges Reisetaschen-Set

Elegant und durchdacht: Trolley und Reisetasche sind faltbar und platzsparend verstaubar. Aus Nylon.  
Maße: Reisetasche ca. 46x29x32 cm, Rucksack ca. 34x41x15 cm, Trolley ca. 36x52x18 cm.

## GEO Familien-Vorteilscoupon

☒ Ja, ich bestelle die unten angekreuzten Zeitschriften und nutze alle meine Vorteile:

- Ich spare bis zu 14%!
- 3-teiliges Reisetaschen-Set gratis!
- Lieferung frei Haus!
- Nach 1 Jahr jederzeit kündbar!
- Geld-zurück-Garantie für zu viel bezahlte Hefte!

Ja, ich bestelle die angekreuzten Zeitschriften. Zum Dank für meine Bestellung erhalte ich das 3-teilige Reisetaschen-Set nach Zahlungseingang gratis. Die Lieferung aller Hefte erfolgt frei Haus. Ich gehe kein Risiko ein, denn ich kann nach einem Jahr jederzeit kündigen. Das Geld für bezahlte, aber nicht gelieferte Ausgaben erhalte ich zurück. Das Angebot gilt nur in Deutschland.

GEO kompakt (4 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645245, als Geschenk ☐ 645246  
Erscheint 4 x jährlich zum Preis von zzt. € 7,25 pro Heft.

GEO (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645233, als Geschenk ☐ 645234  
Erscheint 12 x jährlich zum Preis von zzt. € 5,65 pro Heft.

GEO Special (6 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645239, als Geschenk ☐ 645240  
Erscheint 6 x jährlich zum Preis von zzt. € 6,95 pro Heft.

GEO EPOCHE (6 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645235, als Geschenk ☐ 645236  
Erscheint 6 x jährlich zum Preis von zzt. € 7,50 pro Heft.  
GEO EPOCHE mit DVD für mich, Best.-Nr. ☐ 645237, als Geschenk ☐ 645238  
Erscheint 6 x jährlich zum Preis von zzt. € 13,30 pro Heft.

GEO SAISON (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645241, als Geschenk ☐ 645242  
Erscheint 12 x jährlich zum Preis von zzt. € 4,40 pro Heft.

GEO lino (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 645243, als Geschenk ☐ 645244  
Erscheint 12 x jährlich zum Preis von zzt. € 3,05 pro Heft.

Die Preise gelten in Deutschland. Auslandspreise auf Anfrage.

Meine Adresse: (Bitte auf jeden Fall ausfüllen.)

Name, Vorname \_\_\_\_\_ 19  
Straße/Nr. \_\_\_\_\_ Geburtsdatum \_\_\_\_\_  
PLZ \_\_\_\_\_ Wohnort \_\_\_\_\_  
Telefon-Nr. \_\_\_\_\_ E-Mail-Adresse \_\_\_\_\_  
Ich zahle bequem per Bankeinzug  
Bankleitzahl \_\_\_\_\_ Kontonummer \_\_\_\_\_

Anschrift des Geschenkempfängers: (Nur ausfüllen, wenn Sie einen GEO Titel verschenken möchten.)

Name, Vorname \_\_\_\_\_ 19  
Straße/Nr. \_\_\_\_\_ Geburtsdatum \_\_\_\_\_  
PLZ \_\_\_\_\_ Wohnort \_\_\_\_\_  
Dauer der Geschenklieferung:  
☐ unbefristet (mindestens 1 Jahr) ☐ 1 Jahr

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner+Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung bei GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_

GEO Familien-Vorteilscoupon einsenden an:  
GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg

Oder anrufen unter: 01805/861 80 00\*

Einfach per E-Mail: [Geokompakt-Service@guj.de](mailto:Geokompakt-Service@guj.de)

Verlag: Gruner+Jahr AG & Co KG, Dr. Gerd Brüne, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, AG Hamburg, HRA 102257. Vertrieb: DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH, Dr. Olaf Conrad, Düsternstr. 1, 20355 Hamburg, AG Hamburg, HRB 95 752.

\* 14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz. Mobilfunkpreise können abweichen.



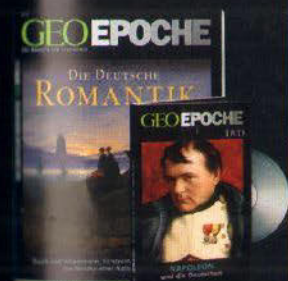
GEO kompakt ist monothematisch und widmet sich den großen Fragen der Allgemeinbildung in außergewöhnlicher visueller Opulenz. 4 x im Jahr.



GEO berichtet in exklusiven und aktuellen Reportagen über die wichtigen Themen unserer Zeit. 12 x im Jahr.



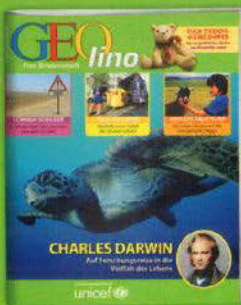
GEO Special berichtet jeweils über ein Land, eine Region oder eine Stadt. 6 x im Jahr.



GEO EPOCHE ist das Geschichtsmagazin von GEO. 6 x im Jahr.



GEO SAISON zeigt die schönsten Reiseziele rund um den Globus. 12 x im Jahr.

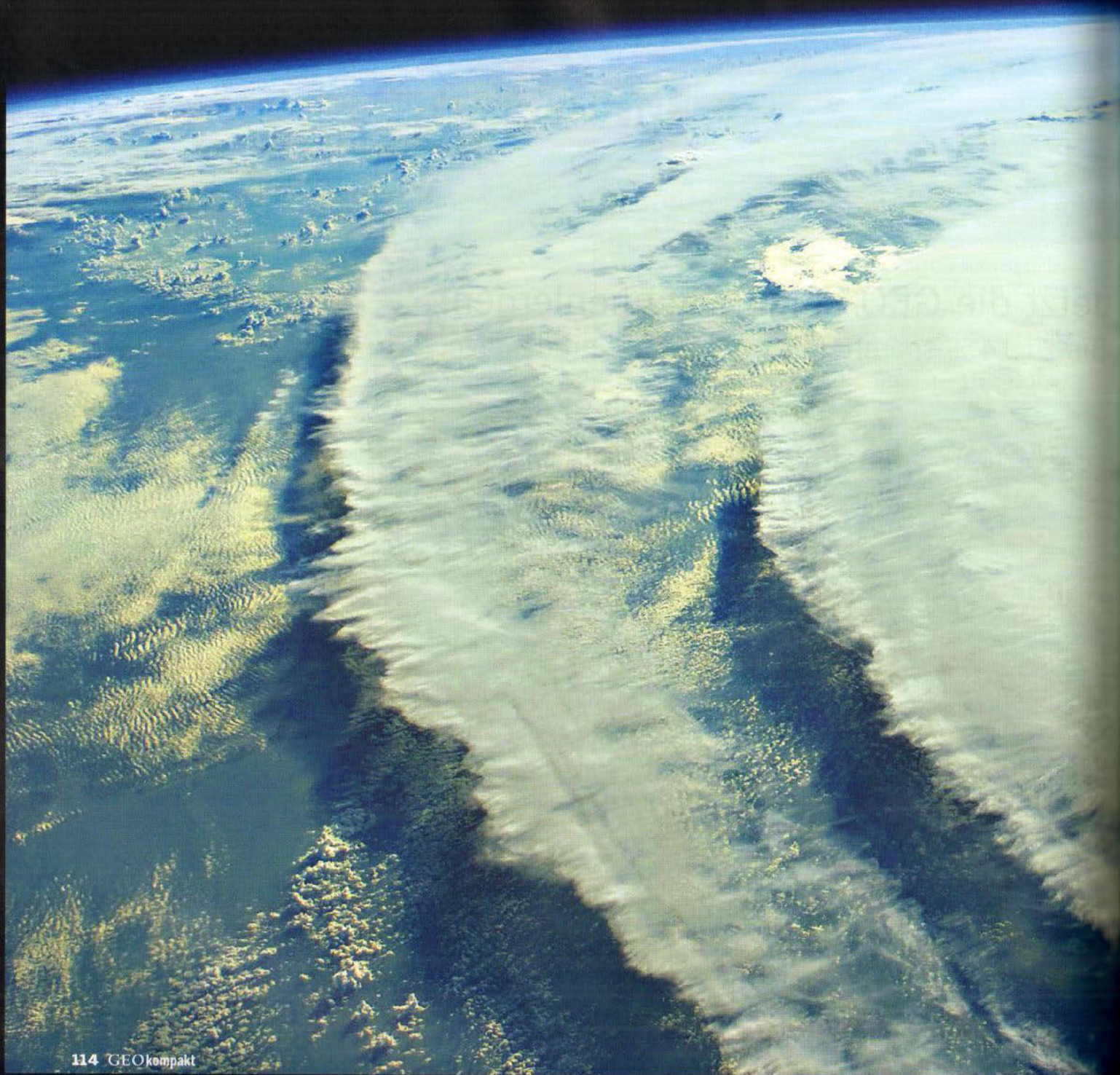


GEO lino ist das Erlebnisheft für Kinder von 8 bis 14 Jahren. 12 x im Jahr.




Wirbelsturm

# Im Sog der Wolkenturbine





Im September 2008 formiert sich über dem Atlantik einer der gewaltigsten Wirbelstürme seit Jahrzehnten: Hurrikan »Ike« peitscht haushohe Wogen auf, zerstört Dörfer und Städte auf Haiti, Kuba und in Texas, richtet einen Milliarden Schaden an. Nach wie vor rätseln Meteorologen über diese nahezu unkalkulierbaren Naturgewalten. Denn schon winzige Veränderungen von Temperatur und Luftdruck können einen Orkan auf einen neuen Kurs führen – oder ihn rasant anschwellen lassen

A satellite image showing the massive scale of Hurricane Ike as it moves over the Gulf of Mexico. The storm's eye is visible as a dark, circular center, surrounded by dense, swirling white and grey cloud bands that stretch across a large portion of the frame. The surrounding ocean surface appears in shades of blue and green, with some whitecaps visible near the storm's edge.

10. September 2008: Hurrikan »Ike« spannt seine Wolkenbänder über den Golf von Mexiko. Über dem tropischen Meer nimmt er neuen Wasserdampf auf und schwillt auf fast 1000 Kilometer Durchmesser an. In den USA warnen die Meteorologen nun vor einem gewaltigen Wirbelsturm



# M

Mächtige Wellen branden an die Strandmauer der Küstenstadt Galveston im Süden von Texas. Gischt schäumt auf und spritzt meterhoch an der Brüstung empor. Der Wasserpegel steigt erst um zwei, dann um mehr als drei Meter an. Wogen zerstören einen Pier und fluten die Düneninsel Galveston Island. Mattgraue Regenwolken schieben sich vor die Sonne. Wind weht vom Meer heran und biegt am Strand die Palmen. Langsam bemächtigt sich die Natur des mondänen Urlaubsorts am Golf von Mexiko.

Es ist der 12. September 2008, und weit draußen auf dem Meer formiert sich der Hurrikan „Ike“ zu einem der

gewaltigsten Wirbelstürme, die jemals Amerika heimgesucht haben. Seine Orkanwinde nehmen stetig Wasserdampf auf, vier Milliarden Tonnen an diesem Tag. Die Luft strömt wasserdampfgesättigt in das Sturmsystem, wirbelt in den Gewittertürmen empor, 17 Kilometer hoch bis in die obersten, eiskalten Gesschosse. Die Feuchtigkeit gibt sie dabei wieder ab: Die riesigen Spiralwolken schwellen an.

„Ikes“ Wolkenbänder spannen sich von Louisiana im Norden bis beinahe nach Yucatán im Süden – fast 1000 Kilometer weit. Den Golf von Mexiko verschatten sie weiträumig. Sein Auge weitet sich und misst von Ost nach West bereits 60 Kilometer. Seine Winde rasen mit 165 km/h, in Böen noch stärker, stündlich nehmen sie jetzt an Geschwindigkeit zu. Weit kreisen sie um das Zentrum herum, bis zu 195 Kilometer entfernt. Auf dem Meer peitschen die Stürme haushohe Wogen auf und schicken erste Wellen auf breiter Front gen Norden.

Ein Hurrikan dieser Größe entfaltet eine Windkraft, die einer Leistung von bis zu 3000 Gigawatt entspricht – damit ließen sich alle Haushalte und Industrieanlagen der Welt mit Strom versorgen. Auf seinem Pfad über die Bahamas und

Kuba hat „Ike“ mit dieser unbändigen Kraft weite Landstriche verwüstet.

Nun, da er fast die doppelten Ausmaße eines gewöhnlichen Wirbelsturms hat, nähert er sich der Küste der USA. Langsam bewegt sich „Ike“ vorwärts, mit 20 km/h, Kurs Westnordwest. Sein Zentrum rotiert jetzt 425 Kilometer südlich von Galveston.

Im National Hurricane Center in Miami, Florida, sind die Meteorologen beunruhigt. Nach ihren Prognosen könnte sich „Ike“ bis zum Anbruch der Nacht zu einem Hurrikan der Kategorie drei, vielleicht sogar vier auf der fünfstufigen Saffir-Simpson-Skala entwi-

## Über der Sahara

Der Vorläufer des Hurrikans entsteht: eine mächtige Gewitterwelle

ckeln (anhand der Windstärke werden Wirbelstürme einer Stufe dieser Skala zugeordnet; danach lässt sich etwa die mögliche Fluthöhe abschätzen).

Sie befürchten sechs, sieben Meter hohe Flutwellen, massiven Regen und Orkanwinde mit einer Geschwindigkeit von 175 km/h. Wie im Handstreich entwurzelt solch ein Wirbelsturm dann Bäume und bläst Strandvillen fort.

„Huracán“ nannten einst die Quiché-Maya den Gott des Himmels. Sie verehrten ihn als einen ihrer Schöpfer und fürchteten ihn als zornigen Herrscher, der über das Wasser hauchte und stets im Sommer und Herbst mächtige Stürme wie Sintfluten entfesselte. Seine Gewalt, das glaubten sie, habe bereits ihre Ahnen ausgelöscht. So ohnmächtig wie die Maya sehen sich von jeher die Menschen in der Karibik der allmächtigen Urgewalt der Hurrikans ausgeliefert.

20 Schiffe der spanischen Schatzflotte wurden 1502 von einem Wirbelsturm versenkt. Columbus hatte vergeblich vor der noch kaum bekannten Gefahr gewarnt.

Als ein Hurrikan 1609 die britische „Sea Venture“ beschädigte, rettete sich die Crew auf die Bermudas – und nahm kurzerhand die Inseln für die Krone in Besitz. 1780 tötete der gewaltigste Kari-



Landgang des Sturms: Hurrikan »Ike« erreicht Kubas Osten und wirft riesige Wellen gegen die Küstenlinie des Städtchens Baracoa. Sie türmen sich zu Gischtfontänen auf, die ein fünfstöckiges Gebäude überragen. Die Windgeschwindigkeiten erreichen 205 km/h

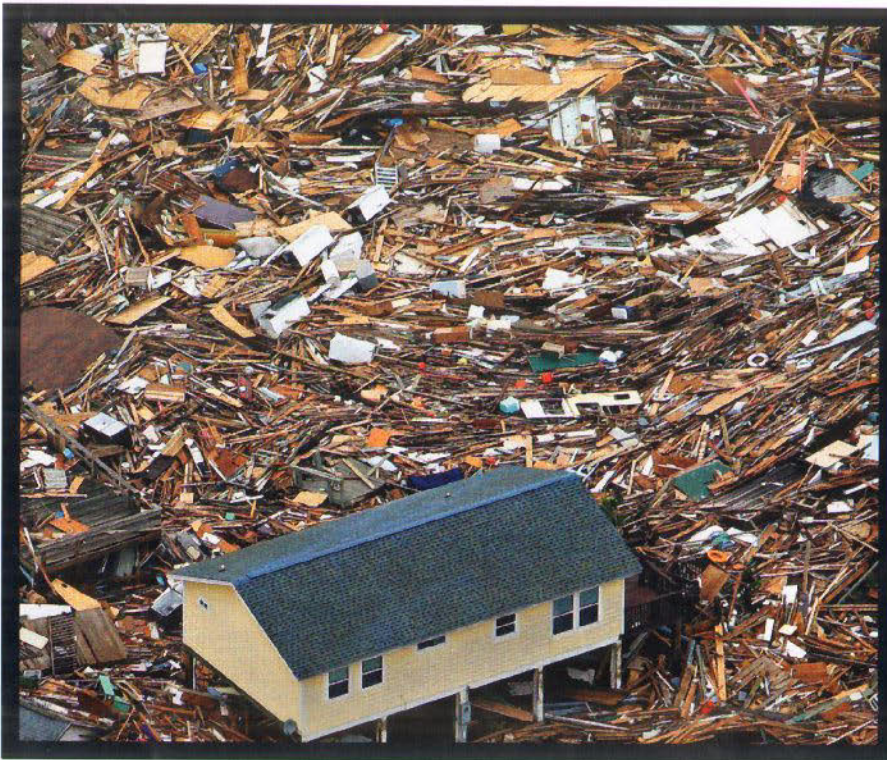




Es ist Spätsommer, in der Karibik hat die Hochsaison der Hurrikans begonnen: Gleich vier Wirbelstürme toben an diesem 2. September 2008 auf dem Atlantik und über Nordamerika. »Gustav« (o. l.) zieht über den Süden der USA – erst am Tag zuvor hat er Louisiana mit Spitzenwinden von fast 180 km/h erreicht. »Hannak« bewegt sich derweil im Bereich der Antillen und nähert sich auf breiter Front Kuba.

Und mitten über dem Atlantik wirbelt »Ike« heran. In seinem Zentrum beginnt sich bereits ein Auge zu bilden. Noch gilt »Ike« offiziell nur als Tropensturm; erst wenn seine Winde eine Geschwindigkeit von mindestens 119 km/h erreichen, ist er zum Hurrikan herangewachsen. Vor der Küste Afrikas ganz im Osten des Atlantiks formiert sich unterdessen »Josephine« zu einem Tropensturm





In einem Meer aus Brettern: Dieses Haus im texanischen Crystal Beach hat der Macht der Natur getrotzt. Hier und auf dem nicht weit entfernten Galveston Island entfalteten Wind und Wellen des Hurrikans am 13. September 2008 ihre volle Gewalt

biksturm der Neuzeit 22 000 Menschen auf den Antillen. Im Jahr 1900 verloren in Galveston mindestens 8000 Bürger durch die Macht des Windes ihr Leben und die Stadt ihren Rang als drittgrößte Hafenstadt an der US-Küste.

Die Geschichte eines jeden karibischen Hurrikans beginnt weit im Osten und oft sogar jenseits des Meeres – über der Wüste Nordafrikas.

**FRÜHSOMMER 2008, SAHARA,** etwa 12 000 Kilometer ost-südost von Texas. Mitten über der Wüste ist die Atmosphäre in Aufruhr: In allen Etagen herrscht ein stetes Auf und Ab der Luftmassen. Direkt über dem Boden wird die Luft zunächst von der Sonne aufgeheizt, so dass sie emporsteigt. In der Höhe senken sich hingegen kühlere Luftschichten ab, pressen auf die unteren und verwirbeln sich. Nach und nach breitet sich über der Sahara ein Gebiet hohen Drucks aus.

Im Westen Afrikas bläst in dieser Jahreszeit ein Monsun über dem Golf von Guinea. Er bringt Regen vom Atlantik und feuchte, kühlere Luft. Die Luftmas-

sen lasten hier insgesamt weniger stark auf der Erde als in der Sahara. Die Atmosphäre wiegt vergleichsweise weniger, der Luftdruck ist niedriger.

Deshalb können sich die Sahara-Luftmassen ausbreiten und in den relativ „leeren“ Luftraum im Westen des Kontinents strömen. Für die kommenden Monate bildet sich in der unteren Troposphäre, in etwa vier Kilometer Höhe, ein steter Luftstrom von Ost nach West, der „African Easterly Jet“.

An einem Tag im August herrscht dort wieder einmal Chaos: Der Strom gebiert eine Tiefdruckwelle von Gewitterwolken („Easterly Wave“). Sie rollt fortan im Jet mit. Solche Tiefdruckwellen spannen sich über Tausende Kilometer, aus anderen entstehen über dem Meer Hurrikans.

Wie häufig und wo genau sie sich bilden und weshalb in manchen Jahren häufiger als in anderen, wissen Meteorologen noch nicht.

Die Gewitterwelle, aus der einmal „Ike“ erwachsen wird, verlässt am 19. August den Sudan – in knapp dreieinhalb

Wochen wird sie als ein mächtiger Hurrikan vor der Küstenstadt Galveston aufziehen. Vorerst aber strömt sie unauffällig im Jet westwärts in die feuchteren Gefilde vor Westafrika. Tagelang zieht sie über Nigeria, Mali und Senegal. Endlich, am 28. August, gleitet sie über den Atlantik, folgt den Passatwinden und strömt an den Kapverden vorbei.

Die Sonne heizt das Meer in diesen Monaten mit ihrer Energie mächtig auf. Nach Westen hin ist der Ozean wärmer. Mehr Wasserdampf steigt auf und strömt in die Gewitterwelle hinauf. In den höheren, kälteren Luftschichten kondensiert er und setzt dabei Wärme frei, die erneut für Auftrieb sorgt.

Die Luft strebt daher noch schneller empor und übt einen Sog aus, der den Luftdruck an der Meeresoberfläche fallen lässt. Bald donnert, blitzt und regnet es vermehrt.

Nach und nach bildet sich so aus der Tiefdruckwelle über dem Atlantik ein Tiefdruckgebiet, das die Meteorologen zunächst „Nine“ („Neun“) nennen. In ihm nimmt der Luftdruck von außen zum Zentrum hin stetig ab. Die Winde werden in diesen Breiten aufgrund der Erddrehung abgelenkt (Coriolis-Effekt), und zwar auf der Nordhalbkugel grundsätzlich nach rechts. Als Folge rotieren Tiefdruckgebiete im Norden immer entgegen dem Uhrzeigersinn. In den unteren Luftschichten werden die Winde dabei in das Tief hineingelenkt und beginnen, die Wolkenbänder wie um eine riesige Spule zu wickeln.

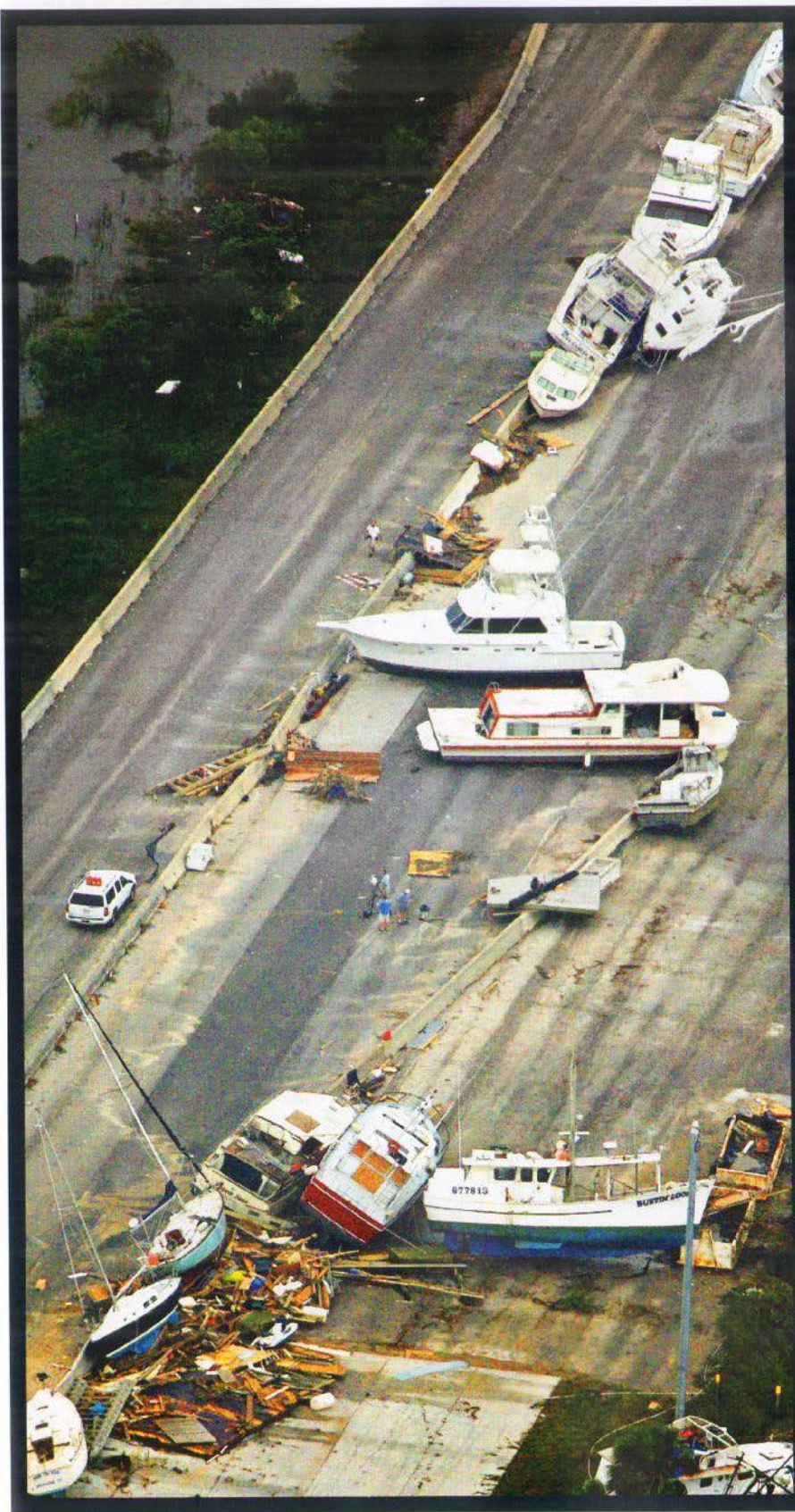
Noch aber mangelt es dem Tiefdruckgebiet an Kraft und Kontur.

## Auf dem Atlantik

Wie ein Kreisel bewegt sich »Ike« im leichten Zickzack vorwärts

„Nine“ strömt über stetig wärmeres Meer; die magische Temperaturgrenze rückt näher. Sobald das Wasser 26,5 Grad Celsius misst, verdunstet so viel Wasser, dass sich ein Tief unter günstigen Bedingungen zu einem Wirbelsturm auswachsen kann.





Boote auf dem Highway Interstate 45 im Süden von Texas nach dem Angriff von »Ike«. Meereswellen und Orkanwinde haben hier und in Louisiana Hunderte Kilometer Landschaft verwüstet, ganze Orte vernichtet und teilweise sogar die Küstenlinie verändert

Im National Hurricane Center sind die Meteorologen gewarnt. Die Saison erreicht im Frühherbst ihren Gipfel: Der Wirbelsturm „Gustav“ tobt bereits über dem Golf von Mexiko, „Hanna“ nähert sich den Antillen, „Josephine“ formiert sich langsam zum Tropensturm, und „Fay“ verlor sich erst vor Tagen über Tennessee. Bald könnte sich auch „Nine“ zum Sturm entwickeln.

In Miami studieren sie fortan die Aufnahmen der Satelliten genau. Alle sechs Stunden notieren sie Ort, Kurs, Windstärke, Kerndruck.

**1. SEPTEMBER, 17,7° NORD, 40,6° WEST,** 2250 Kilometer östlich der Antillen. Rasch konturieren sich im Tief die Wolkenbänder. Winde wehen mit 85 km/h. „Nine“ ist mittags zum Tropensturm – noch nicht zum Hurrikan – gewachsen; nach internationalen Konventionen wird er nun „Ike“ genannt.



Selbst Brücken aus Stahl und Beton können den Flutwellen eines Wirbelsturms oft nicht widerstehen

„Ike“ bewegt sich nach Westen auf 29 Grad Celsius warmes Wasser zu. Immer größere Mengen feuchtwarmer Luft sammeln sich über dem Meer. Stetig steigt die warme, leichtere Luft empor und kühlt sich dabei ab. Weil kühlere Luft aber weniger Feuchtigkeit halten kann, kondensiert nun der Dampf zu Wassertropfen: Wolken bilden sich, aus denen Regen fällt.


Doch zugleich wird genau jene Energie freigesetzt, mit der die Sonnenstrahlen das Wasser einst verdunsten ließen – als Wärme. Sie verleiht den Luftmassen weiteren Auftrieb.

Durch diesen Prozess wiegt der Tropensturm immer weniger; sein Druck







An aerial photograph showing the aftermath of a storm along a coastline. The land is heavily eroded, with large sections of the beach and dunes missing. Debris, including wooden planks, metal sheets, and other building materials, is scattered across the exposed earth and in the shallow water. A road runs parallel to the coast on the left side of the image. The water is calm, reflecting the overcast sky. The overall scene depicts significant destruction and environmental damage.

Die Stille nach dem Sturm: Nur wenige Häuser  
am Strand von Gilchrist an der texanischen Küste  
sind fast unbeschädigt geblieben. Zweieinhalb  
Meter hohe Wellen haben den Ort zermalmt und  
den Küstenstreifen zerfranst



## Wie ein Hurrikan entsteht

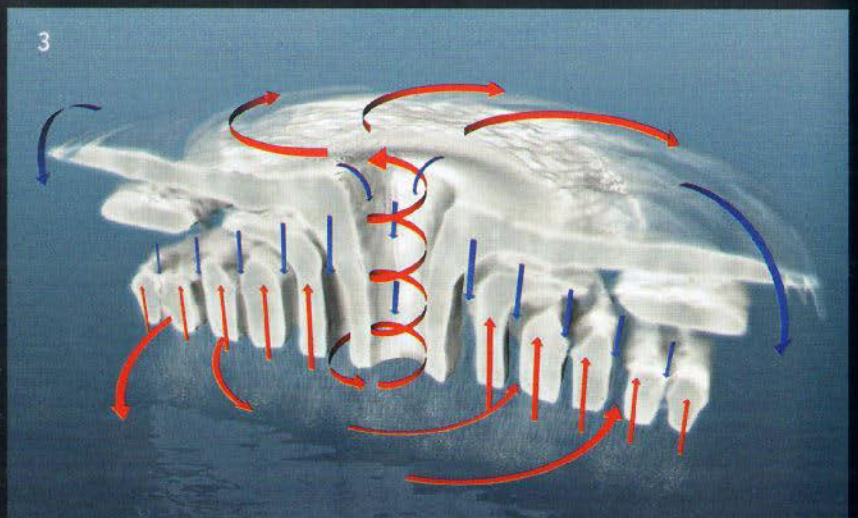
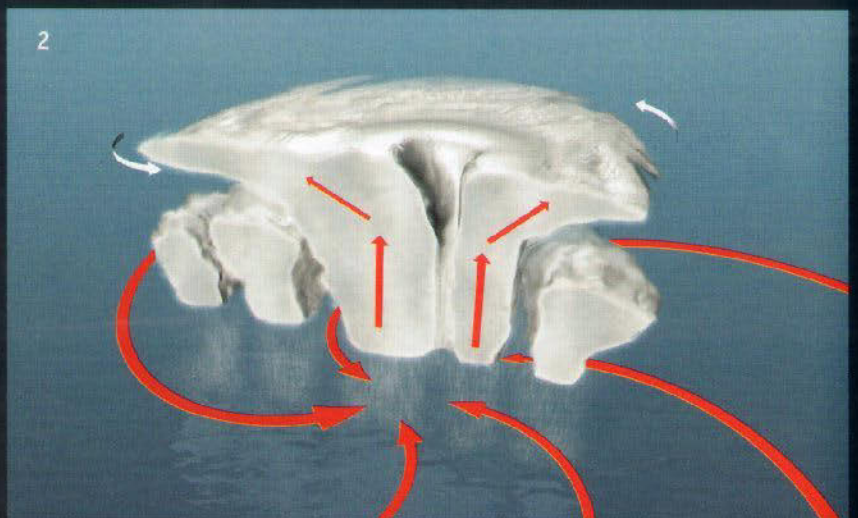
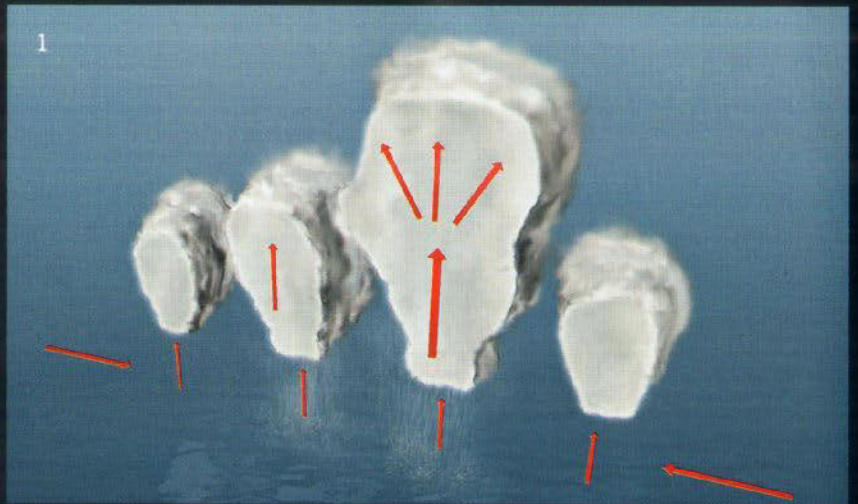
Wirbelstürme beziehen ihre Energie aus Wasserdampf, die Erdrotation versetzt sie in Drehung

**W**irbelstürme entwickeln sich alljährlich über den Weltmeeren. Wenn sich die tropischen Ozeane im Sommer und Herbst aufheizen, sammeln sich über den wärmsten Stellen gewaltige Mengen an Wasserdampf und steigen in die Atmosphäre auf (1). In der Höhe kühlen sie ab, kondensieren zu feinsten Wassertröpfchen und setzen wieder Wärmeenergie frei: Die Tröpfchen bilden riesige Gewitterwolken, aus denen es regnet; und die Wärme lässt die Wolken immer höher emporstreben (rote Pfeile).

Ein Sturmsystem bildet sich (2). Die aufsteigenden Luftmassen lassen den Luftdruck über der Meeresoberfläche fallen. Das Tiefdruckgebiet saugt stetig feucht-warme Luft in das Zentrum des Sturms, wo der Druck am niedrigsten ist. Das System schwillt großräumig an, der Sturm gewinnt an Kraft, und die Windgeschwindigkeiten steigen – ein sich selbst verstärkender Prozess. Der von der Erdrotation bewirkte Coriolis-Effekt lenkt die Luftmassen auf ihrem Weg spiralförmig ab (rote Pfeile); dieser Rotationseffekt ist nur dann stark genug für die Entstehung eines Hurrikans, wenn sich das Sturmtief mindestens fünf Breitengrade vom Äquator entfernt befindet. Das Wolkensystem beginnt, sich wie ein Kreisel zu drehen (weiße Pfeile).

Sobald in seinem Zentrum ein Auge entsteht – eine windstille, wolkenfreie Zone –, hat der Hurrikan seine typische Form angenommen (3). Umschlossen wird das Auge von einer Wolkenwand.

In der Stratosphäre (in ca. zwölf Kilometer Höhe) haben die Luftmassen fast ihre gesamte Feuchtigkeit abgegeben und können nicht weiter aufsteigen. Sie werden nun in das Auge, zwischen die Wolkenbänder oder zum Rand des Wirbelsturms gedrängt – und sinken wieder hinab zur Meeresoberfläche, wo sie neuen Wasserdampf aufnehmen können (blaue Pfeile). Erst wenn diese Energiezufuhr nachlässt, etwa beim Auftreffen auf Land oder beim Abdriften nach Norden, schwächt sich der Hurrikan wieder ab und löst sich schließlich auf.





auf das Meer gibt nach und „fällt“. Je tiefer er fällt, desto stärker strömt von außen neue Luft in das System. Die Wolken schwellen an, und Gewitter nehmen zu: Blitze heizen die Luft zusätzlich auf. Der Druck fällt weiter, und die Winde über der Meeresoberfläche wehen noch rasanter ins Zentrum.

Ein Kreislauf kommt in Gang, der sich selbst verstärkt: Der Sturm dreht sich schneller und schneller um seine Achse.

Unten saugt „Ike“ großflächig Luftmassen in sich hinein. Sie wehen im System empor, und oben angelangt strömen sie in alle Richtungen nach außen, immer gleichmäßiger. Irgendwann stoßen die Luftmassen an die Stratosphäre, die den Wirbelsturm wie mit einem Deckel abschließt. Die Luft zieht nun spiralförmig zum Rand des Systems, wo sie in die Tiefe gleitet – um unten erneut in den Sturm zu strömen.

„Ike“ dehnt sich aus. Sein Wolkensystem mutiert zu einer riesigen Struktur; die Sturmwinde rotieren 280 Kilometer weit um das Zentrum herum, während der Luftdruck über dem Meeresspiegel beständig fällt. Noch kann der Tropensturm nicht genug Feuchtigkeit schöpfen, um zum Hurrikan anzuwachsen. Die Luftmassen, die „Ike“ in diesen Stunden umgeben, sind zu trocken.

Der in dieser Region vorherrschende Wind treibt ihn in Richtung Westnordwest. „Ike“ bewegt sich dabei wie ein Kreisel im leichten Zickzack. Erst nach zwei Tagen geraten erneut feuchte Luftmassen von außen in seinen Sog. Große Mengen an Wärme und Wasserdampf treiben jetzt in das System – und der Sturm bläst kräftiger. Als die Winde



In den Straßen von Galveston, Texas, 15. September 2008: Ein Retter der US Air Force umarmt eine verzweifelte Anwohnerin. Der Sturm ist längst weitergezogen und hat dabei stetig an Kraft verloren, weil er auf dem Festland keinen Wasserdampf mehr aufnehmen kann

119 km/h erreichen, wird „Ike“ als Hurrikan eingestuft.

**3. SEPTEMBER**, etwa 2100 Kilometer östlich von Kuba. „Ikes“ Orkanwinde rotieren jetzt mit 130 km/h um das Zentrum. Der fünfte Hurrikan der Saison erreicht zunächst Kategorie eins auf der Saffir-Simpson-Skala.

Am Mittag eine neue Entwicklung: Im Zentrum, wo der Druck am tiefsten ist, formt sich eine fast windstille, wolkenfreie Zone – ein Auge im Tiefdruckwirbel, in dem die Luft absinkt und trocknet. Es wird von einem Ring aus Wolken voller Gewitterzellen umschlossen, der sogenannten Augenwand, in der es regnet und Winde aufwehen. Um sie herum winden sich Wolkenbänder.

Plötzlich, am Abend, steigert sich „Ike“ zu einem Hurrikan der Kategorie vier. Seine Stürme wehen mit 215 km/h, in Böen stärker. In wenigen Stunden hat er so schnell an Geschwindigkeit gewonnen wie kaum ein Wirbelsturm zuvor.

Solche rasanten Prozesse gelten als komplex: Gesichert ist, dass bei hohen, absoluten Wassertemperaturen mehr Feuchtigkeit aufsteigt. Je mehr sich zudem die Temperaturen in den oberen und unteren Luftschichten des Sturms

unterscheiden, desto schneller schießen neue Luftmassen empor. Schließlich gewinnt ein Hurrikan schneller an Kontur, wenn die Winde in allen Geschossen ähnlich stark in die gleiche Richtung wehen. All diese Faktoren scheinen bei „Ike“ in diesen Stunden zusammenzutreffen.

### In der Karibik

»Ikes« Stürme rasen mit 215 km/h – und bedrohen die Antillen

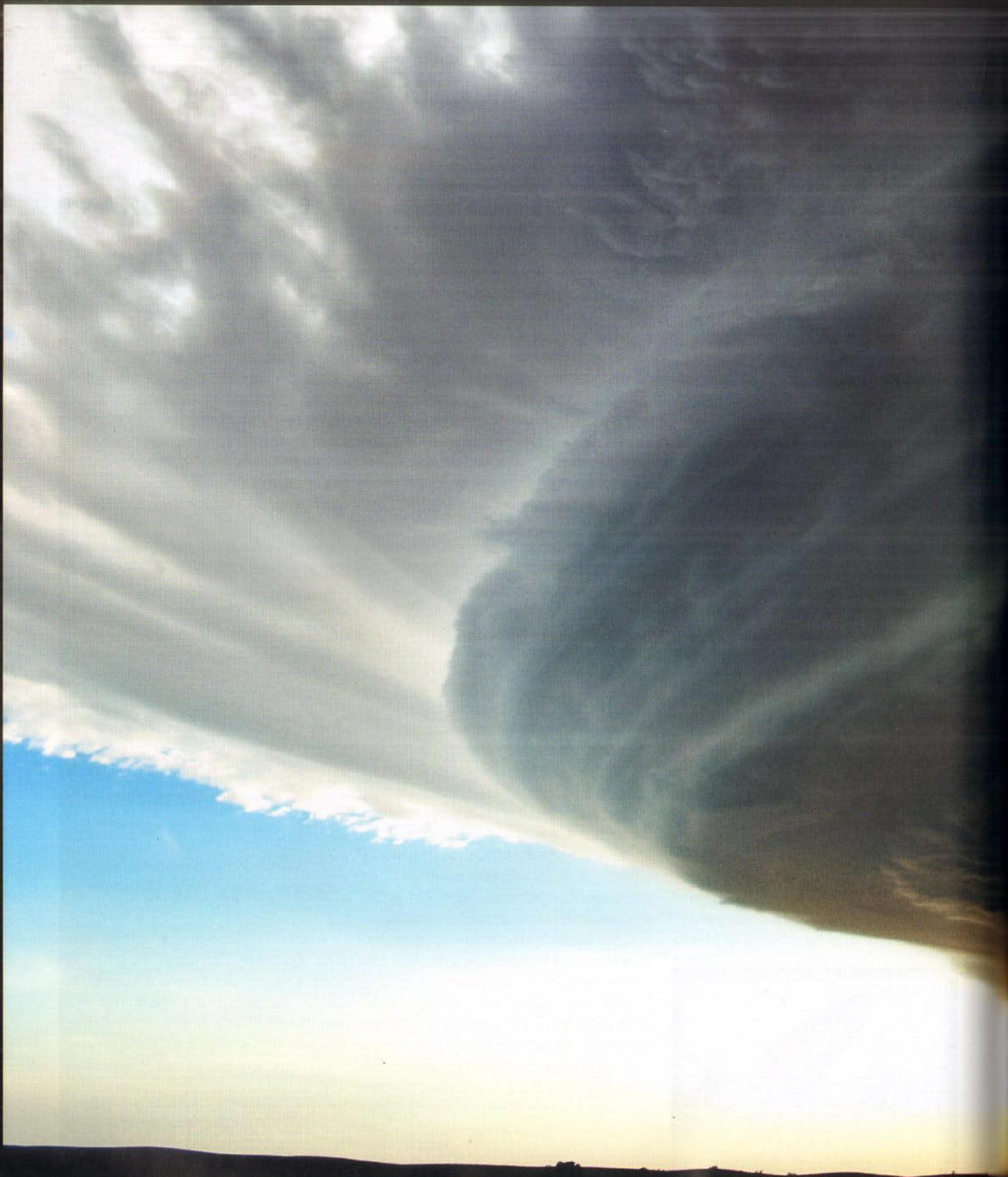
Noch bewegt sich der Wirbelsturm weit draußen über dem Ozean. Die Meteorologen des National Hurricane Center erfassen ihn bislang nur mit Satellitenbildern. Sie erkennen darauf wohl Wolkenstrukturen, Temperaturen und Niederschläge. Seinen Energiefluss aber müssen sie schätzen – noch wirbelt der Sturm außerhalb der Reichweite von Aufklärungsflugzeugen, die Messinstrumente wie etwa Sonden oder Radargeräte einsetzen können.

**5. SEPTEMBER, 23,7° NORD, 61,0° WEST**, rund 1400 Kilometer vor Kuba: „Ike“



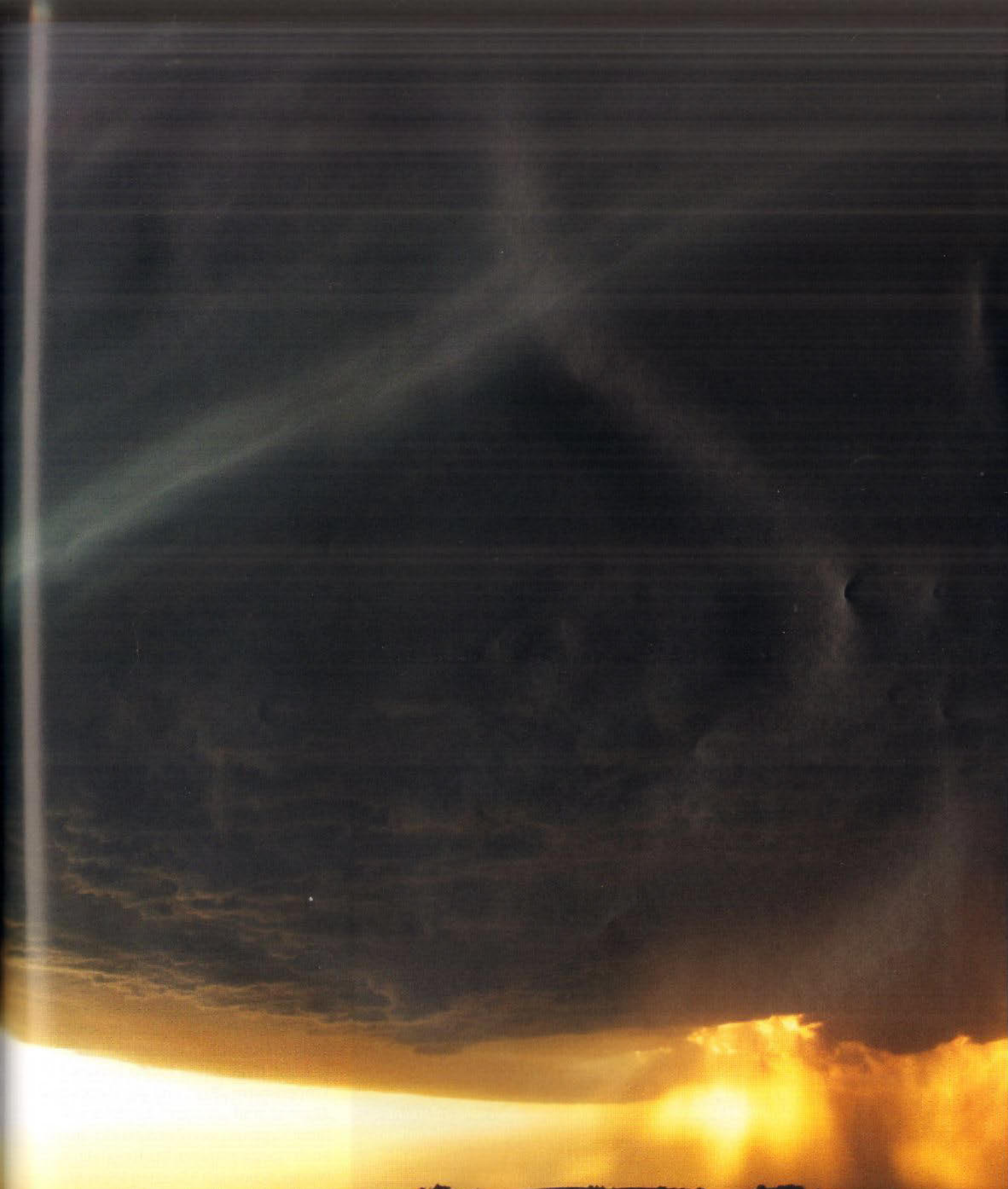
Das Vordach dieses Reifengeschäfts hat den Orkan nicht überstanden





Geburt eines Tornados: Diese seltene Superzelle – eine besonders gewaltige und gefährliche Gewitterwolke – zieht am 28. Mai 2004 über den US-Bundesstaat Nebraska. Aus solchen Gebilden können Tornados entstehen, extrem große Hagelkörner fallen und massive Winde wehen







treibt weiter auf Kurs West und verliert leicht an Geschwindigkeit. In Miami sendet das National Hurricane Center jetzt erste Warnungen aus: „Ike“ könnte binnen 24 Stunden die Turks- und Caicos-Inseln heimsuchen und bis zu vier Meter hohe Flutwellen aufpeitschen.

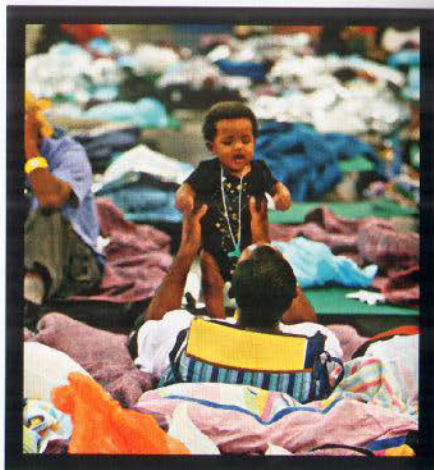
Was danach geschehen wird, darin widersprechen sich ihre zahlreichen Wettermodelle: Manche prognostizieren, dass „Ike“ über Kuba zieht, andere sehen ihn nördlich an der Insel vorbeidriften; möglicherweise gefährdet er auch Florida.

Zunächst jedoch schwächt sich „Ike“ ab. Windscherungen zerzausen die Zirkulation im Norden der Augenwand, und die Gewitter verlagern sich in den geschützteren Süden des Wirbels. Solche Scherungen entstehen, wenn Stärke oder Richtung des steuernden Windes, der den Hurrikan vorantreibt, sich mit

zunehmender Höhe stark ändern. Sie zerfleddern hier und dort den bis dahin wohlgeformten Wolkenring um das Auge, und der Hurrikan verliert leicht an Symmetrie. „Ike“ fällt auf Kategorie zwei zurück, und sein Auge ist von Wolken verhangen.

Als nördlich des Wirbelsturms der Luftdruck steigt, wird „Ike“ auf südwestlichen Kurs geführt. Es ist ein ungewöhnlicher Pfad: Nur vier weitere Hurrikans haben sich auf ähnlicher Spur bewegt, etwa „Andrew“, der 1992 Florida verwüstete. „Ike“ zieht noch südlicher als alle Vorgänger. Florida ist dennoch nicht sicher: Tage später stürmen Tornados über die Keys, die sich aus „Ikes“ chaotischem Windfeld gelöst haben.

Erst am Nachmittag des 6. September nehmen die Scherungen ab: Die Winde über dem Ozean und in der Höhe gleichen sich in Richtung und Geschwin-



Noch am Tag nach der Katastrophe müssen Galvestons Bürger in Notunterkünften ausharren

digkeit wieder an. Die Wolken über dem Auge lösen sich auf, die Zirkulation ordnet sich: Erneut gewinnt der Wirbel rasch an symmetrischer Kontur und alter Kraft. Nach sechs Stunden ist er wieder ein gefährlicher Hurrikan der Kategorie vier.

Seine Stürme rasen jetzt mit einer Geschwindigkeit von 215 km/h.

**6. SEPTEMBER, GRAND TURK ISLAND,** rund 350 Kilometer östlich von Kuba, gegen 23 Uhr Ortszeit: Regen peitscht horizontal von Osten. Kurz darauf brechen sechs Meter hohe Wellen auf die Strände der winzigen britischen Übersee-Insel und überspülen den Flughafen. Dann verwüstet „Ikes“ Augenwand die Kapitale Cockburn Town.

Überall auf den Inseln des Archipels tragen die Orkanwinde Dächer fort, beschädigen nahezu alle Häuser und legen die Stromversorgung lahm. 3000 Menschen werden obdachlos.

Im südlicher gelegenen Haiti weicht der Regen, den „Ikes“ äußere Wolkenbänder bringen, das Erdreich gefährlich auf. Tage zuvor haben bereits der Tropensturm „Fay“ und die Hurrikans „Hanna“ und „Gustav“ die Böden mit ihren Regenmassen durchtränkt. In der Stadt Gonaïves stehen Stadtviertel unter Wasser. Schon seit Monaten leidet Haiti, eines der ärmsten Länder der Welt, an hohen Lebensmittelpreisen. Es herrscht Hunger, Hilfstransporte werden überfallen, Hubschrauber müssen die Bevöl-

## Mit Jets gegen den Hurrikan

Neue Technik soll die Gewalt der Wirbelwinde bändigen

**S**eit Jahrzehnten untersuchen Meteorologen, wie sich die Urkräfte eines Hurrikans mindern lassen. In den 1960er Jahren streuten sie per Flugzeug kleinste Silberjodidpartikel in die Wirbelstürme. Mit der Chemie, so hofften die Forscher, ließe sich der Wasserdampf in den höchsten und kältesten Schichten „impfen“, sodass sich schneller Wolken bilden: Der Hurrikan würde abregnen und an Kraft verlieren. Am Ende aber scheiterten diese Experimente – der Wasserdampf war zu warm und kondensierte nicht.

In den 1990er Jahren simulierten Experten am Computer zwei Stürme, die zuvor über Hawaii und Miami getobt hatten. Am Modell versuchten sie nachzuvollziehen, ob ein Sturm seinen Weg verändert, wenn Faktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit oder Winde variieren. Das Ergebnis: Schon kleinste Schwankungen können die Zugbahn und Windgeschwindigkeit entscheidend beeinflussen.

Seither spekulieren Wissenschaftler, mit welchen Instrumenten sich Hurrikans manipulieren lassen. Sie schlagen etwa vor, dass künftige, in einer Erdumlaufbahn kreisende Solarkraftwerke ihre gebündelte Energie gen Boden senden könnten, um den Wasserdampf in einem Hurrikan mit Mikrowellenstrahlen gezielt aufzuheizen. Folge: Der Sturm schwächt sich ab oder steuert in eine neue Richtung.

Eine andere Überlegung ist, den Ozean bei Hurrikangefahr rechtzeitig mit einem dünnen Film aus biologisch abbaubarem Öl zu bedecken – als Verdunstungshemmer. Auf diese Weise wäre ein Wirbelsturm von seiner Energiequelle, dem Wasserdampf, abgeschnitten. An einem Ölfilm, der Starkwinden standhält, wird jedoch noch geforscht.

Seit Kurzem erwägen Wissenschaftler, Kampfflugzeuge mit Überschallgeschwindigkeit um das Auge eines Hurrikans kreisen zu lassen. Deren Schockwellen erhöhen den Luftdruck gewaltig, was das Ansaugen neuen Wasserdampfs behindert – dem Sturm ginge die Luft aus. Ob das mehr ist als eine verwegene Idee, muss sich jedoch in der Praxis erweisen. Immerhin hat der Erfinder, ein US-Ingenieurwissenschaftler, das Verfahren bereits zum Patent angemeldet.



kerung aus der Luft versorgen. Mindestens 793 Haitianer sterben an den Folgen der Unwetter.

„Ike“ zieht weiter gen Westen zur Bahamas-Insel Great Inagua mit der weltgrößten Brutkolonie westindischer Flamingos. Die Vögel scheinen die Gefahr zu spüren. Die meisten der 50 000 Tiere fliegen zu anderen Inseln oder verbergen sich in den Mangroven.

Auf Kuba kommt es zu großflächigen Evakuierungen. 2,6 Millionen Menschen werden aus den Küstenregionen in Sicherheit gebracht, knapp jeder Vierte Kubaner. In Florida sind die Touristen aufgerufen, die Keys zu verlassen. In Galveston dürfen sich die Bürger noch sicher fühlen.

„Ike“ wirbelt bereits im tropischen Gewässer vor Kuba. Er sättigt sich mit Feuchtigkeit. Seine Wolkenbänder kreisen nun fast perfekt symmetrisch, seine Stürme zirkulieren stabil und beständig um das Auge. Und jetzt beginnt ein Prozess, wie er nur in den größten Hurrikans vorkommt: ein *eyewall replacement cycle*, eine grandiose Neugeburt der Augenwand.

Jenseits der Augenwand formen die äußeren Regenbänder einen zweiten Wolkenring, eine noch unscharfe Zone, in der massiv Regen fällt. Langsam entsteht eine zweite Augenwand, die sich immer enger um den inneren Ring schnürt, bis diesem die Luft ausgeht und er verschwindet. Der neue Ring wird

## Im Golf von Mexiko

Großräumige Luftströmungen treiben »Ike« in Richtung Texas

den alten ersetzen, dabei kann sich ein Wirbelsturm kurzfristig abschwächen; „Ike“ fällt auf Kategorie drei zurück.

Doch noch bevor der Prozess vollendet ist, trifft „Ike“ auf Land: in der Provinz Holguín, im Osten Kubas.

**7. SEPTEMBER, CABO LUCRECIA** auf Kuba, 21.45 Uhr: „Ike“ stürmt mit 205 km/h und schiebt riesige Wellen auf die Ostküste Kubas zu. Er wirbelt durch die



Ein Mann blickt in die Trümmerlandschaft vor seinem einstigen Zuhause. »Ikes« Orkanwinde haben Fenster zerbrochen und Bäume gefällt. In Texas stehen 100 000 Häuser unter Wasser, und der Bundesstaat erlebt den größten Stromausfall seiner Geschichte

Provinzen Holguín, Granma, Santiago de Cuba, Las Tunas. Auf dem US-Marinestützpunkt Guantánamo Bay sind alle Gefangenen in Betonbunkern eingeschlossen.

„Ike“ verwüstet auf seinem Weg quer über Kuba Bananenplantagen, Kaffeefelder und Yucca-Haine. Wassermassen unterspülen den Granma Highway, reißen die Brücke El Avispero mit sich und überfluten die Altstadt von Camagüey, wo die Winde das historische Theater von 1850 abdecken. Trotz allen Wütens tötet „Ike“ nur sieben Menschen. Und Havanna hat Glück. Der Hurrikan zieht südlich an der Stadt vorbei. Im historischen Zentrum stürzen nur wenige Häuser ein.

Über Land büßt „Ike“ an Gewalt und Struktur ein, denn er kann dort keine neue feuchtwarme Luft aufsaugen. Sein Auge verschwindet. Erst am nächsten Tag hat er Kuba von Ost nach West überquert. Im Karibikstrom schöpft er wieder Wasserdampf. Er fegt nordwestlich entlang der Südküste.

Dann nimmt er einen nördlicheren Kurs ein und zieht erneut über Kuba. Im Westen tobt er über die Region Pinar del Río. Neun Tage zuvor erst hat hier Hurrikan „Gustav“ gewütet. Die beiden Wirbelstürme verwüsten in der Region 1200 Ausbildungsstätten und 26 Krankenhäuser. Auf Kuba richten sie insgesamt

einen Schaden von fünf Milliarden US-Dollar an, den größten in der Geschichte der Insel: 450 000 Häuser werden beschädigt, 63 000 komplett zerstört; 200 000 Menschen sind obdachlos.

„Ike“ lässt Kuba am 10. September hinter sich. Weil er über Land keine neue Feuchtigkeit aufnehmen konnte, hat er so viel Energie verloren, dass er nun als schwacher Hurrikan der Kategorie eins über den Golf von Mexiko zieht. Großräumige Luftströmungen treiben ihn gen Westnordwest.

Dennoch erwarten die Meteorologen am National Hurricane Center einen gewaltigen Wirbelsturm. Das Meer ist warm, und der Druck in „Ikes“ Zentrum fällt beständig. Bald schon müsste er wieder Kategorie drei, vielleicht sogar vier erreichen. In der Regel bedingen sich Druckverhältnisse und Windgeschwindigkeit: Je tiefer der Druck im Kern, desto rasanter die Stürme. „Ikes“ Spitzenwinde wehen aber ungewöhnlich langsam.

Vermutlich, so prognostiziert an diesem Tag ein erstes Wettermodell, wird „Ike“ in Texas wieder Land erreichen, möglicherweise in der Gegend um Galveston. Noch aber befindet er sich mehr als 800 Kilometer südöstlich, und es ist zu früh für präzise Vorhersagen.

„Ike“ gewinnt an Größe und verliert an Kontur: Sein Windfeld erstreckt sich nun über fast 1000 Kilometer. Sein Auge





Furioses Spektakel mit begrenzter Reichweite: ein Tornado in Mulvane, Kansas

## Der Saugrüssel aus der Wolke

Tornados sind kleine Stürme, aber mit enormen Kräften

**A**uf fast allen Kontinenten kommen Tornados vor, besonders aber im Mittleren Westen der USA. Die Luftwirbel existieren zumeist nicht länger als eine halbe Stunde, ihre Zugbahnen messen zwischen drei und zehn Kilometern. Charakteristisch für einen Tornado ist seine Form, die einem Trichter oder einem Elefantenrüssel gleicht, der aus einer rotierenden Gewitterwolke zur Erde reicht; meist ist dieser Rüssel von aufgewirbeltem Staub dunkel gefärbt. Sein Durchmesser beträgt in der Regel weniger als 100 Meter.

Mit seiner Kraft kann ein Tornado Häuser zerfetzen, Motorräder emporwirbeln, Züge von den Gleisen heben und Schneisen in Plantagen schlagen.

In Nordamerika entstehen die Wirbelwinde meist zwischen Frühjahr und Sommer: Vom Golf von Mexiko strömt in diesen Monaten feuchtwarme, bodennahe Luft nach Norden. Zugleich ziehen von den Rocky Mountains in höheren Schichten kalte, trockene Luftmassen heran und schieben sich schräg über die warme Schicht. Geschieht das, beginnt die leichtere, feuchtheiße Luft aufzusteigen – und die Luftschichtung verliert an Stabilität.

Ein Tornadorüssel bildet sich, wenn die starken Aufwinde in eine schnelle Rotation geraten. Er wächst stets von der Wolke zur Erde hinab: Und je schmaler der Schlauch wird, desto mehr nimmt die Drehgeschwindigkeit zu. Der Rüssel rotiert mit Geschwindigkeiten von bis zu 150 Metern in der Sekunde. Sein Lärm dröhnt kilometerweit und ist ohrenbetäubend, wenn er den Boden berührt.

Im Tornado herrscht Tiefdruck. Zieht er etwa über ein Gebäude, sackt der Druck um das Bauwerk plötzlich massiv ab, während er im Gebäude selbst zunächst vergleichsweise hoch bleibt. Der Überdruck, der innen entsteht, kann verheerende Folgen haben: Dächer, Wände und Fenster zerbersten wie bei einer Explosion.

Anders als Hurrikans lösen sich Tornados oft schnell wieder auf, beispielsweise, wenn sie von kühlen Winden aus der Regenzone der Gewitterwolke getroffen werden. Doch weshalb genau die Wirbelwinde plötzlich verschwinden, ist noch nicht geklärt.

weitet sich; seine Wolkenbänder fransen jedoch aus, und im Wall zirkulieren die Winde chaotischer.

Vermutlich verhindert seine schiere Größe, dass er erneut rasch an Kraft gewinnt. Wie eine Eiskunstläuferin, die bei einer Pirouette ihre Arme ausstreckt, drosselt ein weites Windfeld die Wucht eines Wirbelsturms.

Am 12. September, dem Tag, bevor „Ike“ Amerika heimsucht, schließen an der Küste von Texas und Louisiana die Häfen. Die NASA riegelt das Johnson Space Center ab. Eine Million Menschen fliehen ins Landesinnere. Wer die Küstenorte nicht verlasse, betont der nationale Wetterdienst, den erwarte der sichere Tod.

Doch in Galveston verschanzen sich 15 000 Menschen in ihren Häusern. Falls „Ike“ direkt über die Stadt hinwegziehe, solle es niemand wagen, die Stille im Auge zu erkunden, warnt der Hurrikanendienst ein letztes Mal. Denn die größte Gefahr durch Wind und Wellen drohe direkt danach.

In diesen Stunden irrt nur noch der zypriotische Frachter „Antalina“ auf dem Meer umher. Der Kapitän sucht nach sicheren Gewässern. Nachmittags treibt das Schiff auf offener See, manövrierunfähig im Sturmpfad des Hurrikans. Helikopter wagen sich jetzt nicht mehr hinaus, um die Besatzung zu bergen. Die Winde wehen bereits zu stark. Die Männer müssen an Bord ausharren.

Erst als sich der Hurrikan nur noch 150 Kilometer vor Galveston befindet, melden die Meteorologen aus Miami: „Das Zentrum von ‚Ike‘ wird nahe Galveston Island an Land ziehen.“

Kurz vor seinem Landgang nehmen die Winde plötzlich wieder zu. „Ike“ erreicht jetzt fast Kategorie drei.

**13. SEPTEMBER, GALVESTON ISLAND,** 2.10 Uhr: „Ikes“ Auge zieht auf Land, Windgeschwindigkeit 175 km/h, Orkanstürme wehen fast 200 Kilometer weit um das Zentrum herum. Wellen türmen sich vier Meter hoch auf, sechs waren vorhergesagt.

Die Küstenstadt entgeht nur knapp einer Katastrophe. Minuten vor dem Landgang ist „Ike“ unerwartet nach Norden abgedreht, was ungezählte Menschen rettet. Es sind winzige Änderun-



gen im physikalischen Gefüge, die einen Hurrikan auf eine neue Bahn führen können: schwankende Temperaturen im Meer, unberechenbare Druckverhältnisse, chaotische Luftströmungen im Augenwall. All das macht mathematisch exakte Modelle unmöglich. Noch immer lassen sich Naturgewalten so wenig bändigen wie vorhersagen.

„Ikes“ Sturmpfad führt über die Düneninsel Galveston Island: Wind und Wellen zerstören den legendären Nachtclub „Balinese Room“, der sich auf einer Landungsbrücke weit in den Golf erstreckt und bislang allen Orkanen getrotzt hat. In der Gemeinde Gilchrist werden fast alle Häuser fortgespült.

In Galveston fluten Wellen in das Gericht und die Medizinische Abteilung der University of Texas. Selbst Strandvillen auf fünf Meter hohen Pfeilern halten kaum Stand: Ein Mann rettet sich im letzten Moment auf den Dachboden seines Hauses und beobachtet von dort, wie der Ozean unter ihm die Veranda fortreißt, ins Badezimmer dringt und Wände wegbriecht.

Anderswo sieht eine Familie zu, offenbar seelenruhig, wie daheim ihr Sofa zu schwimmen beginnt – und legt dann die Rettungswesten an. Als das Wasser bis an das TV-Gerät schwappt, wird das Boot aus der Garage geholt. Es ist dort eher zufällig untergebracht. Noch rechtzeitig rudert sie aus ihrem Haus, an Bord ihre zwei Hunde.

Überall dringt das Meer in die Häuser ein: In der Wohnung einer Frau und ihrer 80-jährigen Mutter steigt das Wasser in diesen Stunden mehr als einen Meter hoch. Eine Nacht müssen beide so überstehen. Am nächsten Tag hören sie endlich einen Helikopter, winken und werden aus den Fluten geborgen.

An Houston, 50 Kilometer landeinwärts, zieht „Ike“ nordöstlich vorbei. Seine Winde lassen Bäume brechen und Fenster zerbersten. Die glitzernden Glasfassaden des JP Morgan Chase Towers splitteren, Möbel wehen aus den Stockwerken. Wasser überflutet den Theaterdistrikt, und im Reliant Stadion, wo das Footballteam zu Hause ist, werden Teile des Oberdaches abgetragen.

In Texas sterben 84 Menschen (allerdings der geringere Teil von ihnen an den direkten Wirkungen des Sturms, die meisten erleiden etwa Elektroschocks, Kohlenmonoxidvergiftungen oder erliegen schon vorher vorhandenen medizinischen Komplikationen). 100 000 Häuser stehen unter Wasser. Der Bundesstaat erlebt den größten Stromausfall seiner Geschichte.

Nur der Frachter „Antalina“ schaukelt auf dem Meer die Sturmwellen unbeschadet aus und meldet später: Niemand verletzt.

## In Islands Nordosten

Reste des Sturms  
fegen als letzte Böen  
über die Insel

Als die Wellen abebben, stinkt es auf den Küstenstraßen von Texas bis Louisiana nach Abwässern, Müll und Schlick. Grünflächen, Sträucher, Bäume sind fortgeschwemmt. Die Flut hinterlässt überall rotes Erdreich. Salz bedeckt die letzten Pflanzen, die in der Sonne welken.

Über Land verliert „Ike“ erneut rasch an Kraft. Nach wenigen Stunden wird aus dem Hurrikan wieder ein tropischer, aber kräftiger Sturm. Im Norden von Texas, in Louisiana, Arkansas, Oklahoma

xiko. Die beiden Sturmgebiete bringen Tornados nach Arkansas, starke Böen und Regengüsse nach Kentucky. Sie fluten ganze Regionen, setzen Tausende Häuser unter Wasser und lassen Stromkabel reißen. Millionen Menschen sind ohne Strom und Gas. In der Liste der teuersten Hurrikans, die die USA bisher heimgesucht haben, rangiert „Ike“ auf Rang vier: Der von ihm verursachte Schaden beträgt 18 Milliarden US-Dollar.

Noch im kanadischen Windsor regnet es wie seit 28 Jahren nicht mehr. Nahe dem Sankt-Lorenz-Strom im südlichen Québec verwirbeln „Ikes“ Ausläufer in einem zweiten Tiefdruckgebiet und treiben auf den Nordatlantik.

## 19. SEPTEMBER, DÄNEMARKSTRASSE.

Neun Meter hohe Wellen rollen durch die Meerenge zwischen Grönland und Island. Vor genau einem Monat haben jene Gewitterwolken den Sudan verlassen, aus denen jenseits der Kapverden der Tropensturm „Ike“ erwuchs.

Seine letzten Überreste beziehen ihre Kraft nicht mehr aus warmem Ozeanwasser, sondern aus unterschiedlich temperierten Luftmassen: Vor Grönland sind „Ikes“ feuchte Tiefausläufer auf den lokalen Herbstwind „Pitera“ gestoßen, der polare Kälte von den Eisfeldern nach Süden weht.

Alle zwei Jahre, manchmal nur alle vier, treiben die Reste eines Hurrikans bis nach Island. In Reykjavík fällt jetzt ungewöhnlich viel Regen, stündlich bis zu 20 Millimeter. Irgendwo im Nordosten der Insel verliert sich „Ikes“ Windspur. Böen fegen ein letztes Mal mit 144 km/h vorwärts.

Im Zyklus der ewigen Wiederkehr der Natur treibt Tage später eine neue Gewitterwelle von Afrika aus über den Atlantik nach Westen. Südlich der Karibikinsel Puerto Rico wächst sie zum gewaltigen Hurrikan „Omar“.

Doch diesmal tobt der Wirbelsturm über den Atlantik – ohne einen einzigen Menschen zu gefährden. □

## MEMO | HURRIKAN

» **NUR WENN DAS MEER** mindestens 26,5 Grad warm ist, entwickeln sich Hurrikans.

» **KARIBISCHE HURRIKANS** entstehen oft aus afrikanischen Tiefdruckwellen.

» **DER CORIOLIS-EFFEKT** lenkt die Winde auf der Nordhalbkugel grundsätzlich nach rechts.

» **ÜBER LAND** verliert ein Wirbelsturm schnell an Kraft.

und Missouri regnen sich seine Wolken ab und sorgen für Überschwemmungen. Ein Hoch führt den Sturm dann auf nördlichen Kurs. Als er am nächsten Tag den Mittleren Westen erreicht, verflüchtigt sich sein warmer Kern.

Nordnordostwärts vereinigt sich „Ike“ mit den Überresten des tropischen Sturms „Lowell“, der gesättigt ist von der feuchtwarmen Luft des Golfes von Me-


**Dirk Liesemer**, 32, ist Wissenschaftsjournalist in Münster. Wissenschaftliche Beratung: **Dr. Erich Roeckner**, Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg.





Mitunter enthalten Wellen (hier vor Hawaii) so viel Energie, dass sie gewaltige Felsbrocken auf 20 Meter hohe Klippen schleudern





Wellenforschung

# Die Macht der Wogen

Die Wellen auf den Ozeanen speichern 100-mal so viel Energie, wie die gesamte Menschheit pro Jahr verbraucht. Ihre Kraft lässt manche Wogen auf mehr als 30 Meter Höhe anschwellen, andere erreichen die Geschwindigkeit eines Düsenflugzeugs – oder versetzen gar Kontinente in Schwingung

Text: Martin Paetsch



# d

as Meer vor Holderness, einer Küstenregion in Ostengland, ist braun vom Lehm. Welle um Welle rollt aus der Nordsee heran, läuft auf dem schmalen Strand aus, zieht sich wieder zurück. Jede trägt ein Stück Land davon.

Die weichen, lehmigen Klippen haben dem Ansturm der See kaum etwas entgegenzusetzen. Erst weiter nördlich besteht die Küste aus hartem Kalk: Dort haben die Wellen Jahrhunderte gebraucht, um Höhlen und Bögen aus den steilen Wänden herauszuarbeiten.

Die Lehmklippen von Holderness hingegen zeigen überall frische Spuren der Wassergewalt. Von den Wellen unterspült und ihrer Stütze beraubt, sind metergroße Stücke herausgebrochen und abgesackt. In den gesperrten Küstenstraßen klaffen tiefe Löcher, Wege enden im Nichts. Nahe der Abbruchkante stehen verlassene Häuser.

Jede Flut spült rund 5200 Tonnen Erde in die Nordsee; rund 200 Lastwagenladungen. Jahr für Jahr weichen die Klippen im Schnitt um zwei Meter zurück. Seit dem Mittelalter sind so schon um die 30 Dörfer im Meer versunken.

An der Küste von Holderness zeigt sich im Zeitraffer, wie das Meer die Kontinente formt. Seit es Ozeane gibt, schlagen sie gegen die Küsten, unterhöhlen Klippen und zermahlen Felsen. Den feinen Sand spülen sie anderswo zu Stränden auf.

Die treibende Kraft dieser Prozesse sind die Wellen. Ständig ist die See in Aufruhr: Ihre Oberfläche durchlaufen Schwingungen in allen Größen; selbst Ebbe und Flut sind nichts weiter als die Täler und Berge gewaltiger, vor allem von der Anziehungskraft des Mondes aufgeworfener Wellen.

Die Energie, die Mond und Sonne dabei auf die Oberflächen der Meere übertragen (im Verhältnis 6:1), beträgt rund 3,5 Billionen Watt. Das ist mehr als die elektrische Leistung, die alle Kraftwerke auf unserem Planeten gemeinsam erzeugen.

Wellen und Gezeiten werden seit Jahrhunderten erforscht.

Doch die Bewegungen der Meere bergen noch immer Geheimnisse: So können sich mitten im Ozean plötzlich enorme Wasserwände auftürmen, weit höher als die Wogen ringsum. Und selbst tief unter der Oberfläche laufen Schwingungen durch die See, die erst durch Satellitenbeobachtungen nachgewiesen werden konnten.

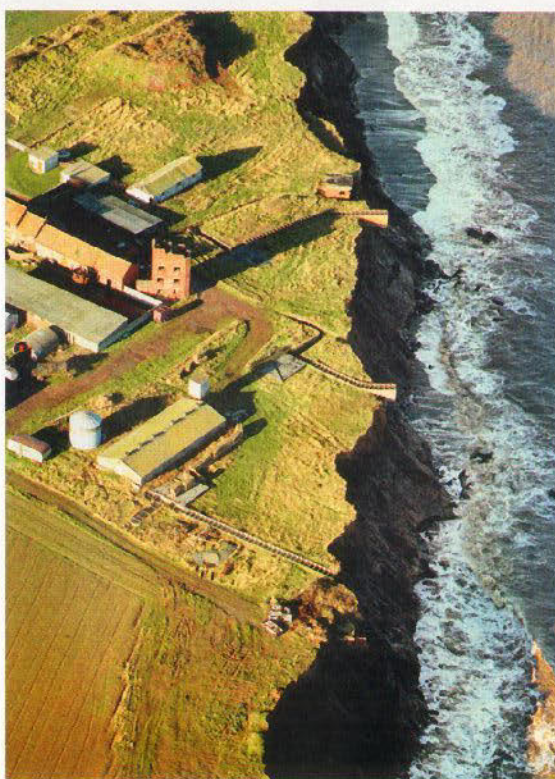
**ALL DIESE WELLEN** sind im Prinzip nur Störungen, die sich im Wasser ausbreiten: Sie entstehen zum Beispiel, wenn ein Stein in einen See geworfen wird. Dabei verdrängt er Wasser zu allen Seiten, sodass die Seeoberfläche zunächst nach unten eingedrückt wird. In die Mulde zurückströmendes Wasser wirft jedoch gleich darauf einen Hügel auf, der wieder in sich zusammensackt und dabei einen neuen Trichter erzeugt: Es beginnt also eine Pendelbewegung, bei der die Wasserteilchen auf- und abtanzen, ohne sich wirklich von der Stelle zu bewegen.

Um diesen Vorgang und auch die Ausbreitung der Wellen besser zu verstehen, muss man sich klarmachen, dass Wassermoleküle einerseits zwar beweglich sind, andererseits jedoch Anziehungskräfte aufeinander ausüben. Es ist etwa so, als wären die Wasserteilchen über Gummibänder miteinander verbunden.

Ein aufstrebendes Wasserteilchen zieht also dank seiner Anziehungskraft benachbarte Teilchen ebenfalls hoch – mit einer gewissen Verzögerung. Und diese ziehen wiederum ihre Nachbarn in die Höhe. Dabei wird auch die Energie von einem Teilchen zum anderen weitergereicht (lediglich durch Reibung wandelt sich ein minimaler Teil der Energie in Wärme um). So kommt die Welle in Gang, ein Wellenberg pflanzt sich fort.

Hat ein Teilchen seinen höchsten Punkt erreicht, beginnt es wieder abzusinken. Und wieder wirkt es auf seine Nachbarteilchen ein, zieht sie mit hinab. Die Folge: Nun breitet sich ein Wellental aus.

Die Wasserteilchen verhalten sich also ähnlich wie die Zuschauer während einer „La Ola“ im Fußballstadion: Die stehen nacheinander von ihren Plätzen auf, um sich gleich darauf wieder hinzusetzen. So



Die Kraft der Gezeiten: An der Küste Ostenglands (hier Yorkshire) spült jede Flut mehr als 5000 Tonnen Erde in die Nordsee. Jahr für Jahr verlieren die Klippen im Schnitt rund zwei Meter Küstenlinie





Weht Wind beständig aus einer Richtung, überträgt er seine Energie auf die Wassermoleküle und versetzt das Wasser in Schwingung. Treffen die Wogen auf flache Küstengewässer (hier vor Boulogne-sur-Mer, Frankreich), spritzt die Gischt viele Meter in die Höhe

erzeugen sie eine Wellenbewegung, die durch das Publikum läuft.

Gleich den Zuschauern, die sich aufrichten und setzen, ihre Plätze aber beibehalten, bleiben auch die Wasserteilchen weitgehend an einer Stelle: Während eine Welle vorbeiläuft, vollführen sie nur eine Art Kreisbewegung.

**NICHT NUR EIN** ins Wasser geworfener Stein kann Wellen hervorrufen, sondern auch der Wind: Er bewegt sich auf der Wasseroberfläche unterschiedlich schnell und verursacht dadurch schwache Druckunterschiede. Die reichen aus, um die Wassermoleküle in Bewegung zu setzen – winzige Wogen entstehen.

Diese Kleinstwellen machen die Oberfläche rauer, sodass sie dem Wind mehr Angriffsfläche bietet. Je höher die Wasserberge aufgeworfen werden, desto mehr Energie kann der Wind auf die Wellen übertragen – und diese Energie bleibt im Auf und Ab der Wasserteilchen erhalten.

Auf diese Weise kann sich die in den Wogen gespeicherte Windenergie ausbreiten und ohne großen Verlust über Tausende von Kilometern fortpflanzen, bis die Wellen schließlich eine Küste erreichen.

**In einem Taifun vor Taiwan registrierte eine Boje 2007 die höchste je exakt gemessene Welle: 32,3 Meter**

Die Größe der Wellen richtet sich nach dem Wind: Je länger und stärker er kontinuierlich aus einer Richtung weht, desto stürmischer ist die See. Erst nach drei Tagen hat er das Meer so aufgepeitscht, dass die Wellen auf die jeweils maximal mögliche Größe anwachsen. Weil ihre



Kanten im Wind zerstieben, ist der Ozean dann von weißem Schaum bedeckt, die Gischt schränkt die Sicht sehr stark ein.

In der Regel kommt es nur selten zu einem solchen Seegang, da der Wind meist abflaut oder dreht. Doch in den Gewässern um die Antarktis, wo starke Westwinde nahezu ungehindert wüten, sind hohe Wellen keine Seltenheit. Schon im frühen 19. Jahrhundert berichteten Polarforscher von 30-Meter-Wellen in diesen Regionen.

Auch in lang anhaltenden tropischen Stürmen erreichen Wogen enorme Ausmaße. Als im Oktober 2007 der Taifun Krosa auf Taiwan zuegte, registrierte eine vor der Küste angebrachte Messboje einen Wasserberg von 32,3 Meter Höhe – die höchste jemals exakt bestimmte Welle.

Wie Messdaten zeigen, kommt es durch die Erwärmung der Erde vermutlich immer häufiger zu starken Stürmen – und zu extrem hohen Wellen.

Darauf deuten Erschütterungen hin, die von Seismographen registriert worden sind. Denn nicht nur Erdbeben lassen die empfindlichen Instrumente ausschlagen: Auch der Wellenschlag der Weltmeere versetzt die Kontinente in messbare Schwingungen.

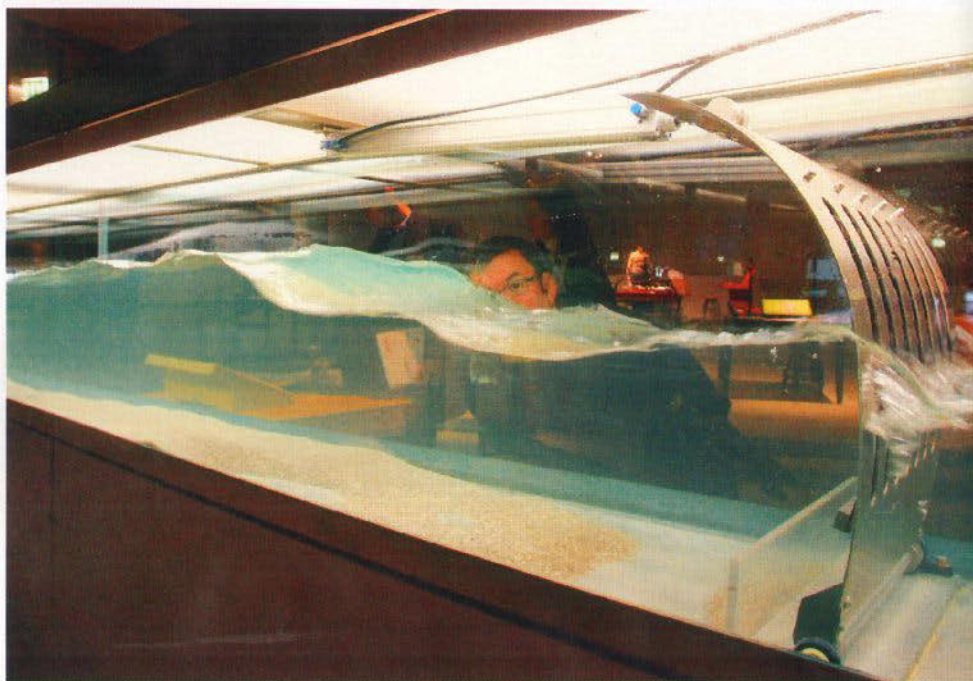
Dieses seismische Hintergrundrauschen nimmt bei schwerem Wetter zu. Anhand von Aufzeichnungen aus den vergangenen drei Jahrzehnten konnten Wissenschaftler nachweisen, dass es nun öfter zu Stürmen mit starkem Seegang kommt.

**WAS FÜR EINE ENERGIE** die Unwetterwellen speichern, demonstrieren Schäden an der britischen Atlantikküste: Heranrollende Wasserberge reißen dort regelmäßig große Felsen los und schleudern sie auf 20 Meter hohe Klippen.

Und seit Jahrzehnten gibt es Berichte von Monsterwellen, die völlig unvermittelt vor Schiffen in schwerer See auftauchen. Diese Wasserwände steilen sich mehr als doppelt so hoch auf wie die sie umgebenden Wellen. So wurde am Neujahrstag 1995 die Draupner-Bohrinsel in

der Nordsee von einer gewaltigen Welle getroffen. Ein Lasermessgerät zeichnete damals die Höhe des Wasserberges auf: Er maß von Wellental zu Wellenkamm knapp 26 Meter – und überragte damit die übrigen, im Schnitt rund elf Meter hohen Wellen um mehr als das Doppelte.

Im selben Jahr überstand das Kreuzfahrtschiff „Queen Elizabeth II“ die Begegnung mit einer noch größeren



Wenn durch einen Erdbeben oder einen Vulkanausbruch große Landmassen ins Meer stürzen, können Wellen von zerstörerischer Kraft entstehen. Meist werden solche Tsunamis von unterseeischen, den Meeresboden verformenden Beben hervorgerufen (Simulation eines Seebebens in Wolfsburg)

Monsterwelle. Im Nordatlantik sah sich Kapitän Ronald Warwick plötzlich einer „riesigen Wand aus Wasser“ von 29 Meter Höhe gegenüber: „Es sah aus, als steuerten wir direkt in die weißen Klippen von Dover hinein.“

Wie solche Wogen entstehen, können Wissenschaftler noch nicht vollständig erklären. Ein Szenario geht davon aus, dass Wellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung laufen; werden dabei langsamere Wogen von schnelleren überholt, überlagern sich womöglich zwei Wellenberge, und die kombinierte Energie beider Wogen lässt für kurze Zeit eine riesige Wand emporwachsen, die über ihre Umgebung herausragt.

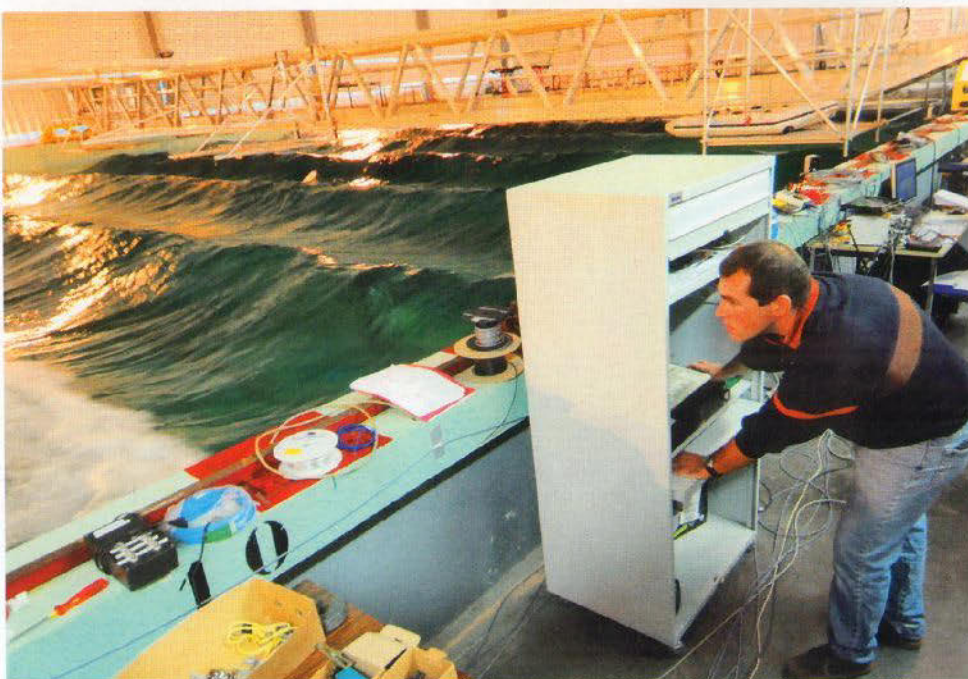
Das könnte viele rätselhafte Schiffskatastrophen erklären – möglicherweise auch die des deutschen Frachters „München“. Das 261 Meter lange Schiff sandte am 12. Dezember 1978 ein Notsignal aus, ehe es mit 28 Mann Besatzung für immer im Nordatlantik verschwand.

Bei der Suchaktion fand man ein leeres Rettungsboot der „München“, das offenbar von einer Welle beschädigt



worden war, während es noch am Frachter hing – 20 Meter über dem Wasserspiegel. Vermutlich hat also eine riesige Woge das Schiff zum Sinken gebracht.

**DERART ZERSTÖRERISCHE WELLEN** können auch ganz ohne Wind entstehen. Die verheerendsten werden aufgeworfen, wenn bei einem Erdbeben oder Vulkanausbruch



Bislang wird die in Wellen gespeicherte Energie kaum zur Stromerzeugung genutzt. Weltweit testen Forscher Systeme, die Bewegungsenergie in elektrische Energie übersetzen – wie hier im französischen Nantes, wo der Prototyp eines solchen Kraftwerks auf künstlich erzeugten Wellen schwimmt

gewaltige Landmassen ins Meer stürzen. Ähnlich wie bei dem ins Wasser geworfenen Stein breiten sich auch dabei Kreiswellen in alle Richtungen aus – nur viel gewaltiger.

Die meisten dieser Tsunamis (japan. für „Hafenwelle“) gehen jedoch auf Seebeben zurück. Wenn sich der Meeresgrund verformt, bewegt dies auch das Wasser darüber. Und die so erzeugte Störung pflanzt sich im tiefen Ozean mit einer Geschwindigkeit von rund 800 km/h fort.

Die Wellenkämme liegen aber bis zu 200 Kilometer auseinander, und anders als bei Windwellen, die sich auf die oberflächenschicht beschränken, verteilt sich die Energie bis auf den Meeresgrund – im offenen Meer sind das oft mehrere Kilometer. Deshalb erreichen die Wellen an der Oberfläche selten mehr als einen Meter Höhe.

Seine Zerstörungskraft entfaltet der Tsunami erst, wenn er auf eine Küste trifft. Denn im flachen Gewässer werden die enorm energiereichen Wellen zusammengestaucht, sodass sie sich meterhoch auftürmen und ganze Küstenstriche überfluten.

Eine solche Welle entstand am 26. Dezember 2004, als der Meeresgrund nordwestlich von Sumatra auf 1200 Kilometer Länge aufbrach. Das Beben setzte eine Energie frei, die der Sprengkraft von einer Gigatonne entsprach – 67 000-mal stärker als die über Hiroshima gezündete Bombe.

Als die Wellen vor der indonesischen Provinz Aceh das erste Mal auf Land trafen, stellten sie sich 30 Meter hoch auf. Die Wassermassen drangen zum Teil mehr als vier Kilometer ins Landesinnere vor, ehe sie sich zurückzogen und dabei viele Menschen mit sich rissen.

Zwei Stunden später erreichte der Tsunami Thailand, lief weiter nach Ostafrika und ließ sich selbst 24 000 Kilometer entfernt im kanadischen Halifax nachweisen. Insgesamt kamen mehr als 225 000 Menschen ums Leben.

**NEBEN DIESEN** gewaltigen Wellen an der Oberfläche gibt es aber auch mächtige Wogen in der Tiefe – und auch sie können dramatische Folgen haben.

Denn ein Ozean besteht aus Wasserschichten unterschiedlicher Dichte, die sich nicht vermischen. Die Trennlinie ähnelt jener zwischen Wasser und Luft an der Meeresoberfläche, und genau wie an dieser Grenze können auch an der zwischen den Wasserschichten Schwingungen entlanglaufen.

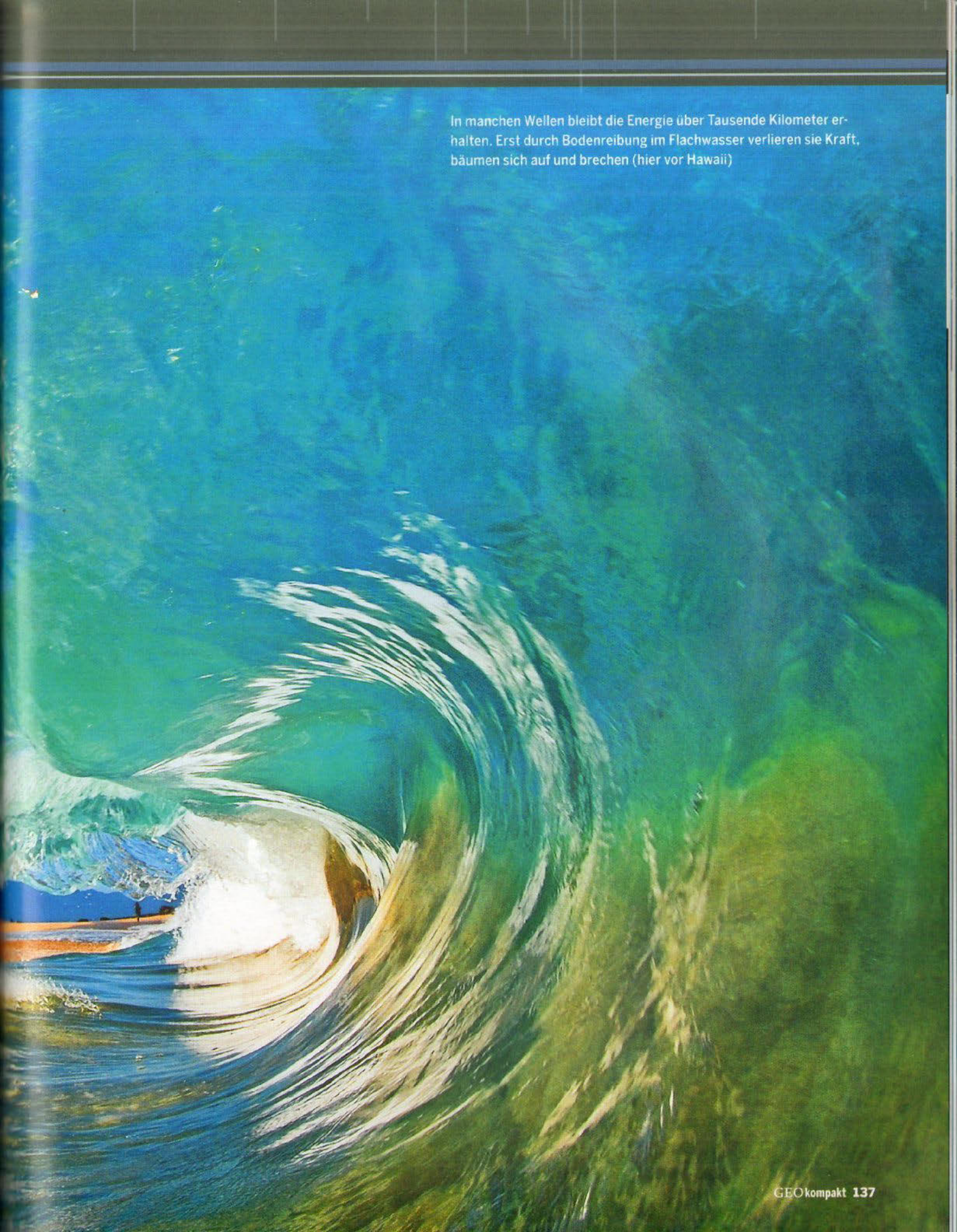
## **Tief im Ozean laufen mächtige Wogen, die das Klima ganzer Kontinente verändern können**

Diese „planetaren Wellen“ entstehen unter der Meeresoberfläche, weil zusätzlich zu Wind oder Strömungen auch die Erdrotation auf einen Ozean einwirkt. Durch komplizierte physikalische Effekte werden dabei Wogen ausgelöst, die sich stets in Richtung Westen fortpflanzen.









In manchen Wellen bleibt die Energie über Tausende Kilometer erhalten. Erst durch Bodenreibung im Flachwasser verlieren sie Kraft, bäumen sich auf und brechen (hier vor Hawaii)





Der Klimawandel ruft immer stärkere Stürme hervor (hier in der Beringsee) – und dadurch auch extrem hohe Wellen. Manche haben so viel Kraft, dass sie Löcher in Schiffe schlagen können

Obwohl sich die bis zu 50 Meter hohen Wellen nur langsam ausbreiten, können sie manchmal weit reichende Folgen haben: Denn es ist möglich, dass sie ganze Meeresströmungen ablenken – darunter auch den Golfstrom, der bekanntlich in Nordeuropa für milde Temperaturen sorgt.

## In über 300 Meter langen Kanälen simulieren Forscher die Wirkung von Riesenwellen

Lange waren diese rätselhaften Wogen nichts als Theorie: Weil die unterseeischen Wellenberge an der Oberfläche nur wenige Zentimeter Höhenunterschied verursachen und zudem mehrere Hundert Kilometer auseinanderliegen können, lassen sie sich auf der Erde kaum nachweisen.

Erst die Messungen eines Forschungssatelliten bestätigten die Existenz dieser majestätischen Wellen. Wie die an der Auswertung der Daten beteiligten Wissenschaftler erkannten, brauchen sie mitunter mehrere Jahre, um einen Ozean zu durchqueren.

**UM MEHR ÜBER RIESENWELLEN** zu erfahren, erzeugen Forscher in gigantischen Tanks künstliche Wogen. Der mit 307 Metern längste Wellenkanal der Welt steht im Forschungszentrum Küste in Hannover. Dort versuchen Ingenieure herauszufinden, welche dämpfende Wirkung Mangroven und Küstenwälder auf Tsunamiwellen und Sturmfluten haben können.

Unter anderem erforschen sie, wie breit und dicht der Bewuchs sein muss, um den Wellen ihre zerstörerische Kraft zu nehmen. Inzwischen haben die Wissenschaft-



Am 31. Januar 2008 wurde das über 100 Meter lange Fährschiff »Riverdance« von einer rund sieben Meter hohen Riesenwelle getroffen und strandete an Englands Westküste bei Blackpool

ler erkannt, dass auch künstliche Riffe die Wasserwände abschwächen können.

Eine Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Berlin erforscht ebenfalls Monsterwellen. Ihre Versuche haben ergeben, dass auf offener See Wogen von 34 Meter Höhe physikalisch möglich sind – worauf sich die Konstrukteure von Bohrinseln einstellen sollten.

Und auch Ingenieure der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich haben sich mit Extrem-Wogen befasst. Ihr Ziel war es, die Größe von Wellen abzuschätzen, die etwa durch einen Bergsturz in einen See ausgelöst werden könnten. Mithilfe von Pressluft schossen sie Sedimentmaterial in ein Versuchsbecken, verfolgten die Wellen mit Laser und Videokamera und erhielten so ein Modell, um solche Vorgänge vorherzusagen.

Dieses hydraulische Modell nutzten die Zürcher Forscher, um ein extremes Ereignis besser zu verstehen, zu dem es am 9. August 1958 in der Lituya-Bucht an Alaskas Südküste gekommen war: Nachdem sich dort 30 Millio-

### MEMO | WELLEN

- » **WASSERWELLEN ENTSTEHEN** vor allem durch Wind, wenn er etwa über das Meer weht.
- » **DIE ÜBERTRAGENE** Energie pflanzt sich als Welle fort.
- » **DIE WASSERTEILCHEN** vollführen dabei eine kreisartige Auf- und Abbewegung.

nen Kubikmeter Gestein gelöst hatten und ins Meer gestürzt waren, hatte eine gigantische Wasserfront den Wald der Küste weggrasiert.

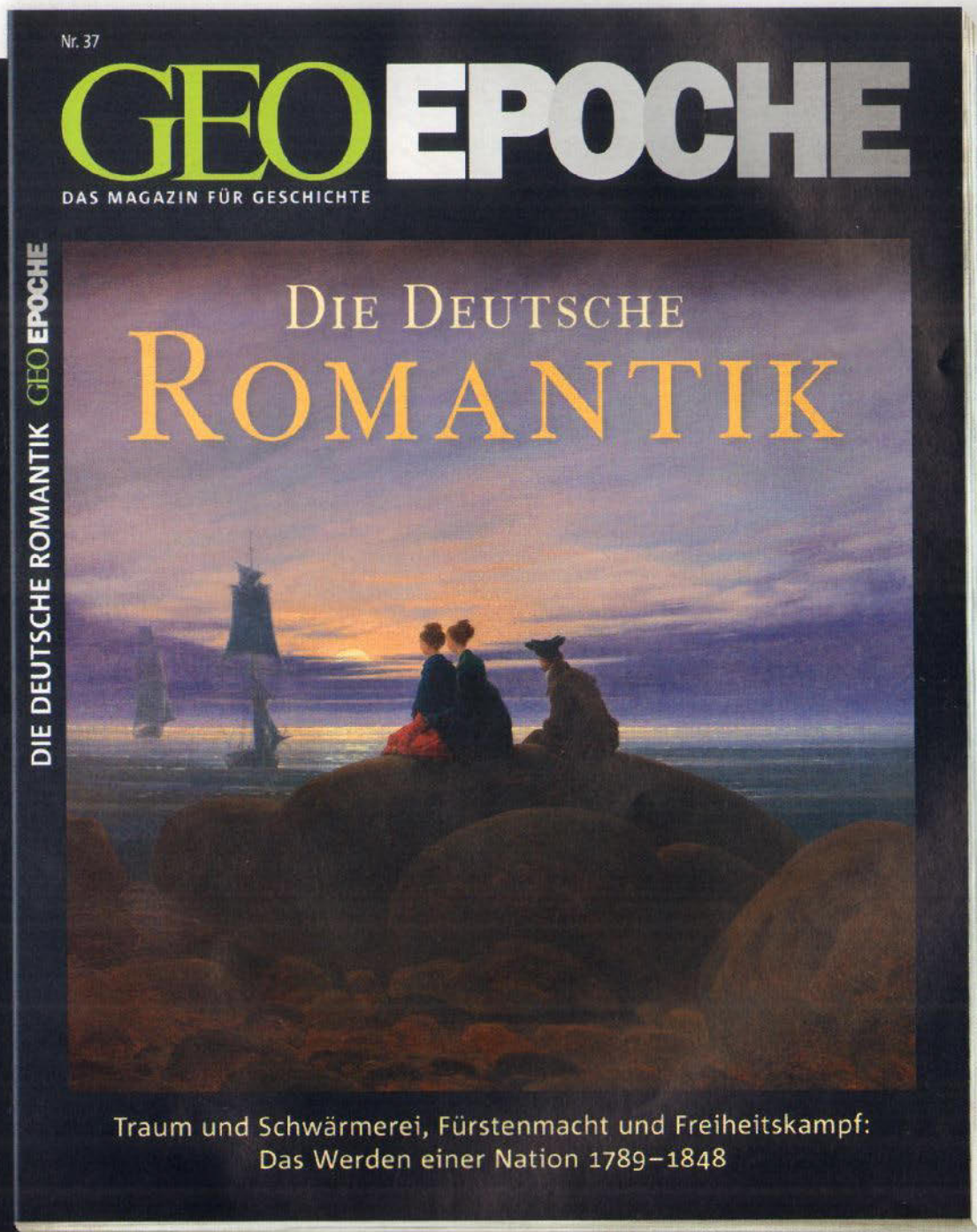
Mit 500 Meter Scheitelhöhe war es die größte jemals auf Erden nachgewiesene Welle. □

**Martin Paetsch**, 38, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

**Literatur:** Tom Garrison, »Oceanography: An Invitation to Marine Science«, Brooks Cole.



# Als Deutschland ein Reich der Phantasie war.





# TOD IM



Fünf Tage nach der Katastrophe: Die Lawine hat etliche Häuser zerfetzt

Text: Ralf Berhorst

Wochenlang schon hat es in den Alpen geschneit, so viel wie seit 100 Jahren nicht mehr in einem Februar. Meterhoch liegt der Schnee nun, auch im österreichischen Paznauntal. Im Dorf Galtür haben sich am 23. Februar 1999 Einheimische und Urlaubsgäste gerade zu einem Fest versammelt, als sich am Hang des 2754 Meter hohen Grieskopfs eine Jahrhundertlawine löst. Mit der Masse von 1600 ICE-Waggons rollt sie auf das Dorf zu

# SCHNEE



**E**twa 1150 Meter oberhalb des österreichischen Alpendorfs Galtür löst sich am 23. Februar 1999 um 16.02 Uhr eine Lawine aus dem Steilhang. 80 000 Tonnen Schnee stürzen hinab, türmen sich zu einer riesigen Staubwolke. Mit mehr als 300 km/h überquert die Schneewalze ein Flussbett und eine dahinter gelegene Hochalpenstraße. Nach 50 Sekunden trifft sie mit ihrer vollen Zerstörungskraft auf die ungeschützten Häuser im Ort.

Die Druckwelle presst Hauswände, Fenster und Türen ein, hebt Dächer ab, lässt Gebäude von innen zerbersten, wirbelt Autos in die Luft. Nach zwei Minuten kommt die Lawine zum Stehen.

\* 31 Menschen sterben, 22 Verschüttete können die Helfer in den folgenden Stunden aus dem Schnee retten.

Das Lawinenunglück von Galtür ist die schwerste Naturkatastrophe in den Alpen seit mehr als 30 Jahren. Nach allen Beurteilungen hätte die Schneewalze das Dorf niemals erreichen dürfen.

Denn sie traf den Ort in einer Zone, die als völlig ungefährdet galt.

**GALTÜR LIEGT** am westlichen Ende des Tiroler Paznauntals, auf 1584 Meter Höhe. Jeden Winter reisen Skitourenisten aus ganz Europa in die kleine Gemeinde, die nur 780 Einwohner zählt, deren Hotels und Pensionen aber 3900 Gästen Platz bieten.

Das Tal um Galtür ist eng wie eine Schlucht. Fast zu allen Seiten des Ortes steigen schroffe Zweieinhalbtausender an. Der höchste Gipfel ist der Grieskopf im Norden mit 2754 Metern. Sein Hang ist unbewaldet und nicht durch Stützverbauungen geschützt. Zwar gibt es am Grieskopf und dem benachbarten Grieskogel drei Felsrinnen, durch die im Winter regelmäßig Lawinen abrutschen. Aber weil der Berg so steil geneigt ist, löst sich der Schnee,

bevor er sich in bedrohlichen Massen angesammelt hat – normalerweise.

Und gleich an seinem Fuß wird das Terrain flach: 200 Meter sind es bis zur Hochalpenstraße, der B 188. Genug Platz also, dass eine Fließlawine aus dichtem, feuchtem Schnee auslaufen kann. Erst dahinter erstreckt sich die eigentliche Ortschaft Galtür.

Gleichwohl ist die Lage der Ansiedlung riskant. Aber die Menschen haben mit der Gefahr zu leben gelernt, und

liche „grüne Zone“ ein, auch den Ortsteil Winkl, obwohl 1967 gleich zwei Lawinen vom Grieskopf bis dorthin vorgedrungen waren und genug Kraft entwickelt hatten, um einige Autos zu verschieben. Doch die Zonenplaner glaubten offenbar nicht, dass sich ein solches Ereignis wiederholen könnte.

Deshalb fühlen sich die Einheimischen sicher – wie auch die Touristen, die nach Galtür kommen. Der Januar 1999 ist ein ungewöhnlich milder Mo-

nat im Paznauntal, an manchen Tagen ist es sogar vorfrühlingshaft warm. Oben auf den Bergen liegt immer noch genügend Schnee; zum Skifahren ist das sonnige Wetter ideal.

Doch zur gleichen Zeit braut sich 4000 Kilometer entfernt über dem Atlantik ein Sturm zusammen – der erste Faktor in einer Kette von Ereignissen, die zur Katastrophe führen werden. Über dem Meer treffen feuchtwarme Luftmassen aus den

Subtropen auf kalte Polarluft. Dieses feuchtkalte Gemisch strömt von Nordwesten gegen die Alpen und staut sich dort auf. Das Gebirge lenkt die Luftmassen in große Höhen, dort gefrieren die Wassertröpfchen zu Eis.

Am 27. Januar beginnt es an der Nordseite der Alpen heftig zu schneien. In Galtür misst die Wetterstation binnen drei Tagen 97 Zentimeter Neuschnee – anderthalbmal so viel, wie sonst in einem ganzen Monat fällt.

Etwa 20 solcher Messstationen gibt es zu jener Zeit in den Bergen Tirols. Sie liefern dem Lawinenwarndienst in Innsbruck Informationen über Schneehöhe, Temperatur, Luftdruck und Wind. Die Daten sind die Grundlage für den täglichen Lagebericht, in dem der Dienst die Lawinengefahr in zwölf Regionen des Bundeslandes beurteilt.

Rudi Mair leitet den Tiroler Warndienst. Am 29. Januar setzt er die Lawinengefahrenstufe für die Region Silvretta, in der auch Galtür liegt, auf den



Retter suchen in den Trümmern von Galtür nach Lawinenopfern. Zum Zeitpunkt des Unglücks halten sich rund 4000 Menschen in dem Dorf auf, das schon seit Tagen wegen starker Schneefälle von der Außenwelt abgeriegelt ist

sie vertrauen den historischen Aufzeichnungen: Diese Chroniken reichen bis ins 16. Jahrhundert zurück, und sie berichten kaum etwas über Schäden durch Lawinen vom Grieskopf.

Die Erfahrungen sind auch beachtet worden, als Ende der 1980er Jahre Experten der „Wildbach- und Lawinenverbauung“ eine Gefahrenkarte erstellten und den Ort in drei Zonen aufteilten (siehe Seite 143).

Die Fachleute ließen jene „rote Zone“, in der niemand ein neues Gebäude errichten darf, erst dicht vor der Hochalpenstraße enden. Im schmalen gelben Bereich südlich davon mussten Hausbesitzer ihre Wände verstärken.

Den größeren Teil Galtürs aber stuften die Experten als unbedenk-



höchsten Wert fünf – zum ersten Mal, seit die europaweit geltende Skala 1993 eingeführt wurde. Das bedeutet, dass die Gefahr eines Lawinenabgangs „sehr hoch“ ist. Als der starke Schneefall nachlässt, senkt Mair die Gefahrenstufe zwei Tage später auf vier ab.

Doch vom 5. Februar an staut sich abermals feuchtkalte Luft vom Atlantik vor den Alpen. Diesmal schneit es fünf Tage lang ununterbrochen; in Galtür fallen 123 Zentimeter Neuschnee. Es kündigt sich ein „meteorologisches Extremereignis“ an. Bis zum 10. Februar gilt in der Region Silvretta erneut Warnstufe fünf.

Mehrmals lässt Galtürs Lawinenkommission die Straße zu ihrem Ort sperren.

Auf dem Landweg ist Galtür nun nicht mehr zu erreichen. Hubschrauber des österreichischen Innenministeriums sowie des Bundesheeres müssen Siedlungen im gesamten Paznauntal mit Lebensmitteln und Medikamenten versorgen.

Erst am Donnerstag, dem 11. Februar, ist die Straße wieder frei. Skitouristen, die sich vor der Anfahrt besorgt wegen der Lawinengefahr erkundigen, werden von Hoteliers und Ferienvermietern beschwichtigt: Galtür sei sicher. Nach dem Gefahrenplan liege ja fast der gesamte Ort in der grünen Zone.

Erneut beginnt es zu schneien – diesmal heftiger als in den beiden Niederschlagsperioden zuvor. In Galtür riegelt die örtliche Lawinenkommission die Hochalpenstraße ab. Jetzt sind 3000 Feriengäste eingeschlossen. In den Tälern Westtirols sitzen insgesamt etwa 150 000 Urlauber fest.

Täglich fallen bis zu 50 Zentimeter Neuschnee. In Galtür, so werden die

schlagsperioden aus nordwestlicher Richtung, oft mit 50 oder 70 km/h.

Und Wind, so erklärt Stefan Margreth vom Schweizer Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos, der das Unglück später untersucht, sei nun mal der „Baumeister von Lawinen“.

Die Böen verfrachten lockeren Schnee aus der Gipfelregion auf die

Galtür zugewandte Flanke des Grieskopfs, vermutlich zusätzliche zwei Meter. So baut sich dort eine immer mächtigere Decke auf – mit einem kompliziert geschichteten Profil.



Mit etwa 300 km/h rast die Schneewalze in das Dorf hinein – auch in Ortsteile in der »grünen Zone«, die nach Auskunft der Behörden eigentlich als lawinensicher gelten

Meteorologen später errechnen, gehen in diesem Februar 375 Zentimeter Schnee nieder – mehr als seit über 100 Jahren in diesem Monat.

Später stellt sich zudem heraus, dass sich im Entstehungsgebiet der Lawine, hoch oben am Grieskopf, mehr

len heran; die Wissenschaftler kennen tausenderlei Formen – jedes ein einzigartiges Gebilde. Auf ihrem Weg durch die Atmosphäre verhaken sich die Eiskristalle zu Flocken und schweben auf Felder, Wege und Berghänge.

Jeder Neuschnee bildet eine eigene Schicht aus, die sich mehr oder weniger gut mit dem Altschnee darunter verbindet. Denn die Lufttemperatur bewirkt ständige Umwandlungsprozesse der Eiskristalle – Metamorphosen, die für die Festigkeit jeder einzelnen Schicht wie auch für den Zusammenhalt der gesamten Schneedecke entscheidend sind.

Liegt die Temperatur nur knapp unter null Grad Celsius, geben die Eiskristalle an ihren Spitzen Wasserdampf ab, der in ihren kälteren Zentren jedoch sofort wieder anfriert.

So formen sich runde und kompakte, etwa ein bis zwei Millimeter große Kristallkörner, die sich leicht miteinander verbinden: Der Neu-

**Eine Winzigkeit kann eine Lawine auslösen: eine Windböe, Sonnenstrahlen, sogar ein einzelnes Schneekorn**

Und so reisen viele Besucher an. Der Himmel ist fast immer blau, die Pistenverhältnisse sind ausgezeichnet.

Doch schon in der Nacht zum folgenden Mittwoch schlägt das Wetter um. Wieder hat sich über dem Atlantik eine „Nordwest-Staulage“ gebildet.

Schnee angesammelt hat, als eigentlich gefallen ist.

Die Aufzeichnungen der automatischen Wetterstation liefern dazu die Erklärung: Ein stürmischer Wind begleitet die starken Schneefälle des Februars. Er bläst in allen drei Nieder-



schnee „setzt“ sich gut, die Schneedecke wird fester und stabiler.

Herrscht hingegen strenger Frost, entsteht rasch ein größeres Temperaturgefälle innerhalb der Schneedecke: Ganz unten liegt die Temperatur durch die abstrahlende Erdwärme zumeist bei etwa null Grad. Von dort steigt Wasserdampf auf, der an den Eiskristallen der kälteren oberen Regionen anfriert und sie zu kantigen Formen von bis zu drei Millimeter Größe wachsen lässt.

Schließlich können becherartige Hohlkristalle entstehen, die bis zu zehn Millimeter messen, sehr zerbrechlich sind und sich wegen ihrer Gestalt und Größe kaum noch miteinander verbinden. Auf einer abschüssigen Fläche wird eine solche Schwachschicht schnell zur Rutschbahn – so als würde man zwischen zwei schräg gestapelte Holzbretter unzählige Kügelchen austreuen.

Zumal auf die an einem steilen Berghang übereinanderliegenden Schichten einer Schneedecke enorme Zug- und Scherkräfte einwirken. Wird die Spannung zu groß, kann eine Schwachschicht reißen oder einbrechen, auf ihr gleitet dann der obere Teil der Decke als Lawine oder Schneebrett zu Tal.

Am Grieskopf baut sich bis Mitte Februar durch die vielen Niederschläge eine Schneedecke mit zahlreichen Schichten auf. Das entdecken die Forscher vom SLF, als sie nach der Katastrophe ein Schneeprofil an der Anrisskante der Lawine erstellen.

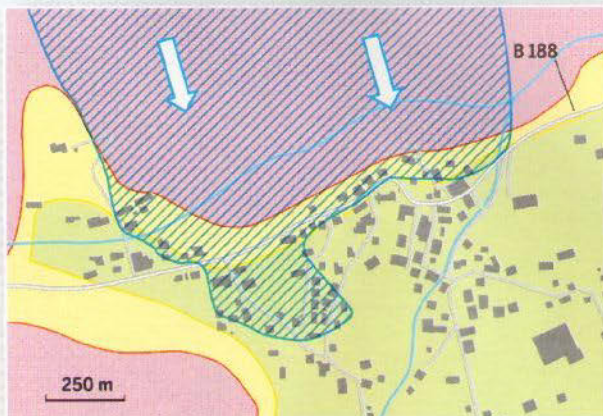
Die Schweizer rekonstruieren, dass sich schon Wochen vor dem Unglück im Schneedeckenprofil vom Grieskopf auf 2,70 Meter Höhe über dem Boden eine „Schmelzkruste“ ausgebildet hatte, die zur Gleitschicht für die spätere Unglückslawine wurde.

Gebildet hatte sie sich vermutlich Ende Januar, als es für einige Tage sehr mild war. Tagsüber schmolzen damals Eiskristalle zu einem Wasserfilm auf der Schneeoberfläche, nachts

gefroren sie wieder zu Eis – zur Schmelzkruste.

Auf diese Weise entstand eine Art Eislamelle, auf die im Februar Schicht um Schicht Neuschnee fiel. Zugleich fegte der Nordwestwind Schnee von der anderen Kammseite des Berges heran. Die Last wuchs, doch die Schwachschicht hielt ungewöhnlich lange.

**NACH DEM 17. FEBRUAR** schneit es in Galtür so stark, dass an Skifahren nicht



Die Lawinengefahr für Galtür wurde von einer Kommission falsch eingeschätzt. Denn die Schneewalze dringt nicht nur in die rote (keine Baugenehmigung) und gelbe Zone (verstärkte Hauswände) vor, sondern auch in die grüne Zone jenseits der Hochalpenstraße, die als sicher gilt



Nach dem Unglück sind die Eingeschlossenen zunächst auf sich allein gestellt. Die Retter können den Ort nicht erreichen

mehr zu denken ist. Der Sturm türmt mannshohe Schneeverwehungen im Ort auf, manche Urlauber können ihre Pensionen nicht mehr verlassen. Die Lawinenkommission tritt zweimal

am Tag zusammen, lässt kurze Bulletins am Gemeindeamt aushängen. Die Hochalpenstraße bleibt gesperrt.

Am 18. Februar setzt Rudi Mair vom Lawinenwarndienst in Innsbruck die zuvor abgesenkte Gefahrenstufe wieder auf vier herauf. Als am nächsten Tag 30 Zentimeter Schnee fallen und weitere Niederschläge prognostiziert werden, ahnt er, dass es zur Katastrophe kommen wird.

Er weiß nur nicht, wo.

16 bis 24 Stunden ist Mair jetzt täglich im Einsatz. Ihn erreichen ständig Anfragen von den 160 Lawinenkommissionen, die es in den 279 Gemeinden Tirols gibt. Doch von Innsbruck aus ist es unmöglich, Prognosen für einzelne Hänge zu treffen. Allein im hinteren Paznauntal gibt es etwa 60 Lawenstriche, aus denen sich jetzt jederzeit Schneewalzen lösen können. Dazu kommen zehn bis 15 weitere gefährdete Täler in ganz Tirol.

Am sichersten wäre es, die örtlichen Lawinenkommissionen würden die Urlauber in die Kellerräume der Pensionen schicken. Doch das hält niemand für realistisch.

Unmöglich auch, die 150 000 eingeschlossenen Menschen mit Helikoptern auszufliegen. Zumal sich das Wetter weiter verschlechtert. In Galtür sperrt die Lawinenkommission einige Wege im Ort – vertraut aber weiterhin darauf, dass eine Lawine nicht die grüne Zone treffen wird.

Weshalb es dennoch dazu kommt, das können sich die SLF-Männer später lange Zeit nicht erklären. Nach der Katastrophe berechnen sie, wie viel Schnee im Entstehungsgebiet der Lawine abgebrochen ist. Dazu vergleichen sie eine Karte der Gipfelregion mit Fotos, die sie unterhalb des Bergkamms gemacht haben und auf denen noch immer die Anrisskante der Schneewalze zu sehen ist.

Zwischen 2,30 und 3,50 Meter dick muss die Schneetafel gewesen sein, die sich am Unglückstag löste, 700 Meter breit und 100 bis 200 Meter lang. Das



entspräche 30 000 Tonnen Schnee, die da auf Galtür zustürzten – das Gewicht von 600 ICE-Waggons.

Doch als die Experten diesen enormen Wert in ihr Simulationsprogramm eingeben, erreicht die virtuelle Lawine in ihrem Modell den Ort mit einer viel zu schwachen Intensität. Irgendeine Berechnungsgröße kann nicht stimmen. War vielleicht die Beschaffenheit des Schnees von größerer Bedeutung, als sie bislang geglaubt haben?

In Galtür, so viel wissen die Forscher, ist eine Lawine aus trockenem Pulverschnee niedergegangen. Solch eine Staublawine, sagt der SLF-Mann Stefan Margreth, sei viel schwerer zu berechnen als eine Fließlawine, die sich aus dichtem, feuchtem Schnee bildet und wie ein mächtiger Strom an flachen Hängen zu Tal gleitet.

Denn die aufwirbelnde Wolke einer Staublawine habe kaum Bodenreibung, ihr Weg und ihre Dynamik ließen sich daher nur schwer am Computer simulieren.

Doch die SLF-Forscher haben Glück: Sie können für ihre Untersuchung des Galtür-Unglücks auf aktuelle Daten aus der Schweiz zurückgreifen.

In einem Tal bei Sion, im Südwesten der Schweiz, unterhält ihr Institut ein Versuchsgelände, in dem die Wissenschaftler künstliche Lawinen auslösen. Dort haben Kollegen von Stefan Margreth den Jahrhundertwinter 1999 für einen riskanten Feldversuch genutzt, den sie bereits vor den Ereignissen von Galtür geplant hatten.

Gegenüber einem tief eingeschnittenen Testhang verschanzten sie sich in einem Bunker mit 40 Zentimeter dicken Wänden aus Stahlbeton. Videokameras sollten jedes Detail aufzeichnen, Radarschirme einen Blick in das Innere der Schneewalze ermöglichen.

Dann ließen sie einen Helikopter mit einer Sprengladung aufsteigen.

Als das abgeworfene Dynamit zündete, löste sich im Hang eine mächtige Lawine.

Doch die Staubwolke, die auf den Bunker zudonnerte, war viel gewaltiger als erwartet: Sie ließ die massiven Wände erzittern, drückte die Stahltür ein. Die Forscher überlebten ihr Experiment, aber sie waren unter fünf Metern betonharten Schnees begraben – die Helfer mussten mit einer Kettensäge den Weg zu ihnen bahnen.



22 Menschen können die Helfer in Galtür lebend bergen, doch 31 andere sterben unter den gewaltigen Schneemassen. Sieben weitere Opfer gibt es am Tag darauf im Nachbardorf Valzur, als dort ebenfalls eine Lawine niedergeht

Die Analyse der Radarbilder ergab ein überraschendes Resultat: Die Staublawine bestand nicht nur aus zerstäubtem Schnee, sondern aus drei sehr unterschiedlichen Schichten.

Ganz unten schob sich eine massive Schicht aus dichtem Schnee vor-

Knollen wie auf einem Luftpolster zu Tal. Erst oberhalb dieser „Saltations-schicht“ zerstob als dritte Schicht eine bis zu 250 Meter hohe Staubwolke.

Zudem bewegte sich die künstlich ausgelöste Lawine viel schneller als zuvor berechnet: mit 288 km/h. Und sie war viel mächtiger. Denn die Bilder bewiesen, dass sie auf ihrer Sturzbahn fortwährend unberührte Schneemasen mit sich fortriss. So vergrößerte sie ihr Anfangsvolumen um mehr als das Doppelte.

Diese Daten nahm Stefan Margreth nun in seine Simulation auf. Ergebnis: Die Lawine vom Grieskopf muss auf ihrer Sturzbahn auf etwa 80 000 Tonnen Schnee angewachsen sein – nicht 600, sondern 1600 ICE-Waggons stürmten also auf Galtür zu. Und sie rasten viel rasanter abwärts als gedacht.

Jetzt zeigte sich auf dem Computer ein anderes Bild. Die Lawine erreichte Galtürs grüne Zone und schob sich über bewohntes Gebiet. Nun verstanden die Experten, was am 23. Februar 1999 tatsächlich geschehen war.

**AM UNGLÜCKSTAG** gilt in Galtür und Umgebung die höchste Lawinengefahrenstufe fünf. Seit sieben Tagen ist die Hochalpenstraße nun schon abgesperrt, sind die Menschen eingeschlossen in dem kleinen Ort.

Sie spazieren auf den wenigen noch freien Wegen umher oder sitzen in ihren Zimmern vor dem Fernsehgerät.

**Plötzlich verfinstert sich der Himmel. Es gibt keine Luft mehr zum Atmen, überall ist nur noch Schnee**

an. Darüber wirbelte eine Mischung aus leichtem Schnee und schweren „Schneeknollen“; Eiskristalle wurden am Boden dieser zweiten Lage förmlich zermahlen, darüber tanzten grobe

Um den Feriengästen ein wenig Abwechslung zu bieten, veranstaltet der Tourismusverband am Nachmittag des 23. Februar ein Fassdaubenrennen im Zentrum von Galtür. Wer mitmacht,



muss sich zwei gebogene Fassbretter unterschallen und einen kleinen Slalomparcours aus Bierkisten bewältigen. Hunderte Menschen säumen die Strecke zwischen Kirche und Gemeindeamt. Im dichten Schneetreiben sind die Fahrer kaum auszumachen, doch die Stimmung ist gelöst.

Kurz vor 16 Uhr endet das kleine Spektakel, jetzt sammeln sich viele Menschen um die improvisierten Glühweinstände. Niemand kann im Schneegestöber den Gipfel des Grieskopfs sehen, auf dem schon seit einem Monat die Last über der dünnen Schwachschicht anwächst.

An diesem Dienstag fallen noch einmal 30 Zentimeter Neuschnee. Der Wind bläst aus Nordwest und treibt zusätzlichen Schnee ins Anrissgebiet. Während der drei großen Niederschlagsperioden haben sich dort nun fünf bis sechs Meter Schnee angesammelt. Und weil zwischen den Niederschlägen die sonst sehr tiefe Lufttemperatur anstieg, konnte sich der Neuschnee besonders gut setzen. Sonst hätte sich vielleicht schon früher eine kleinere Lawine gelöst.

Eine Winzigkeit kann in einer so instabilen Situation die Katastrophe auslösen: eine Windböe, die über den Hang streicht; einfallende Sonnenstrahlen, die die Temperatur ansteigen lassen; sogar ein einzelnes zusätzliches Schneekorn.

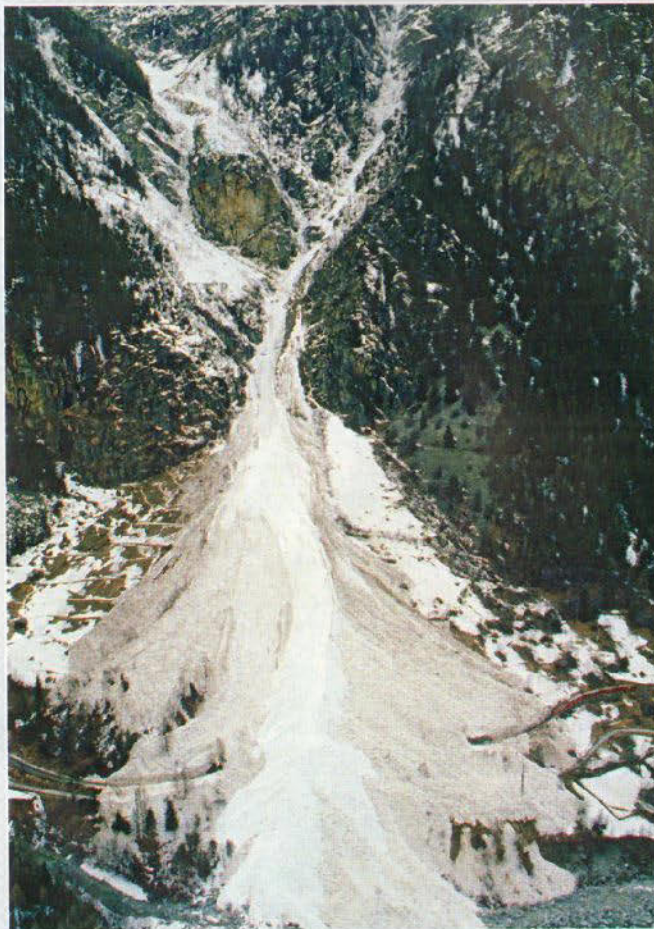
**UM 16.02 UHR** wird die Schneelast über der Schwachschicht zu schwer.

Jetzt bricht die Verbindung zwischen den Eiskristallen der drei bis vier Zentimeter dünnen Schmelzkruste, 2,70 Meter über Bodenniveau, und den darüberliegenden Schneemassen.

Über der Schmelzkruste sackt eine Tafel nach unten. Sie ist bis zu drei Meter mächtig und 140 000 Quadratmeter groß – fast so groß wie Galtür. Zugleich reißt auf einer Breite von

700 Metern die gewaltige Schneedecke ab. Die glatte Schmelzkruste wirkt jetzt auf dem bis zu 50 Grad steilen Felshang wie eine Gleitbahn. Auf ihr gerät die 30 000 Tonnen schwere Schneetafel sofort ins Rutschen.

Zuerst bildet sich eine Fließlawine: Die Schneetafel zerbricht in gewal-



Vielerorts rauschen Lawinen immer auf den gleichen Wegen talwärts – wie hier an einer Bahnstrecke in den Alpen. Allein auf die Trasse der Arlbergbahn in Österreich stürzten seit der Eröffnung 1884 bis heute mehr als 1700 Lawinen

tige Schollen, zerbricht dann in immer kleinere Brocken. Weil der Hang so jäh abfällt, zerstäubt der Schnee nach den ersten 300 Metern immer stärker.

Die Lawine besteht aus drei Schichten: Ganz unten fließt eine kompakte Schneemasse, ein bis zwei Meter mächtig. Darüber wirbelt eine zwei bis fünf Meter hohe Saltationsschicht. Oben stiebt eine Wolke aus feinen Schneekristallen 100 bis 150 Meter empor.

Felsrücken teilen die Schneewalze auf ihrer Sturzbahn in drei Ausläufer. Der östlichste donnert Richtung Sportplatz, richtet dort aber überwiegend nur leichte Gebäudeschäden an.

Die beiden anderen Lawinenarme steuern mit etwa 300 km/h auf die Ortsteile Frühlmessgut und Winkl zu und reißen immer mehr Schnee mit. Als die Lawine nach 50 Sekunden die Hochalpenstraße quert, hat sich ihr Volumen auf 80 000 Tonnen Schnee gesteigert.

Um 16.03 Uhr registriert die automatische Wetterstation in Galtür, dass der Wind plötzlich mit 110 km/h bläst. Dann fällt sie aus.

Mit einem lauten Knall trifft ein Lawinenarm landwirtschaftliche Gebäude im Frühlmessgut, ein anderer Häuser im Winkl, nur etwa 300 Meter vom Schauplatz des Fassdaubenrennens entfernt. Mitten in der grünen Zone. Es ist Zufall, dass das Dorfzentrum und die vielen Menschen dort verschont bleiben.

Jetzt wirken die festeren Schneebröcken der Saltationsschicht wie Geschosse, ihre Wucht lässt Häuser einstürzen. Zudem entwickelt die Wolke einen Luftdruck von bis zu fünf Tonnen pro Quadratmeter. Wände sind dieser Kraft nicht gewachsen: Elf Gebäude drückt die Lawine ein, weitere 17 beschädigt sie.

Doch es bilden sich auch Wirbelzonen der Ruhe: Fünf Meter neben einem völlig zerstörten Haus lässt die Lawine einen Vogelbauer auf einem Zaun unversehrt. Anderswo reißt sie Trümmer, Dachziegel und Rohre mit sich fort, zerlegt einen Holzschuppen, demoliert 102 Autos.

Einige Menschen in Galtür haben den Knall gehört, andere verspüren in ihrem Zimmer plötzlich die Druckwelle oder vernehmen ein pfeifendes Geräusch wie vom Rauschen eines Wildbachs.



Ein Hotelier sieht die Lawine auf sich zuschießen, als riesige Welle „wie in Hawaii-Filmen“. Er kann sich durch einen Sprung zur Kellertreppe retten.

Der ohnehin düstere Himmel verfinstert sich. Es ist, als ob ein gewaltiger Schneesturm durch Galtür hindurchfährt – aus allen Richtungen gleichzeitig. Eisiger Staub dringt in alle Ritzen der Kleidung, nimmt den Atem.

„Die Luft ist nicht mehr Luft, sondern Schnee. In den Wimpern, in den Ohren, überall Schnee“, berichtet eine Überlebende später.

Die Druckwelle wirbelt Menschen durch die Luft oder lässt sie erstickend. In einer Gasse im Winkl begräbt der Schnee mehrere Menschen unter sich.

„Wie Salven aus einem Maschinengewehr“, so Stefan Margreth, reißen Steine und Trümmer aus der Lawine die Hausfassaden auf.

Dann, nach ein bis zwei Minuten, ist es plötzlich still. Und der Sturm vorbei.

Um 16.05 Uhr geht beim Lawinenwarndienst in Innsbruck eine erste Meldung über die Katastrophe ein. Doch weil es noch immer stürmt und

aus Galtür und Touristen im betonharten Schnee nach Vermissten.

Es ist ein Wettlauf gegen den Tod. Wer nach 15 Minuten geborgen wird, der hat eine gute Chance, zu überleben. Mit jeder weiteren Viertelstunde halbiert sich die Überlebenschance.

Von den 53 Verschütteten können die Helfer 22 Menschen lebend retten;



Donnernd stürzt eine Lawine zu Tal. Im Schneewinter 1998/99 richteten in Österreich und der Schweiz mehr als 1000 Lawinen zum Teil schwere Schäden an, fast 90 Menschen verlieren ihr Leben

den letzten der Überlebenden befreien sie nach drei Stunden aus dem Schnee: Der Mann hatte sich ein Atemloch freihalten können.

Erst am Morgen darauf klart das Wetter auf; Rettungshubschrauber fliegen Verletzte in ein Krankenhaus und evakuieren vom 25. Februar an Tausende Touristen.

IN SEINEM GUTACHTEN konstatiert Stefan Margreth später, im Zonenplan für Galtür sei das Gefahrenpotenzial unterschätzt worden. Auch habe die örtliche Lawinenkommission die Lage zu optimistisch beurteilt, wenn auch nicht fahrlässig: Es sei nicht möglich gewesen, das extreme Ausmaß dieser Lawine vorherzusehen. Am 10. Januar 2001 stellt das Landgericht Innsbruck alle Verfahren gegen die Mitglieder der Kommission, den Tiroler Landes-

hauptmann sowie den Bezirkshauptmann ein.

Allein in Tirol sterben im Jahrhundertwinter 1998/99 weitere 13 Menschen durch Lawinen. In den Schweizer Alpen fordern mehr als 1200 Lawinen insgesamt 36 Opfer.

Heute schützen zwei massive Mauern Galtür von Norden her; sie sind 129 und 350 Meter lang und

bis zu 19 Meter hoch. Im Anrissgebiet der Lawine hoch oben am Grieskopf ließ die Gemeinde Verbauungen aus Stahl errichten, die künftig Schneemasen stabilisieren sollen, und am Hang Bäume aufforsten.

Die österreichischen Behörden haben ihr Vorwarnsystem ausgeweitet – allein in Tirol gibt es heute etwa 100 automatische Wetterstationen. Die aufgezeichneten Daten sollen den Lawinenkommissionen bei der Entscheidung helfen,

welche Straße abzusperren ist, noch ehe Tausende Urlauber in einem gefährdeten Ort eingesperrt sind.

Eine Katastrophe wie die vom Februar 1999 sei in Galtür wohl nicht mehr möglich, sagt Stefan Margreth. Doch es bleibe ein Risiko; die Naturgefahr durch Lawinen sei letztlich unkalkulierbar. Daran änderten auch die modernen Computersimulationen der Lawinenforschung nichts – allenfalls erlaubten sie es, ein Unglück nachträglich besser zu verstehen.

„Jeder Lawinenabgang“, so Margreth, „ist ein komplexer und einmaliger physikalischer Prozess, den man nur ansatzweise kennt und wohl auch in Zukunft nicht bis in alle Details erfassen wird.“ □

Ralf Berhorst, 42, ist Journalist in Berlin und schreibt regelmäßig für GEOkompakt. Wissenschaftliche Beratung: Stefan Margreth, Institut für Schnee- und Lawinenforschung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Davos.

Literatur: Walter Ammann, Othmar Buser, Usch Vollenwyder: „Lawinen“, Birkhäuser.

## MEMO | LAWINEN

» **LAWINEN ENTSTEHEN**, indem eine Schneetafel durch äußere Einflüsse auf einer schwachen Schicht abgleitet.

» **VOR DER SCHNEEWALZE** wird die Luft gestaucht, es entstehen starke Winde.

» **EINE VIERTELSTUNDE** kann ein Mensch im Schnee überstehen, jede weitere halbiert die Überlebenschance.

schneit im Paznauntal, können die Rettungshubschrauber, die im 30 Kilometer entfernten Landeck aufsteigen, nicht landen.

So müssen sich die Eingeschlossenen selbst helfen. Mit Sondierstäben und Schaufeln suchen Rettungskräfte





Jetzt im Handel

# Von Unter den Linden bis über den Dächern: das neue Berlin.

In dieser Ausgabe

## VIP-Tipps

Bekannte Gesichter, unbekannte Adressen.

## Berliner Gefühl

Die Stadt der flüchtigen Wunder.

## Angies Palast

Hinter den Kulissen des Kanzleramts.





# Die Enträtselung der Erde

Seit zweieinhalb Jahrtausenden ergründen Gelehrte, wie unser Planet aufgebaut ist

Text: Sally Wichmann; Jan Wehberg (Kasten)

## um 600 v. Chr.

Der griechische Naturforscher Thales von Milet behauptet (so später Aristoteles), dass die Erde aus dem Wasser entstanden sei und auf diesem schwimme. Damit liefert er einen Anstoß zum wissenschaftlichen Verständnis der Welt.

## um 600 v. Chr.

Neben zahlreichen philosophischen Theorien entwickelt der Grieche Xenophanes wissenschaftliche Vorstellungen: Inspiriert durch Funde von fossilen Meerestieren im Inland, glaubt er an einen weltweiten periodischen Wechsel von Wasser zu Erde und umgekehrt.

## um 400 v. Chr.

Der griechische Philosoph Platon vermutet, dass das Erdinnere von einem Geflecht aus Adern, Röhren und Höhlen durchzogen ist, in denen Wasser, Feuer, Schlamm und Luft fließen und die Meere und Flüsse an der Erdoberfläche speisen.

## um 340 v. Chr.

Der Grieche Aristoteles schreibt das erste Buch, ein umfassendes vierbändiges Werk, über das Wetter: die *Meteorologica*. Aristoteles ist von



Aristoteles schreibt das erste Buch über das Wetter, die »Meteorologica«

der Kugelgestalt der Erde überzeugt: Ihm fällt auf, dass bei ankommenden Segelschiffen immer zuerst die Segel sichtbar sind – ganz gleich, aus welcher Richtung sich das Fahrzeug nähert – und dass bei Mondfinsternissen die Erde stets einen kreisrunden Schatten auf den Mond wirft. Die meisten Thesen seiner meteorologischen Abhandlung werden fast 2000 Jahre lang Bestand haben.

## um 240 v. Chr.

Mithilfe der Einfallswinkel von Sonnenstrahlen an zwei Orten – nämlich Syene (dem heutigen Assuan) und Alexandria – sowie dem Abstand zwischen den beiden Orten errechnet Eratosthenes von Kyrene den Umfang der Erde und kommt dem

heute bekannten Erdumfang von 40 075 Kilometern erstaunlich nah. Eratosthenes prägt außerdem den Begriff »Geographie«.

## 77 n. Chr.

Neben vielen weiteren Büchern verfasst der römische Staatsbeamte und Geschichtsschreiber Plinius der Ältere die 37-bändige Enzyklopädie *Naturalis historia*. Darin fasst er das Wissen der Antike zu verschiedenen Themen, unter anderem zur Geographie und Mineralogie, zusammen. Er beschreibt die Beschaffenheit von Metallen und Gesteinen sowie die Geogra-

phie Europas, Afrikas und Asiens. Das gesamte Mittelalter hindurch bleibt die *Naturalis historia* Grundlage naturkundlichen Wissens.

## 79 n. Chr.

Der Römer Plinius der Jüngere schildert in einem Brief an den römischen Historiker Tacitus den Ausbruch des Vesuv, bei dem sein Onkel, Plinius der Ältere, ums Leben kommt. Er beschreibt detailliert, wie zunächst eine pinienförmige Wolke aufsteigt, wie sich das Meer plötzlich vom Strand zurückzieht und schließlich Feuersäulen aus dem Vesuv

schießen, während Asche und Bimsstein den Himmel verdunkeln und den Boden bedecken. Noch heute werden ähnliche, explosionsartige Vulkanausbrüche »Plinianische Eruptionen« genannt.

## um 132 n. Chr.

In China erfindet der Forscher Chang Heng das erste Gerät zur Messung von Erdbeben. Der genaue Mechanismus im Inneren dieses Seismoskops ist bis heute ein Rätsel. Bei Erschütterungen fällt eine bronzen Kugel aus einem von acht Drachensäulen, die an der Außenseite des



Den Ausbruch des Vesuv im Jahr 79 n. Chr. schildert Plinius der Jüngere so detailgetreu, dass unter Geologen noch heute der Begriff »Plinianische Eruption« gebräuchlich ist



Gefäßes in die acht Hauptrichtungen des Kompasses zeigen. Darunter sitzt jeweils eine Kröte, die die Kugel auffängt. Die Kröte, in deren Maul sie liegt, zeigt die Richtung der Erdbebenquelle an. Selbst weit entfernte, von Menschen in seiner Umgebung kaum wahrnehmbare Beben soll Chang Hengs Seismoskop präzise registriert haben.

#### um 1000

Der arabische Arzt und Philosoph Avicenna überlegt, wie Gebirge entstehen: Er nimmt an, dass sie sich bei schweren Erdbeben durch das „Aufbäumen“ von Gesteinschichten formen. Außerdem macht er Luftstrom im Erdinneren sowie Wind und Wasser für ihre Entstehung verantwortlich.

#### um 1250

Auch der deutsche Naturforscher, Philosoph und Theologe Albertus Magnus vermutet, dass Gebirge die Resultate seismischer Aktivitäten sind. Als Ursache für die Gebirgsbildung sieht er im Inneren der Erde aufgestaute Dämpfe an, die beim Entweichen den Boden anheben.

#### um 1514

Nicolaus Copernicus erkennt, dass sich die Erde täglich um ihre Achse dreht und innerhalb eines Jahres die Sonne umrundet. Mit der Annahme, dass nicht die Erde,

sondern die Sonne den Mittelpunkt der Planetenbahnen bildet, revolutioniert der polnische Astronom das Bild vom Universum und bewirkt ein tiefes Umdenken in den Naturwissenschaften.

#### 1544

Der deutsche Arzt und Naturforscher Georgius Agricola, der als Begründer der Bergbaukunde gilt, schreibt die Kräfte, die zur Bildung und Zerstörung von Bergen führen können, in seinem Werk *De ortu et causis subterraneorum* Wasser und Wind zu. Er nimmt zudem an, dass es zu Vulkanismus kommt, wenn



Die Erde ist nicht der Mittelpunkt der Welt, verkündet der Astronom und Domherr Copernicus. Sie ruht nicht, sie bewegt sich um die Sonne – eine wissenschaftliche Revolution

Schwefelkieslager durch Verwitterung erhitzt werden.

#### 1609

Der italienische Gelehrte Galileo

Galilei schaut zum ersten Mal durch ein von ihm selbst gebautes, starkes Teleskop. Bald darauf



Als Galileo Galilei die Venus durch sein Fernrohr betrachtet, erkennt er Phasen von der Scheibe bis zur Sichel – wie beim Mond. Der Planet muss also um die Sonne kreisen

entdeckt er Hinweise, die Copernicus' Theorie bestätigen: Er sieht vier Monde, die den Jupiter umkreisen – und sozusagen ein Mini-Sonnensystem bilden. Außerdem erkennt Galilei, dass die Venus Lichtphasen durchläuft wie der Mond: von einer fast vollständig erleuchteten Scheibe bis zur schmalen Sichel. Das lässt sich nur mit der Annahme erklären, dass die Venus um die Sonne kreist.

#### 1644

Evangelista Torricelli, ein italienischer Physiker und Mathematiker, Schüler Galileis, erfindet das Barometer: ein Instrument zur Messung des Luftdrucks. Er füllt ein an einem Ende verschlossenes Glasrohr zur Hälfte mit Quecksilber, verschließt mit dem Finger die obere Öff-

nung, dreht es um und stellt es in eine Schüssel mit Quecksilber. Das Quecksilber fließt bis zu einem bestimmten Stand aus dem Röhrchen in die Schale. Torricelli erkennt, dass die Höhe des Quecksilberstands in dem Glasrohr vom Druck in der Atmosphäre abhängt und dass dessen Schwankungen die Veränderungen des Luftdrucks widerspiegeln.

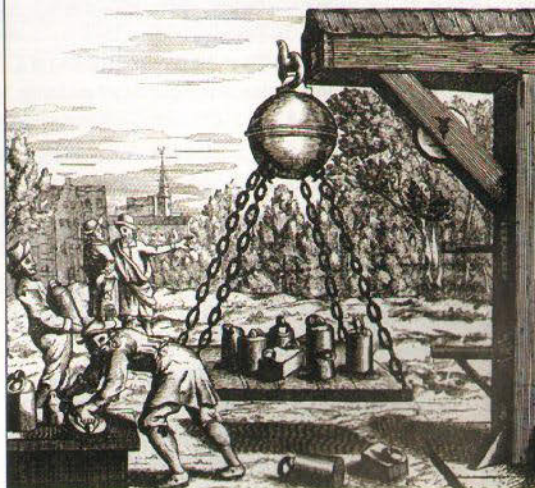
#### 1660

Mit einem Barometer und mehreren Thermometern registriert der deutsche Physiker Otto von Guericke über Jahre hinweg das Wetter. Als er einen besonders starken Luftdruckab-

Mit dieser ersten wissenschaftlich begründeten Prognose wird von Guericke zum Wegbereiter der Wettervorhersage. Er erkennt zudem, wie Wind entsteht: als Folge von Luftdruckgegensätzen, die sich auszugleichen suchen.

#### 1667

Als der dänische Arzt und Naturforscher Niels Stensen (Nicolas Steno) den Kopf eines großen Hais sezziert, stellt er fest, dass die Zähne des Fisches Versteinerungen gleichen. Er schließt, dass es sich bei Fossilien um die Überreste von Lebewesen handeln muss, die in ursprünglich weiches Gestein eingeschlossen wurden, das später er-



Otto von Guericke demonstriert, dass zwei Halbkugeln, zum Vakuum leer gepumpt, Gewichten widerstehen – weil der Luftdruck sie aneinanderpresst

fall beobachtet, kündigt er ein Unwetter an, das sich wenige Stunden später tatsächlich einstellt. So bestätigt sich seine Theorie, wonach Luftdruck und Wetterveränderungen in Verbindung stehen.

härtete. Daher müssen tiefer liegende Gesteinschichten älter sein als die oberen, folgert Stensen.

#### 1785

Der schottische Geologe James



Hutton erklärt, wie stetig arbeitende geologische Prozesse die Erde formen. Drei Jahre später wird sein Vortrag in erweiterter Form unter dem Titel „Theory of the Earth“ veröffentlicht. Er glaubt, dass diese Vorgänge zu seiner Zeit ebenso wirken wie in der Vergangenheit. Und weil er weder Hinweise für einen Anfang noch Anzeichen auf ein Ende finden kann, nimmt er an, dass schier endlose Zeiträume vorhanden sind. Damit widerspricht er der verbreiteten Theorie, nach der die Erde in kurzer Zeit von großen Katastrophen geformt wurde und – aus Angaben der Bibel errechnet –

nicht älter als 6000 Jahre ist. Hutton gilt vielfach als Begründer der modernen Geologie.

#### 1806

Anhand einer von null bis zwölf reichen Skala nimmt der britische Admiral Sir Francis Beaufort eine Einstufung von Windstärken auf See vor. Er orientiert sich vor allem an Veränderungen der Meereswellen: Bei null ist das Meer so glatt wie ein Spiegel, bei acht werden die weißen Schaumkronen der brechenden Wellen übers Meer geweht – und zwölf bedeutet Orkanstärke, bei der das Meer von Schaum und Gischt voll-



Sir Francis Beaufort erfindet eine Skala, die die Winde nach ihrer Stärke einteilt und noch heute gilt. Stärke zwölf bedeutet Orkan

ständig weiß ist. Die Beaufort-Skala wird später für das Festland übernommen und noch heute in Wettervorhersagen verwendet.

#### 1830

Der Schotte Charles Lyell veröffentlicht den ersten Band seines Hauptwerks, nachdem er auf Reisen quer durch Europa Beweise für seine Theorie sammeln konnte. Diese besagt, dass die Erde in Hunderten Millionen Jahren durch immer gleich bleibende, allmähliche Prozesse geformt wurde. Dieses „Aktualisierungsprinzip“ fasst er in den „Principles of Geology“ zusammen. Es wird von vielen als das wichtigste geologische Werk aller Zeiten angesehen und beeinflusst etwa Charles Darwin bei der Entwicklung seiner

Evolutionstheorie. Lyell gilt als Leitfigur der Geologie des 19. Jahrhunderts.

#### 1847

Als Sekretär der Smithsonian Institution in den USA richtet der Physiker Joseph Henry ein Netz aus Wetterstationen ein. Jeden Tag laufen bei ihm Daten aus vielen Orten des Landes zusammen. Nachdem die Forscher diese analysiert haben, zeichnen sie eine Wetterkarte und schicken einen Bericht an die „Washington Evening Post“. 1869 sind dem amerikanischen Wetterdienst bereits 350 Wetterstationen angeschlossen.

## Große Katastrophen der Geschichte

vor ca. 74 000 Jahren	<b>ERUPTION DES TOBA AUF SUMATRA</b> Der heftigste Vulkanausbruch der vergangenen zwei Millionen Jahre schleudert gewaltige Mengen Asche und Staub in die Atmosphäre. Die folgende weltweite Abkühlung überlebt möglicherweise nur ein kleiner Teil der Menschheit.
79 n. Chr.	<b>AUSBRUCH DES VESUV</b> Vulkanischer Staub, Asche und Gestein begraben die römische Stadt Pompeji. Mindestens 3360 Menschen sterben.
526	<b>ERDBEBEN IM BYZANTINISCHEN REICH</b> Ein schwerer Erdstoß fordert 250 000 Menschenleben in der Stadt Antiochia (heute das türkische Antakya).
1362	<b>STURMFLUT AN DER NORDSEEKÜSTE</b> Die „Grote Mandränke“ („Große Manntränke“) fordert nach zeitgenössischen Chroniken 100 000 Tote. Auch wenn die tatsächliche Zahl wesentlich niedriger liegen dürfte, sind die Folgen verheerend: Ganze Dörfer verschwinden.
1556	<b>ERDSTOSS IN ZENTRALCHINA</b> In der Provinz Shaanxi kommen bei einem der folgenreichsten Beben der Geschichte 830 000 Menschen ums Leben. Unzählige Wohnhöhlen brechen zusammen und begraben die Bewohner unter sich.
1815	<b>AUSBRUCH DES TAMBORA IN INDONESIEN</b> Infolge der stärksten Eruption in historischer Zeit verlieren vermutlich 100 000 Menschen ihr Leben. Staub und Aerosole führen weltweit zu Wetteranomalien: 1816 geht in Europa und Amerika als das „Jahr ohne Sommer“ mit Ernteausfällen und Hungersnöten in die Geschichte ein.
1883	<b>AUSBRUCH DES KRAKATAU IN INDONESIEN</b> 36 000 Menschen sterben, als der Vulkan südlich von Sumatra explodiert. Die Eruption türmt Wellen auf, die anderthalb Tage später die französische Normandie erreichen.
1887	<b>ÜBERSCHWEMMUNG IN CHINA</b> Eine der fatalsten Naturkatastrophen der Geschichte nimmt ihren Lauf, als der Gelbe Fluss über die Ufer tritt: Fast eine Million Menschen sterben an den direkten Folgen der Flut.
1920	<b>ERDBEBEN IN CHINA</b> Ein Beben mit einer Stärke von 7,8 erschüttert den Norden Chinas und löst gewaltige Erdbeben aus. Mindestens 200 000 Menschen verlieren ihr Leben.
2004	<b>SEEBEBEN UND TSUNAMI IM INDISCHEN OZEAN</b> Ein Seebeben vor der indonesischen Insel Sumatra mit einer Stärke von 9 – eine der stärksten je gemessenen Magnituden – löst eine meterhohe Flutwelle aus. An den Küsten von Sumatra, Thailand, Indien, Sri Lanka, den Malediven und Ostafrika sterben mindestens 230 000 Menschen.
2008	<b>ZYKLON IN MYANMAR (BIRMA)</b> Ein tropischer Wirbelsturm hinterlässt eine Schneise der Verwüstung im Irawadi-Delta. Mindestens 84 000 Menschen werden getötet.



### 1880

Der englische Geologe John Milne und seine Kollegen entwickeln in Japan den ersten modernen Seismographen: Darin wird der Lichtstrahl einer Lampe gespiegelt und durch zwei feine Schlitzte auf lichtempfindliches Diagrammpapier geleitet. Wenn der Boden schwankt, zittert auch der Licht-



Ein Seismograph zum Messen von Erdbebenwellen aus dem Jahr 1885, gebaut nach Entwürfen von John Milne

strahl und zeichnet das Ausmaß des Bebens auf. Damit liefert Milne einen der wichtigsten Beiträge zum Verständnis von Erdbeben.

### 1883

Der erste Band des umfassenden Werks „Das Antlitz der Erde“ des österreichischen Geologen Eduard Suess wird veröffentlicht – dessen letzter Band 1909 erscheint. Darin erklärt Suess die Bildung von Gebirgen und Meeren durch zyklische Bewegungen der Erdkruste. Als Ursache vermutet er ein allmähliches Abkühlen der

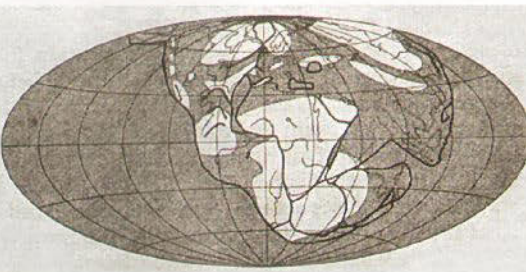
Erde: Dadurch schrumpfe sie, und die Erdkruste ziehe sich immer weiter zusammen. Gleichzeitig würden auch außergewöhnliche, katastrophale Ereignisse die Erdoberfläche formen. Suess nimmt an, dass Indien, Südamerika, Afrika, Australien und die Antarktis einst zu einem Superkontinent vereint waren und nennt ihn „Gondwana-Land“. Den ehemaligen Ur-Ozean tauft er Tethys, dessen Überrest das heutige Mittelmeer darstellt.

### 1890

Der schwedische Chemiker Svante Arrhenius beschreibt als einer der Ersten den Treibhauseffekt: Er errechnet, dass die Temperatur der Atmosphäre um vier bis sechs Grad Celsius steigen würde, sollte sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentration verdoppeln (was sich später als nicht ganz korrekt herausstellen wird).



Ernest Rutherford erforscht den radioaktiven Zerfall und legt dar, wie sich das Phänomen als Zeitmesser nutzen lässt



Alfred Wegener erkennt, dass die Kontinente der Erde perfekt zueinander passen. In einer Publikation stellt er 1912 dar, dass sie einst eine einzige große Landmasse gebildet haben und dann auseinandergedriftet sind

Dies bereitet Arrhenius allerdings keine Sorgen: Er meint, das wärmere Klima würde das Pflanzenwachstum anregen und somit mehr Nahrung für die Menschen liefern.

### 1903

Der neuseeländische Forscher Ernest Rutherford beschreibt den radioaktiven Zerfall anhand der Halbwertszeit – jener für einen Stoff immer gleich bleibenden Zeit, nach der die Hälfte der Atome dieser Substanz zerfallen ist und neue Elemente entstehen. Schon bald erkennt Rutherford

die Möglichkeit, mithilfe des radioaktiven Zerfalls das Alter der Erde zu bestimmen.

### 1909

In 30 bis 40 Kilometer Tiefe breiten sich Erdbebenwellen plötzlich schneller aus, entdeckt der kroatische Wissenschaftler Andrija Mohorovičić. Er schließt daraus, dass sich dort die Grenze zwischen Erdkruste und Erdmantel befindet. Bald darauf bestätigen andere Wissenschaftler seine Vermutungen: sie registrieren diese heute „Mohorovičić-Diskontinuität“ ge-

nannte Grenze unter allen Kontinenten und Meeren.

### 1912

Der deutsche Meteorologe Alfred Wegener erkennt, dass sich geologische Strukturen, wie etwa Gebirgsketten oder Hochebenen, über Ozeane hinweg auf den Landteilen entsprechen und die Ränder der Kontinente verblüffend gut zusammenpassen. Deshalb nimmt er an, dass alle Kontinente einst zum Superkontinent Pangaea vereint waren und später auseinandertrieben. Allerdings erkennt Wegener nicht den Mechanismus, der die Kontinente in Bewegung setzen könnte. Daher bleibt seine Theorie der Kontinentalverschiebung für einige Jahrzehnte umstritten.

### 1913

Mithilfe der Radioaktivität bestimmter Elemente in Gesteinen berechnet der britische Geologe Arthur Holmes das Alter unseres Planeten. Er kommt dabei auf 1,6 Milliarden Jahre und liegt damit näher am später ermittelten tatsächlichen Alter der Erde von rund 4,5 Milliarden Jahren als irgendjemand zuvor. 1928 schlägt er einen Mechanismus vor, der Wegeners Theorie der Kontinentalverschiebung plausibel macht: Konvektionsströme im Erdmantel setzen die Kontinente in Bewegung.



**Titel:** Olivier Grunewald

**Editorial:** Werner Bartsch für GEOkompakt: 3 o.; Katrin Trautner: 3 u.

**Inhalt:** Olivier Grunewald: 4 o.; North Wind Picture Archives/akg-images: 4 m. l.; N. Smiley/Getty Images: 4 m. r.; AFP/Getty Images: 4 u. l.; J. Osborne/NYT/Redux/laif: 4 u. r.; Carlos Gutierrez/UPI/laif: 5 o.; NOAA: 5 m.; Chien-Min Chung/Aurora Photos/Bilderberg: 5 u.

**Die Kraft aus der Tiefe:** Olivier Grunewald: 10–29

**Der Tag, an dem die Welt im Meer versank:** Granger Collection/ullstein bild: 54; Patrick Le Floch/Hoa-qui/eyedea/laif: 55; London Illustrated News/Bridgeman Art: 56; Mary Evans/Interfoto: 57; Lynette Cook/SPL/Agentur Focus: 58; aus „Kakatau 1883“ von Tom Simkin und Richard S. Fiske, Smithsonian Institution, 1983: 59 u.; 61; North Wind Picture Archives/akg-images: 60; Mary Evans/Interfoto: 62; CRI/Nancy Lorraine/Hoa-qui/eyedea/laif: 63; Charles O'Rear/Corbis: 64

**Am Puls des Planeten:** Carsten Peter: 66–69; George Steinmetz/Corbis: 70/71; J. Osborne/NYT/Redux/laif: 72; Maurice Weiss/Ostkreuz: 73 o.; Thorsten Naeser/Photoplexus: 73 u.; Amin Akhtar/laif: 74 o.; Peter Essick/Aurora Photos/Bilderberg: 74 u.; Marc Steinmetz/Visum: 75

**Das Rumoren aus der Tiefe:** Chien-Min Chung/Aurora Photos/Bilderberg: 76–79 + 83–85; Charly Kurz/laif: 80; The New York Times/Redux/laif: 80/81; Peter Essick/Aurora Photos/Bilderberg: 80 u. r., 81 o. r. + u. l.

**Wenn Gebirge im Meer verschwinden:** World Perspectives/Getty Images: 88 o.; David Edwards/National Geographic Stock: 88 u.; Mike Dembeck/picture-alliance: 89;

**Erosion im Zeitraster:** Reuters/ullstein bild: 90 o.; Kpa/picture-alliance: 90 u.; Berthold Steinhilber/laif: 91

**Die Baumeister des Planeten:** Alamy/Mauritius Images: 92 o.; Frans Lanting/Corbis: 92 u.; Ethan Daniels/WaterFrame: 93

**Unter der Last des eisigen Panzers:** Franco Barbagallo/laif: 94 o.; Colin Monteath/Hedgehog House/Minden Pictures/Picture Press: 94 u.; Jean E. Roche/Nature Picture Library: 95

**Die Macht der Feuerwalzen:** Fred Hirschman/Science Faction/Corbis: 96 o.; Alamy/Mauritius Images: 96 u.; H. J. Burkard/Bilderberg: 97

**Der Atem der Erde:** AFP/Getty Images: 98/99; JSC/UCSP/JPL/NASA: 100/101; SPL/Agentur Focus 102/103; Michael Martin/laif: 103 o.; Wittmaack/Wehnes/Heinzmann: 103 u.; Gavin Pretor-Pinney: 104

**Wenn der Himmel explodiert:** Carlos Gutierrez/UPI/laif: 106/107; Jörg Modrow/laif: 109

**Im Sog der Wolkenturbine:** NASA/AP Photo: 114/115; Stringer/AFP/Getty Images: 116; NOAA/Getty Images: 117; Reuters/ullstein bild: 118; David J. Phillips/Getty Images: 119 l.; Bob Pearson/epa/picture-alliance: 119 r.; N. Smiley/Getty Images: 120/121; Reuters/ullstein bild: 123 o.; Chris Graythen/Getty Images: 123 u.; www.extremestability.com: 124/125; Jim Olive/Polaris/laif: 126; Reuters/ullstein bild: 127; Eric Nguyen/Corbis: 128

**Die Macht der Wogen:** Clark Little: 130/131+136/137; English Heritage/NMR: 132; Philippe Huguen/AFP/Getty Images: 133; Foto Pollex/action press: 134; Jean Claude Morchetti/REA/laif: 135; NOAA: 138 l.; Solo Syndication/action press: 138 r.

**Tod im Schnee:** Christophe Boisvieux/Corbis: 140 (Hintergrundbild); Corbis Sygma: 140; dpa/picture-alliance: 141, 142, 144; Bernhard Grossdruck/action press: 143 u.; Sam Abell/National Geographic/Getty Images: 145; Fabrice Coffrini/AFP/Getty Images: 146

**Die Enträtselung der Erde:** Erich-Lessing/akg-images: 148 o.; akg-images: 148 u., 149 u. l. + u. r.; Orsi Battaglini/akg-images: 149 o.; Science Museum/SS-PL/Interfoto: 150, 151 o. l. + u.; United Archives/picture-alliance: 151 o. r.; MP/Leemage/picture-alliance: 152; AOE Medialab/ESA: 153 o.; dpa/picture-alliance: 153 u.

**Vorschau:** Holly Wilmet/Aurora Photos: 154, 155 o. l. + o. r.; Anne Schönharth/Ostkreuz: 155 u. l.; Susan Rubin/Getty Images: 155 m. m.; Kim Taylor/Nature Picture Library: 155 u. m.; Pawel Jaszczuk/Anzenberger: 155 u. r.

**Illustrationen und Info-Grafik:**

Jochen Stuhmann für GEOkompakt: 4; 8/9; 31; 33–36; Tim Wehrmann für GEOkompakt: 38–51; 82; 89; 91; 95; 122; Karsten Laaker für GEOkompakt: 32; 49; 93; 110/111; Rainer Harf: 97

**Karten:**

Rainer Droste: 30; 59; 143  
Stefanie Peters: 91; 93  
Christian Kuhlmann: 89; 95; 97  
Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft: 86

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.  
© GEO 2009, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

**1948**

Die US-Forscher Marie Tharp und Bruce Heezen beginnen, den Meeresboden mit einer neuen Technik zu vermessen: dem Sonar. Dabei werden ausgesandte Schallwellen vom Grund reflektiert und wieder aufgefangen. Tharp und Heezen entdecken und kartieren ein weltweites System von Gebirgsketten am Meeresgrund: die ozeanischen Rücken. Ihre Ergebnisse bestätigen die Theorie der Plattentektonik und zeigen, dass sich der Meeresboden von den zentralen Bergrücken ausbreitet und die Kontinente in Bewegung sind. 1977 erscheint ihre Weltkarte des Meeresbodens.

**1956**

Der amerikanische Geochemiker Clair Patterson bestimmt das Alter der Erde auf 4,55 Milliarden Jahre plus/minus 70 Millionen. Anhand des Verhältnisses bestimmter Bleivarianten, die beim radioaktiven Zerfall von Uran entstehen, errechnet er mithilfe der bekannten Halbwertszeiten die Dauer des bisherigen Zerfalls und somit das Alter der Meteoriten und geht davon aus, dass Meteoriten und Erde zur gleichen Zeit entstanden sind.

**1962**

Einen Beitrag zur Anerkennung von Wegeners Theorie der Kontinentalverschiebung liefert

der amerikanische Geologe Harry Hess. Auf Schiffsreisen mit der US Navy untersucht er den Ozeanboden und findet heraus, dass an den Mittelozeanischen Rücken Magma hervorquillt. Hier entsteht neuer Meeresboden, der sich nach und nach von dem Rücken weg bewegt, erkennt Hess. Während sich an den ozeanischen Rücken neue Kruste bildet, sinke die alte Kruste entweder unter eine weitere ozeanische Platte oder an den Rändern der Ozeane unter die Kontinentalplatten ab. So entsteht ein ewiger Kreislauf.

**1963**

Weshalb sich aktive Vulkane auch Tausende Kilometer von der nächsten Plattengrenze entfernt befinden können, vermag die Theorie der Plattentektonik zunächst nicht zu erklären. Der kanadische Geologe John Tuzo Wilson findet die Lösung des Rätsels in Form sogenannter Hotspots: Heißes plastisches Material steigt aus der Tiefe des Erdmantels an immer gleich bleibender Stelle auf. Dabei entsteht Magma, das die Erdplatte durchdringt und aktive Vulkane entstehen lässt. Weil ein Hotspot immer an derselben Stelle bleibt, während sich die Platte langsam darüber hinweg schiebt, entstehen nacheinander Ketten

von Vulkanen oder im Meer vulkanische Inseln. Ein Beispiel ist die Inselkette von Hawaii.

**1965**

John Tuzo Wilson erkennt, dass sich tektonische Platten nicht nur aufeinander zu- und voneinander weg bewegen, sondern auch aneinander vorbeischieben können. Dabei können sich die Platten an manchen Stellen



Die Bildung einer Kette von Vulkaninseln erklärt John Tuzo Wilson: Eine Erdplatte schiebt sich über einen »Hotspot«

verhaken – so lange, bis die Spannung zu groß wird und sie sich mit einem Ruck voneinander lösen. Er nennt diese Art der Bewegung tektonischer Platten „Transformstörung“. Die bekannteste ist die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien.

**1994**

Britische und russische Wissenschaftler machen eine erstaunliche Entdeckung in der Antarktis: Sie haben Hinweise auf einen See unter der kilometerdicken Eisschicht. In den Jahren darauf erhalten sie mithilfe verschie-



## HERAUSGEBER

Peter-Matthias Gaede

## CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

## GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURE

Martin Meister, Claus Peter Simon

## TEXTREDAKTION

Dr. Henning Engeln (Heftkonzept),

Jörn Auf dem Kampe, Rainer Harf

## ART DIRECTOR

Torsten Laaker

## BILDREDAKTION

Lars Lindemann

Freie Mitarbeit: Katrin Kaldenberg,

Tatjana Stapelfeldt, Katrin Trautner

## VERIFIKATION

Susanne Gilges, Bettina Süssmilch,

Freie Mitarbeit: Alice Gayler, Johannes Kückens

## TEXT-MITARBEIT

Freie Mitarbeit: Dr. Ralf Berthorst, Jürgen Bischoff,

Ute Eberle, Ute Kelsch, Manon Liebscher, Dirk Liesemer,

Aston Martin, Martin Paetsch, Wolf Schneider,

Dr. Jan Wehberg, Bertram Weiß, Sally Wichmann,

Sebastian Witte

## ILLUSTRATION

Rainer Harf

Freie Mitarbeit: Karsten Laaker,

Jochen Stuhmann, Tim Wehrmann

## KARTOGRAPHIE

Rainer Droste, Stefanie Peters

Freie Mitarbeit: Christian Kuhlmann

## CHEFS VOM DIENST

Dirk Krömer

Rainer Droste (Technik)

## SCHLUSSREDAKTION

Ralf Schulte

## REDAKTIONSASSISTENZ: Ursula Arens

## HONORARE: Angelika Györfy

REDAKTIONSBURO NEW YORK: Nadja Masri (Leitung),  
Tina Ahrens, Markus Seewald, Christof Kalt (Redaktionsassistentz);  
335 Fifth Avenue, 29th floor, New York, NY 10017, Tel. 001-646-884-7120,  
Fax 001-646-884-7111, E-Mail: geo@geo-ny.com

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Thomas Lindner

ANZEIGENLEITUNG: Lars Niemann

VERTRIEBSLEITUNG: Torsten König, Deutscher Pressevertrieb

MARKETING: Julia Duden (Lg.), Patricia Korrell

HERSTELLUNG: Oliver Fehling

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: Sabine Plath,  
Tel. 040 / 37 03 38 89, Fax: 040 / 37 03 56 04; Anzeigendisposition:  
Carola Kutschmann, Tel. 040 / 37 03 23 93, Fax: 040 / 37 03 56 04

Es gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 5/2009

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland  
sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur mit Geneh-  
migung des Verlages in Lesezirkeln geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,

Konto 0322800, BLZ 200 700 00

Heft-Preis: 8,50 Euro • ISBN 978-3-570-19885-8;

978-3-570-19894-0 (Heft mit DVD: 15,90 Euro)

© 2009 Gruener + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: amat Media, Hamburg

Druck: Mohn Media Mohndruck GmbH, Gütersloh

Printed in Germany

## GEO-LESERSERVICE

### FRAGEN AN DIE REDAKTION

Telefon: 040/37 03 20 73, Telefax: 040/37 03 56 48, E-Mail: [briefe@geo.de](mailto:briefe@geo.de)

### ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

ABONNEMENT DEUTSCHLAND Jahres-Abonnement: 29 €

24-Std.-Online-Kundenservice: [www.MeinAbo.de/service](http://www.MeinAbo.de/service)

BESTELLUNGEN: DPV Deutscher Pressevertrieb GEO-Kundenservice 20080 Hamburg

Telefon: 01805/861 80 03\*

KUNDENSERVICE ALLGEMEIN: (pers. erreichbar) Mo-Fr 7.30 bis 20.00 Uhr

Sa 9.00 bis 14.00 Uhr Telefon: 01805/861 80 03\* Telefax: 01805/861 80 02\*

E-Mail: [geo-service@guj.de](mailto:geo-service@guj.de)

### ABONNEMENT ÖSTERREICH

GEO-Kundenservice Postfach 5, 6960 Wolfurt Telefon: 0820/00 10 85

Telefax: 0820/00 10 86 E-Mail: [geo@abo-service.at](mailto:geo@abo-service.at)

### ABONNEMENT SCHWEIZ

GEO-Kundenservice Postfach, 6002 Luzern Telefon: 041/329 22 20

Telefax: 041/329 22 04 E-Mail: [geo@leserservice.ch](mailto:geo@leserservice.ch)

### ABONNEMENT ÜBRIGES AUSLAND

GEO-Kundenservice, Postfach, CH-6002 Luzern; Telefon: 0041-41/329 22 20.

Telefax: 0041-41/329 22 04; E-Mail: [geo@leserservice.ch](mailto:geo@leserservice.ch)

### BESTELLADRESSE FÜR

GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

### DEUTSCHLAND

GEO Versand-Service, Werner Haas Straße 5, 74172 Neckarsulm

Telefon: 01805/06 20 00\*, Telefax: 01805/08 20 00\*, E-Mail: [service@guj.com](mailto:service@guj.com)

### SCHWEIZ

GEO Versand-Service 50/001, Postfach 1002, CH-1240 Genf 42

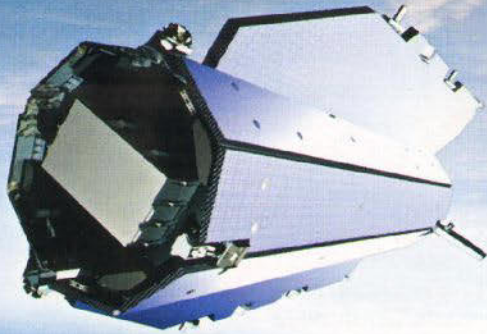
### ÖSTERREICH

GEO Versand-Service 50/001, Postfach 5000, A-1150 Wien

### BESTELLUNGEN PER TELEFON UND FAX FÜR ALLE LÄNDER

Telefon: 0049-1805/06 20 00, Telefax: 0049-1805/08 20 00, E-Mail: [service.guj.com](mailto:service.guj.com)

\*14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen



Der Satellit »GOCE« kreist seit März 2009 im Orbit, um das Schwerfeld unseres Planeten genauer zu vermessen als je zuvor. Die gewonnenen Daten sollen einen detailierten Blick in das Innere der Erde gestatten und die Zirkulation der Ozeane erfassen

dener Methoden, etwa der Messung seismischer Wellen, weitere Informationen, zum Beispiel über die Wassertiefe und die Sedimentbedeckung des See-

grunds. Der Wostok-See ist mit 16 000 Quadratkilometern so groß wie Schleswig-Holstein, bis zu 800 Meter tief und 280 Kilometer lang. Inzwischen ist bekannt, dass sich unter dem Eispanzer eine ganze Landschaft aus Seen und Flüssen befindet.

## 2008

Knapp vier Jahre nach dem katastrophalen Tsunami im Indischen Ozean nehmen Forscher in Indonesien das bislang fortschrittlichste und genaueste Tsunami-Frühwarnsystem in Betrieb. Es besteht aus einem Netzwerk aus Erdbebenmeldern, Wasserstandsmessern, Sensoren am Meeresboden und Bojen, die

ihre Daten per Satellit an die Zentrale des Warnsystems leiten. Dort errechnet ein Computer die Stärke der Bedrohung und erstellt ein Katastrophen-Szenario für die gesamte Küstenlinie.

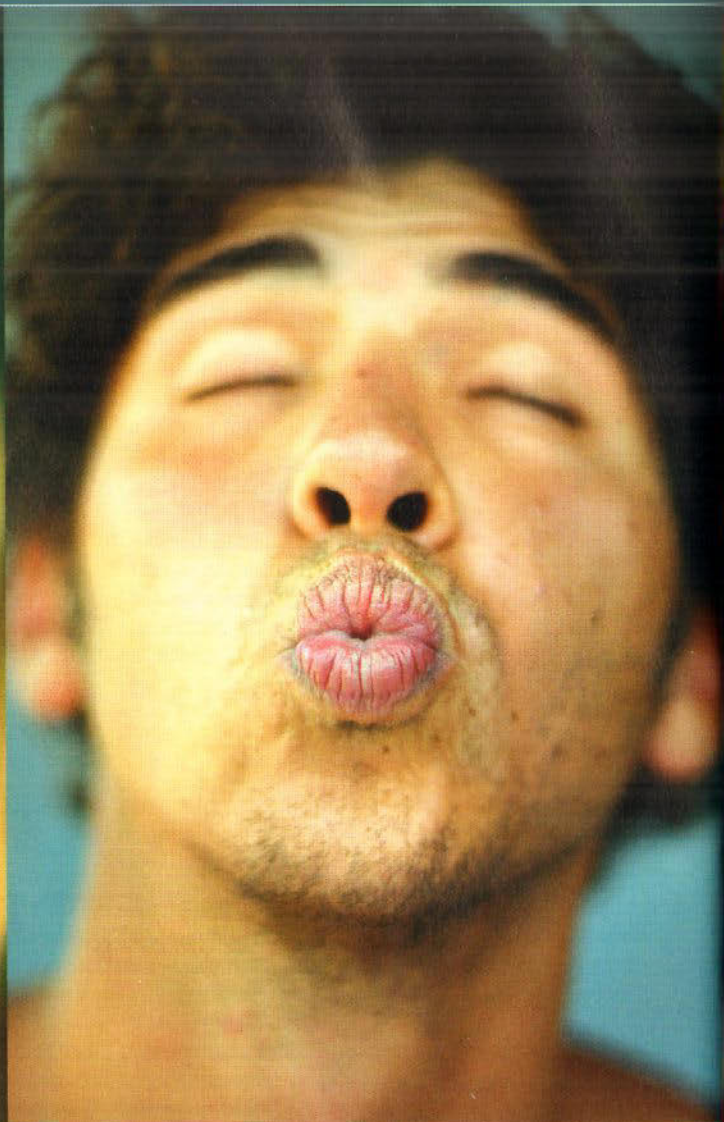
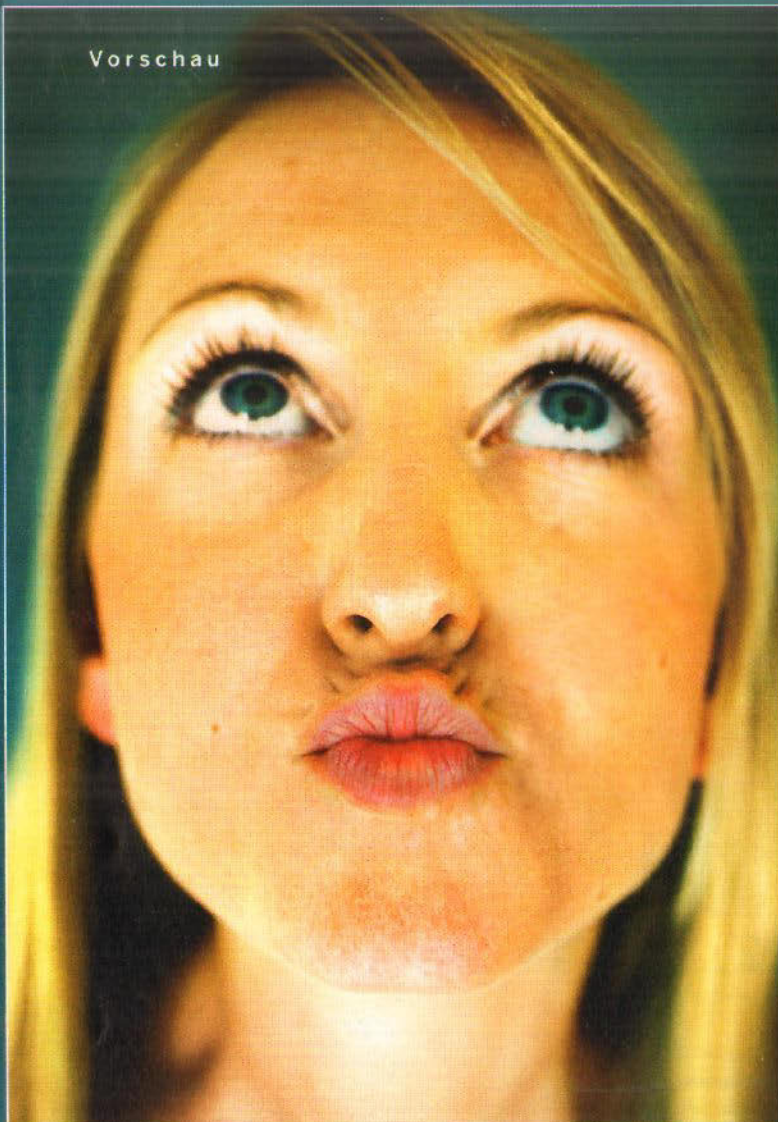
## 2009

Am 17. März schießt die Europäische Weltraumorganisation ESA den Satelliten »GOCE« in eine Erdumlaufbahn. Als eines der empfindlichsten Messinstrumente, die je im All gearbeitet haben, soll der Raumspäher Informationen über das Schwerfeld der Erde sammeln – um etwa Meeresströmungen, das Klima oder Vorgänge im Erdinneren besser verstehen zu können. □



Diese Boje ist Teil eines neuen Tsunami-Warnsystems. Sie registriert winzige Schwankungen des Wasserpegels





GEOkompakt Nr. 20 erscheint am 9. September 2009

# Liebe und Sexualität

Weshalb wir uns binden und trennen, einander begehren und betrügen

**D**ie Liebe ist das wohl beeindruckendste Phänomen, das die Evolution in Jahrmilliarden hervorgebracht hat. Sie motiviert uns zum Handeln, bestimmt unser Miteinander, stiftet Lebenssinn. Liebe bringt Menschen zusammen, lässt sie lebenslange Bindungen eingehen und Familien gründen. Aber sie kann auch zur Verzweiflung treiben, zu Selbstzerstörung und Gewalt. Nichts fasziniert Menschen mehr, über nichts ist intensiver nachgedacht worden.

Doch Naturwissenschaftler beschäftigen sich erst seit wenigen Jahrzehnten ernsthaft mit der Biologie des komplexen Gefühls. Mit modernsten Messgeräten verfolgen sie, was im Gehirn Verliebter vor sich geht. Sie untersuchen, wie Hormone die Lust

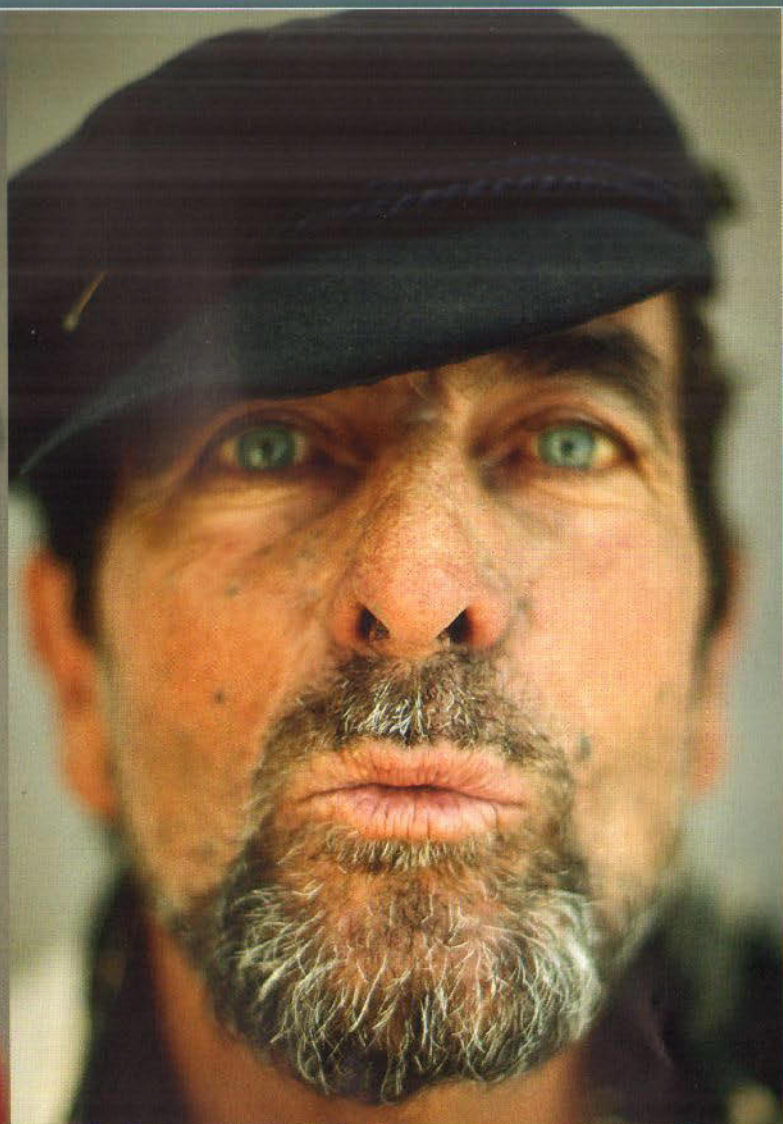
auf Sex steigern. Welche flüchtigen Lockstoffe einen Menschen attraktiv machen. Weshalb Frauen anders lieben als Männer.

GEOkompakt erklärt, wann die Chemie zwischen Partnern stimmt, woran die meisten Beziehungen scheitern, warum es überhaupt zwei Geschlechter gibt. Und wann in der Evolution unserer Vorfahren die Liebe auf die Welt kam. Die Geschichte des wohl menschlichsten aller Gefühle: in der nächsten Ausgabe von GEOkompakt. □

## WEITERE THEMEN

- » **NACKTHEIT:** Warum wir Scham empfinden
- » **PHARMA-INDUSTRIE:** Die neuen Pillen der Lust
- » **NEUE MEDIEN:** Die Liebe in Zeiten des Internets
- » **KÖRPERKULT:** Wie wandelbar Schönheitsideale sind
- » **EVOLUTION:** Wie es auch ohne Männer geht





Jeder Kuss aktiviert Abertausende Nervenzellen: Hormone werden ausgeschüttet, der Puls geht schneller, das Stressempfinden sinkt

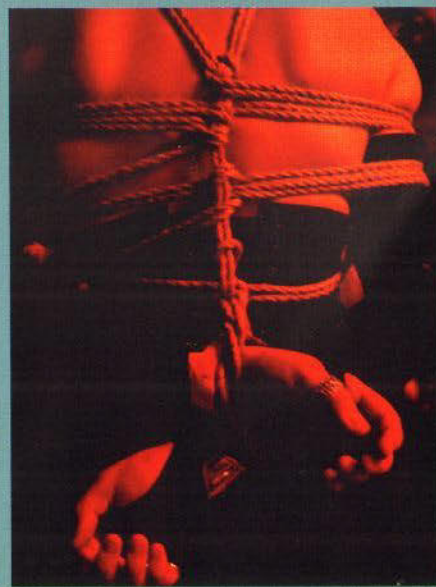


Das Paradoxon der Homosexualität: Wie konnte sich die Liebe zwischen Menschen behaupten, die keinen Nachwuchs zeugen?



Eines der großen Rätsel der Evolutionsbiologie: Warum überhaupt gibt es Sex?

Ein uraltes Geschäft: Gegen Nahrung helfen Insekten Pflanzen bei der Vermehrung



Fesseln und Bandagen, Gummi, Lack und Leder. Weshalb manche Menschen einen Fetisch als sexuellen Stimulus brauchen



Aktuelle Umfragen zeigen,  
dass ein neues  
Feature der H3DII-31  
bei Fotografen für  
Überraschung sorgt:



Der Preis.  
(€ 9.990,-)

Dass die weltweit fortschrittlichste Digitalkamera verblüffend einfach zu bedienen ist, das ist leicht zu verstehen. Und dass sie verblüffend gute Fotos produziert, kann man sofort sehen. Aber, können Sie wirklich für nur € 9.990,- eine Hasselblad mit 31 Millionen Pixeln, die neue Phocus Software für PC und Mac sowie Zugang zu allen hochwertigen Hasselblad Objektiven, inklusive dem neuen HCD 4.0-5,6/35-90 Zoomobjektiv und allem Zubehör erhalten?

Ja, Sie können.

Alle Details dieses zeitlich befristeten Angebots erfahren Sie bei Ihrem Fachhändler oder unter:

Zeitlich befristetes Angebot!



H3DII-31:  
(Kamera und Sucher)  
**€9.990,-**  
zzgl. MwSt.

(gültig bis 30. Juni 2009)

[www.hasselblad.de/31](http://www.hasselblad.de/31)

HASSELBLAD