

K. Schwanke, N. Pobregar, D. Lohmann, H. Frater

Naturkatastrophen

Wirbelstürme, Beben, Vulkanausbrüche
Entfesselte Gewalten und ihre Folgen

2. Auflage



Präsentiert vom ZDF-Wissenschafts-
Moderator Karsten Schwanke



Springer

Karsten Schwanke
Nadja Podbregar
Dieter Lohmann
Harald Frater

Naturkatastrophen

Karsten Schwanke
Nadja Pödbregar
Dieter Lohmann
Harald Frater

Naturkatastrophen

**Wirbelstürme, Beben, Vulkanausbrüche –
Entfesselte Gewalten und ihre Folgen**

2., vollständig erweiterte
und überarbeitete Auflage





Nadja Podbregar
ist Biologin und
Wissenschafts-
journalistin und
arbeitet als Redak-
teur für das
Wissensmagazin
scinexx.de.



Dieter Lohmann
ist Biologe und
Wissenschafts-
journalist und
arbeitet als Redak-
teur für das
Wissensmagazin
scinexx.de.



Harald Frater
studierte Geowis-
senschaften und
beschäftigt sich als
Inhaber der MMCD
NEW MEDIA GmbH
seit vielen Jahren
mit der Vermittlung
naturwissen-
schaftlicher Inhalte.

ISBN 978-3-540-88684-6

e-ISBN 978-3-540-88686-0

DOI 10.1007/978-3-540-88686-0

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-
sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.
Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen
der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom
9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig.
Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk
berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der
Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann
benutzt werden dürfen.

Grafik, Satz & Layout: MMCD NEW MEDIA GmbH, Düsseldorf

Umschlagbild: Harald Frater, USGS
Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1
springer.de

VORWORT

Wir wollen den Teufel nicht an die Wand malen. Aber Naturkatastrophen werden immer gewaltiger, passieren häufiger und enden tödlicher! Oder leiden wir an einer verzerrten Wahrnehmung? Die Medien – zu reißerisch?

Es ist müßig, darüber zu diskutieren, Fakt ist, dass uns Naturkatastrophen – egal, wo sie passieren – wesentlich schneller präsentiert werden als noch vor wenigen Jahrzehnten. Sie rücken näher an uns heran – und wir können uns dem nicht wirklich entziehen. Naturkatastrophen werden zum Gesprächsthema. Denn sie überraschen uns, niemand ist darauf vorbereitet. Sie berühren uns emotional (die Spendenaufkommen bei großen Katastrophen zeigen das), auch wenn sie tausende Kilometer entfernt geschehen.

Ein Tsunami mit 200.000 Toten – und von der ersten Minute an fragen sich die Menschen auf der ganzen Welt, wie das passieren konnte. Und interessieren sich für den Aufbau der Erdkruste und für Bewegungen an tektonischen Plattenrändern.

Es gibt kaum ein anderes Ereignis, bei dem Trauer und Entsetzen immer auch begleitet werden von wissenschaftlichen Erklärungen. Normalerweise sind wir entweder betrübt, trauern und wollen auf keinen Fall irgendwelche störenden Erklärungen – oder aber wir sind einfach nur fasziniert von wunderschönen Naturscheinungen, von schönen Bildern. Die Naturkatastrophe vereint beides:

schaurig-schöne Bilder (die ja heutzutage schneller im Netz zu haben sind, als die Fernsehnachrichten reagieren können) auf der einen Seite – Betroffenheit, Trauer und Ohnmacht auf der anderen Seite.



*Karsten Schwanke,
Meteorologe und
Moderator des
ZDF-Magazins
„Abenteuer Wissen“*

Ich saß bisher – zum Glück – auf der Seite der Erklärenden. Habe nie hautnah eine Katastrophe mit ihren schlimmsten Folgen miterleben müssen. Obwohl ich als Reporter und Meteorologe die Elbeflut, den Lawinenwinter 1999 oder den Orkan „Lothar“ begleitet habe, war ich doch weit entfernt von der persönlichen Betroffenheit der Anwohner.

Und trotzdem möchte ich so dicht wie möglich an diese Katastrophen heran – und natürlich so sicher wie möglich (welche Ignoranz ...). Wir wohnen auf dieser ach so festen und ruhigen Erde. Und verstehen die Welt nicht mehr, wenn sie wackelt, wenn sie nicht so funktioniert, wie wir es seit unserer Kindheit gewohnt sind. Unwetter, Erdbeben, Vulkanausbrüche, Tsunamis – sie holen uns ein Stück weit aus unserer heilen Welt zurück – und zeigen uns, welche gewaltigen Kräfte in der Natur stecken – die wir noch immer nicht ganz verstehen.

Naturkatastrophen faszinieren mich.

Karsten Schwanke

Einleitung

Erde, Mensch und Katastrophe	4
------------------------------------	---

Geologische Ereignisse – aus dem Inneren der Erde

Erdbeben – wenn der Boden schwankt	16
Vulkane – gefährliche Feuerspeier	32
Tsunamis – tödliche Riesenwellen	48

Massenbewegungen – wenn die Schwerkraft stärker ist

Erdrutsche – wenn Hänge abwärts gleiten	62
Lawinen – der weiße Tod	74

Stürme und Fluten – die Kraft von Wind und Wasser

Winterstürme – tobende Winde der mittleren Breiten	88
Hurrikan, Taifun und Co. – tropische Wirbelstürme	101
Tornados – klein aber zerstörerisch	113
Sturmflut – Küsten in Gefahr	120
Hochwasser – immer häufiger „Land unter“?	134

Klima-Katastrophen – Klimawandel, Monsun und Co.

Klimawandel – die schleichende Gefahr	154
Klimakapriolen – El Niño und Monsun	172
Dürren und Hitzewellen – wenn die Erde austrocknet	190
Waldbrände – Flammendes Inferno	198

Naturkatastrophen in Deutschland

Gefährdung durch Fluten, Stürme und weitere Ereignisse	214
--	-----

Der Kampf gegen Naturkatastrophen

Vorher und nachher – was kann getan werden?	224
---	-----

Glossar

.....	240
-------	-----

Index und Bildnachweis

.....	282
-------	-----



Immer öfter und immer stärker schlagen Naturgewalten zu - so scheint es zumindest. Effektive Schutzmaßnahmen helfen dabei, die Auswirkungen zu mildern. © Harald Frater



Einleitung

Erde, Mensch und Katastrophe

Naturereignisse wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Stürme oder Fluten haben die Entwicklung der Erde dramatisch beeinflusst. Aber auch die Geschichte des Menschen ist durch Naturgewalten geprägt. Ihre Spuren finden sich in unseren Mythen und Sagen, aber auch in historischen Ereignissen von Kriegen bis hin zum Unter-

gang ganzer Reiche. Stürme oder Regenfälle entschieden Schlachten oder ließen Invasionen misslingen. Viele Beispiele zeigen, wie eng der Mensch und seine Entwicklung mit der Natur verbunden sind – trotz oder wegen aller kulturellen Fortschritte und technischen Errungenschaften.

Die Erde: Unser Planet gibt uns eine Heimat, birgt aber auch einige Gefahren. © NASA



Rechts: Luft, Feuer, Wasser: Die Elemente der Natur lassen sich nicht zähmen. © NASA; Wolfgang Beyer/GFDL; SXC

Erde, Mensch und Katastrophe

Die Erde – ein blauer, lebensfreundlicher Planet. Ihr Wasserreichtum und ihre Lufthülle unterscheiden sie von allen anderen Himmelskörpern unseres Sonnensystems. Nur auf ihr konnten sich Organismen zu einem einzigartigen Formenreichtum entwickeln. Doch die Erde ist nicht nur ein Ort des Lebens, sie ist auch ein unruhiger, unberechenbarer Planet.

Glühende Lava bricht in mächtigen Fontänen aus den Tiefen der Erde hervor, Wirbelstürme reichen bis hoch hinauf in die Atmosphäre und die gewaltigen Wellen von Sturmfluten oder Tsunamis begraben ganze Landstriche unter sich. Immer wieder zeigt die Natur ihre zerstörerische Kraft. Schon seit ihrer Entstehung vor rund 4,6 Milliarden Jahren verändert die Erde ständig ihr Gesicht, prägen gewaltige Naturereignisse ihre Geschichte. Vor allem in ihrer Jugend sorgten Meteoriteneinschläge, Vulkanausbrüche und Klimawechsel immer wieder für gewaltige Umwälzungen. Sie zerstörten Altes und schufen Neues. So entstanden vor rund 3,2 Milliarden Jahren auch die Ozeane – das Element, in dem sich 600 Millionen Jahre später das Leben entwickelte.

Und auch heute noch wird die Erde – und mit ihr ihre Bewohner – immer wieder von Naturereignissen heimgesucht. Die Kräfte von Wasser, Untergrund und Atmosphäre haben nicht aufgehört, den Planeten zu formen und zu verändern. Gegen solche Naturgewalten sind auch wir Menschen machtlos. Das Toben der Elemente scheint unbeherrschbar und oft auch unvorhersehbar. Ihr Wütens hat nicht nur unseren Planeten, sondern auch unsere Entwicklungsgeschichte geprägt.

Beinahe-Auslöschung und Sintflut

So hätte der Ausbruch des Supervulkans Toba auf Sumatra in Indonesien vor 70.000 Jahren beinahe die gesamte Menschheit vernichtet. Die Eruption schleuderte große Mengen Asche und Staub in die Atmosphäre, die die Sonne verdunkelten. Es wurde sehr kalt und trocken – wahrscheinlich bis zu sechs Jahre lang. Für unsere Vorfahren hatte dies fatale Folgen. Nahrungsmangel und Kälte dezimierten die Population auf nur noch 30.000 Menschen, so die Schätzung von





Historische Darstellung der Sintflut als Illustration zur biblischen Genesis. © Public domain

Die Taube mit Olivenzweig im Schnabel signalisierte das Ende der Sintflut und damit das Ende der Strafe Gottes. Heute gilt sie daher als Friedenszeichen.
© Public domain



Stanley Ambrose, Professor für Anthropologie von der Universität von Illinois. Aus der Zeit nach dem Ausbruch des Vulkans gibt es kaum noch archäologische Spuren unserer Urahnen, die Menschheit sank fast unter die Nachweisgrenze. Erst rund 10.000 Jahre später finden sich erneut Relikte von urzeitlichen Menschengruppen.

Und auch später prägten Naturereignisse immer wieder die Menschheitsgeschichte, einige von ihnen gingen in die Sagen und Mythen der Völker ein oder tauchen in religiösen Überlieferungen wieder auf. Das viel-

leicht bekannteste Beispiel dafür ist die Sintflut. Sie wird in der Bibel als weltumspannende Überschwemmung beschrieben, die nach einem 40 Tage dauernden Regen 150 Tage ansteigt und weitere 150 Tage wieder absinkt. Auch die amerikanischen Indianer und das sumerische Gilgamesch-Epos berichten von großen Fluten, die jeweils nur ein Menschenpaar überleben lassen. In Indien ist es ein Fisch, der den König zum Bau einer Arche auffordert. Bis heute ist jedoch unklar, welche realen Naturereignisse diese Geschichten beschreiben.

Die Erklärungsmodelle für die biblische Sintflut reichen von einem abnormal starken Monsun vor mehreren tausend Jahren – Hinweise darauf fanden sich in Ablagerungen des Roten Meeres – bis zu einem plötzlichen Brechen des Dammes zwischen dem Schwarzen Meer und dem Mittelmeer. Dadurch sei der Wasserspiegel des damaligen Süßwassersees innerhalb kürzester Zeit um bis zu 100 Meter angestiegen und habe die an seinen Ufern liegenden frühen Kulturen nachhaltig geschädigt.

Während wir nach naturwissenschaftlichen Erklärungen suchen, waren solche Katastrophen für unsere Vorfahren schlicht das Wirken der Götter oder des Gottes. Im Beben der Erde, in Blitzschlägen, Donner oder plötzlichen Fluten glaubten sie Zorn zu erkennen, in ersehnten Regenfällen die Antwort auf ihre Gebete. Lange Dürren und ungünstige Klimaveränderungen wurden nicht nur als Strafe Gottes gesehen, sie brachten auch ganze Reiche zu Fall, wie beispielsweise das Alte Reich in Ägypten im 22. Jahrhundert v. Chr. oder die Hochkultur der Maya um 900 n. Chr. Auf diese Weise sind Naturereignisse immer schon eng mit unserer Kultur, Religion und Entwicklung verknüpft gewesen.

Erst der Mensch macht die Katastrophe zur Katastrophe

Heute wissen wir, dass nicht überirdische Mächte, sondern die Natur für Erdbeben, Stürme oder sintflutartige Regenfälle verantwortlich ist. Aber noch immer sind



Vulkanausbrüche, wie der des Rabaul in Papua Neuguinea, schleudern Asche, Treibhausgase und Aerosole hoch in die Atmosphäre und können im Extremfall sogar das globale Klima verändern. © NASA/JSC

Das Meer ist für uns Nahrungslieferant, Transportweg und Erholungsraum zugleich. Entsprechend häufig siedelt der Mensch an der Küste.
© Public domain

wir ihnen ausgesetzt, müssen wir mit ihnen leben. Und dies wird trotz aller technischen Möglichkeiten nicht unbedingt leichter. Denn heute leben bereits mehr als sechs Milliarden Menschen auf der Erde, Tendenz stark steigend. Angetrieben durch knappe Ressourcen und immer weniger Platz in den sicheren, lebensfreundlichen Regionen, besiedeln wir immer häufiger Räume, die gefährdet sind: Die Hänge von Vulkanen, flache Meeresküsten und Flussufer, Regionen, in denen Wirbelstürme und Tornados häufig sind. Allein zwei Millionen Menschen leben beispielsweise in der engeren Umgebung des Vulkans Mount Pinatubo auf den Philippinen, mehr als eine Million an den Hängen des Feuerbergs Merapi auf Java. Sie sind ständig in Gefahr, von einer Eruption überrascht zu werden.

Auch die meisten großen Ballungszentren der Erde liegen in Gefahrenzonen: Meist konzentrieren sie sich in den flachen, fruchtbaren und verkehrsgünstig gelegenen Bereichen entlang der Meeresküsten und Flussufer. In Deutschland befinden sich Millionenstädte wie Hamburg, Köln oder das Ruhrgebiet direkt an Elbe und Rhein – hier ist die regelmäßige Überschwemmung fast schon vorprogrammiert. In den USA liegen die Metropolen des Südwestens direkt im Pfad vieler Wirbelstürme, die Hauptzentren Kaliforniens, San Francisco und Los Angeles, sitzen quasi rittlings auf einer geologischen Verwerfung, die jederzeit schwere Beben erzeugen kann.



Im Gegensatz zu unseren Vorfahren wissen wir heute um diese Gefahren. Wir nehmen das Risiko meist offenen Auges in Kauf – manchmal auch zu leichtfertig. Denn zur echten Katastrophe wird ein Naturereignis erst dann, wenn seine Auswirkungen uns treffen, wenn es ernsthafte Schäden anrichtet. Ein Erdbeben in der menschenleeren Wüste ist keine Katastrophe, es verläuft im wahrsten Sinne des Wortes „im Sande“. Doch trifft es einen Ort, eine dicht besiedelte Region, sind die Folgen fatal und oft sogar tödlich. Nach der Definition der Vereinten Nationen ist eine Katastrophe deshalb „die Unterbrechung der Funktionsfähigkeit einer Gesellschaft, die Verluste an Menschenleben, Sachwerten und Umweltgütern verursacht und die Fähigkeit der betroffenen Gesellschaft, aus eigener Kraft damit fertig zu werden, übersteigt“.

Inzwischen beginnt der Mensch wieder umzudenken, zu erkennen, dass sich die Natur auf Dauer nicht bezwingen lässt. In einer Art geordnetem Rückzug verzichtet er beispielsweise darauf, neue Siedlungen an hochwassergefährdeten Flussufern oder an lawinengefährdeten Berghängen zu bauen. Oder er räumt Flüssen wieder natürliche Überflutungsflächen ein, die die Wucht eines Hochwassers abpuffern können. In den Industrieländern, mit ihren großen finanziellen und technischen Möglichkeiten, sind solche Maßnahmen umsetzbar und vor allem auch bezahlbar. Aber in vielen ärmeren Ländern der Erde reichen die Mittel weder

*Die Menschheit wächst und konzentriert sich zunehmend in potenziell gefährdeten Ballungsräumen wie hier dem Nildelta.
© NASA/GSFC*





für einen ausreichenden Katastrophenschutz noch für vorbeugende Maßnahmen. So ist auch den armen Bauern im flachen Mündungsdelta von Ganges und Brahmaputra in Bangladesch durchaus bewusst, dass ihre Wohnhäuser und Felder jederzeit Opfer von Fluten werden können. Doch ihnen bleibt keine Wahl: Anderswo finden sie kein fruchtbare, bezahlbare Land und damit auch keine Existenz. Nur hier, im Hochrisikogebiet, wo reichere Siedler nicht hinwollen, können sie überhaupt ihren Lebensunterhalt bestreiten.

Infolge zunehmender Flächenversiegelung und Bodenverdichtung müssen auch in Zukunft Maßnahmen gegen Hochwasser ergriffen werden. © Harald Frater

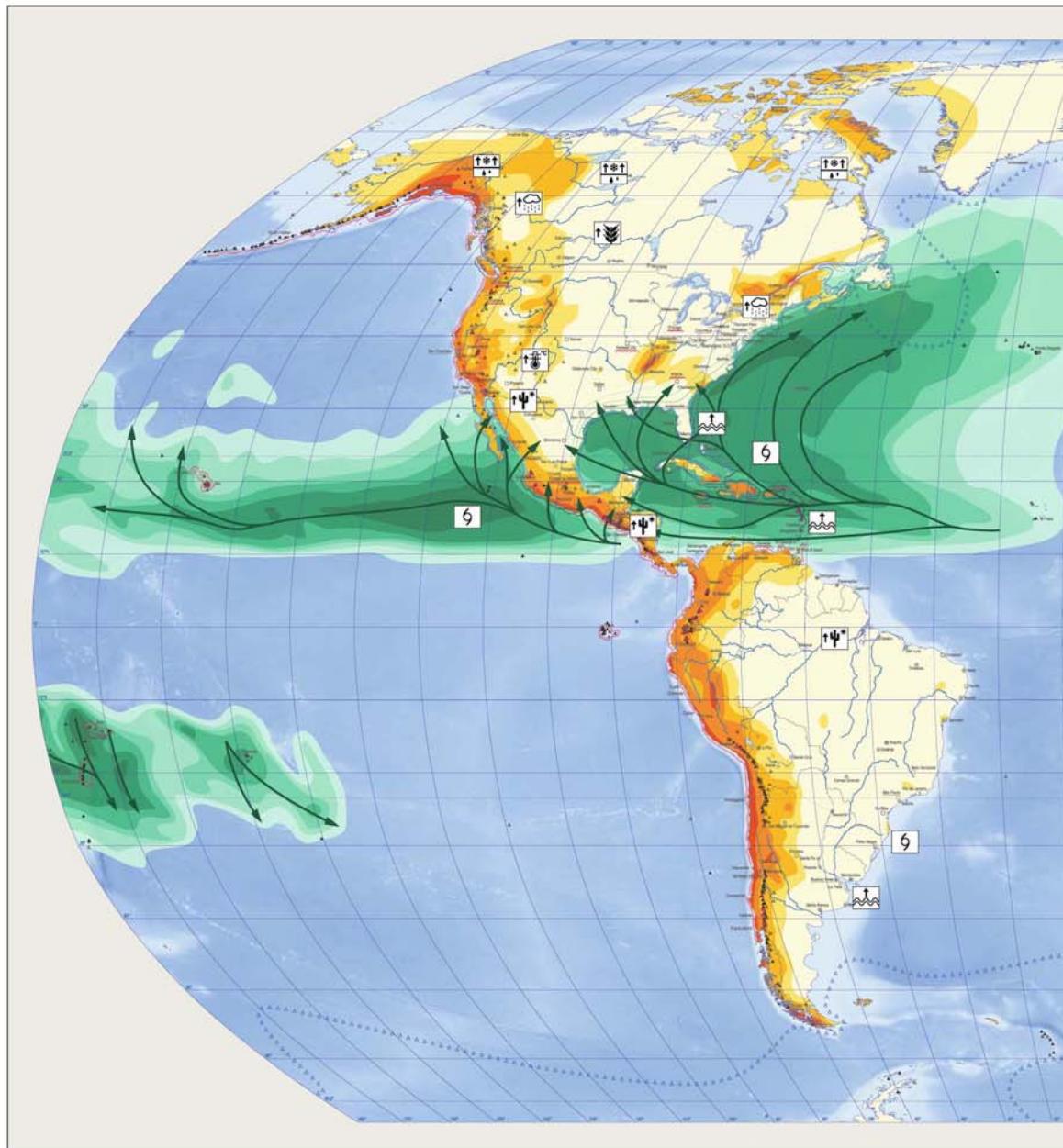
Katastrophenursache Mensch

Häufig verbinden wir mit dem Wort Katastrophe das plötzliche Auftreten eines Ereignisses, beispielsweise einen Vulkanausbruch oder ein Erbeben. Sie ereignen sich manchmal innerhalb von Sekundenbruchteilen. Aber es geht auch anders: Viele Katastrophen vollziehen sich schleichend, beginnen erst allmählich und werden erst bemerkt, wenn es fast schon zu spät ist.

Denn nicht alle Katastrophen sind natürlichen Ursprungs. Längst greift auch der Mensch in die empfindlichen Kreisläufe unseres Planeten ein und schafft damit neue Gefahren: Industrie- und Autoabgase verstärken den natürlichen Treibhauseffekt und lassen die globale Temperatur ansteigen, Bevölkerungsdruck und Übernutzung führen zur Erosion von Böden und Ausdehnung der Wüsten, Flussbegradigungen und Versiegelung der Landschaft ziehen immer häufiger Hochwasser und Sturzfluten nach sich.

Ähnlich vielfältig wie die Zeitverläufe von Katastrophen sind also auch ihre Ursachen. Zu dem Verursacher Mensch kommt das Wirken geologischer Kräfte (Erdbeben, Vulkanausbrüche) und des Klimas, also atmosphärischer Kräfte (Stürme, Überschwemmungen, Dürren). Diese Vielfalt macht es uns besonders schwer, Katastrophen rechtzeitig zu erkennen und adäquat darauf zu reagieren.

Doch Katastrophen sind trotz ihrer scheinbaren Unberechenbarkeit kein unabänderliches Schicksal, dem wir hilflos ausgeliefert sind. Zwar lassen sich Naturereignisse nicht verhindern, doch Vorbeugung und immer bessere Vorhersagemethoden können dazu beitragen, Menschenleben zu schützen und katastrophale Schäden zu vermeiden. Und: Bei vielen durch uns beeinflussten Ereignissen haben wir es heute selber in der Hand, ob und wie zukünftige Generationen darunter leiden müssen: Ein nachhaltiger Umgang mit Natur und Umwelt in der Gegenwart schützt auch die Menschheit der Zukunft vor den Folgen „hausgemachter“ Katastrophen. Nachhaltigkeit bedeutet daher nach der Definition der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der UN: „den Erfordernissen der Gegenwart angemessen gerecht zu werden, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu beschränken, ihren eigenen Bedürfnissen nachzukommen“.



Weltkarte der Naturgefahren

Erdbeben

- Zone 0: MM V und darunter
- Zone 1: MM VI
- Zone 2: MM VII
- Zone 3: MM VIII
- Zone 4: MM IX und darüber

Wahrscheinliche Maximalintensität (MM: modifizierte Mercalli-Skala) mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren (entspricht einer „Wiederkehrperiode“ von 475 Jahren) bei mittleren Untergrundbedingungen

Großstadt mit „Mexico-City-Effekt“

Tropische Wirbelstürme

- Spitzenwindgeschwindigkeiten*
- Zone 0: 76–141 km/h
 - Zone 1: 142–184 km/h
 - Zone 2: 185–212 km/h
 - Zone 3: 213–251 km/h
 - Zone 4: 252–299 km/h
 - Zone 5: ≥ 300 km/h

* Wahrscheinliche Maximalintensität mit einer mittleren Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 10 Jahren (entspricht einer „Wiederkehrperiode“ von 100 Jahren)

Typische Zugrichtungen

Vulkane

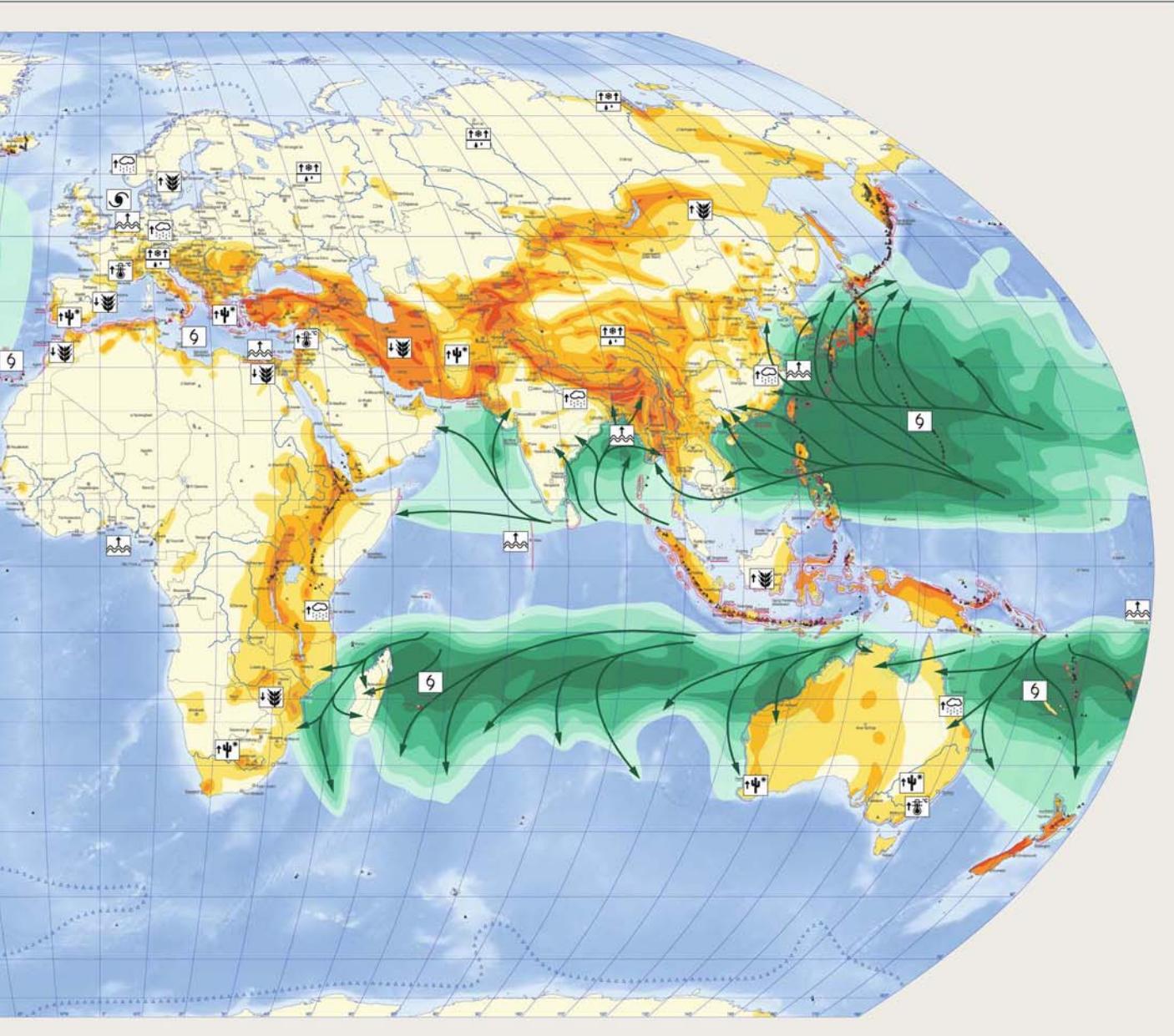
- Letzte Eruption vor 1800 n. Chr.
- Letzte Eruption nach 1800 n. Chr.
- Besonders gefährliche Vulkane

Tsunamis und Sturmfluten

- Tsunamigefahr (seismische Flutwelle)
- Sturmflutgefahr
- Tsunami- und Sturmflutgefahr

Eisbergvorstöße

- Grenze beobachteter Eisbergvorstöße



Klimaauswirkungen

Wesentliche beobachtete und/oder für die Zukunft verstärkt erwartete Auswirkungen des Klimawandels

-  Veränderte Aktivitätsmuster von Tropenstürmen
-  Intensivierung von außertropischen Stürmen
-  Zunahme von Starkniederschlägen
-  Zunahme von Hitzewellen
-  Zunahme von Dürren

-  Bedrohlicher Meeresspiegelanstieg
-  Auftauen von Permafrostböden
-  Günstiger Bedingungen für die Landwirtschaft
-  Ungünstige Bedingungen für die Landwirtschaft

Politische Grenzen

-  Staatsgrenze
-  Staatsgrenze, umstritten (politische Grenzen nicht verbindlich)

Städte

- | | | |
|---|-----------|------------------------------|
|  | Denver | > 1 Mio. Einwohner |
|  | San Juan | 100.000 bis 1 Mio. Einwohner |
|  | Maus | < 100.000 Einwohner |
|  | Berlin | Hauptstadt |
|  | Melbourne | Münchener-Rück-/Außenstelle |

Datengrundlage

Bathymetrie: Amante, C. and B. W. Eakins, ETOP01 1-Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce, Boulder, CO, August 2008.

Außertropische Stürme: KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute), NASA (USA) / NOAA (USA) / JMA (Japan) / NASA / MSFC / GISS, Temperature Niemandsland 1978–2007, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich,

Die Weltkarte der Naturgefahren
zeigt die potentiell von Naturkatastrophen gefährdeten Gebiete.
© Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2009



Vulkanausbrüche faszinieren und erschrecken zugleich. © USGS



Geologische Ereignisse Aus dem Inneren der Erde

Geologisch bedingte Naturereignisse gehören zu den Naturgefahren, die am wenigsten durch das menschliche Handeln beeinflussbar sind. Erdbeben und Vulkanausbrüche sind eng verbunden mit der Verteilung der Plattengrenzen und orientieren sich an tektonische Schwächezonen. Während Erdbeben flächendeckende Zerstörungen hervorrufen können, sind Tsunamis im Falle von Seeböben deren Folgeereignis – mit verheerender Wirkung. Die Gefährdung durch Vulkane wirkt dagegen eher

punktuell. Ausgenommen hiervon ist die Ausbreitung vulkanischer Asche in die Atmosphäre, die im komplexen Klimagefüge ihre Wirkung zeigen kann. In der Vorhersage geologischer Naturgefahren wurden in den letzten Jahren Fortschritte erzielt – dennoch bleibt ein großes Restrisiko. Und so wartet man weiterhin auf das „überfällige“ große Beben im Bereich des San Andreas-Grabens in Kalifornien. Wird es plötzlich eintreten oder haben die Behörden eine Chance, die Einwohner von Los Angeles zu warnen?



Erdbeben – wenn der Boden schwankt

Das Gebäude der Agriculture Development Bank of China in Bei Chuan nach dem Erdbeben.
© GFDL

Ein Schütteln und zu Rollen durchfährt die Erde, Häuser stürzen ein, Menschen fliehen ins Freie – bestimmte Regionen der Welt werden immer wieder von Erdbeben erschüttert. Manchmal sind die betroffenen Gebiete unbewohnt und die Schäden halten sich in Grenzen. Doch für Ballungsräume wie Istanbul, Tokio, Mexico City oder San Francisco kann das „nächste große Beben“ eine Katastrophe ungeahnten Ausmaßes bedeuten.

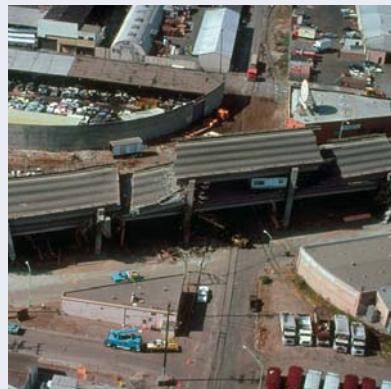
12. Mai 2008, in der chinesischen Provinz Sichuan: Unbemerkt von allen, bahnt sich hier, zehn Kilometer unter der Oberfläche, eine Katastrophe an: An einer Verwerfung im Untergrund bricht das Gestein plötzlich, zerstört durch jahrelange enorme Spannungen. Mit einem Ruck entlädt sich die Energie, Erschütterungswellen rasen in Sekundenschnelle durch den Untergrund – ein Erdbeben. Mit der Magnitude 7,9 bricht das Beben über Gebäude, Menschen und Vieh herein, die Folgen sind katastrophal: Rund 87.000 Menschen sterben, 374.000 werden verletzt, Millionen Gebäude sind zerstört oder stark beschädigt. Komplette Dörfer und Stadtteile stürzen ein, Steinschläge blockieren Straßen und Flüsse.

Hätte sich dieses Beben vor vielen hundert Jahren ereignet, wäre es vermutlich als Wirken übernatürlicher Kräfte interpretiert worden, als „Zorn der Götter“ oder mythischer Fabeltiere. Heute allerdings ist klar, dass die Erde selbst, die

Geologie unseres Planeten, für solche Katastrophen verantwortlich ist. Das erste Indiz dafür machten Wissenschaftler Mitte des 19. Jahrhunderts ausfindig: Karten historischer Beben zeigten, dass die Erdbebenherde keineswegs zufällig auf der Erde verteilt sind. Stattdessen häufen sie sich – ebenso wie auch Vulkane und Gebirgsketten – in bestimmten Gebieten. Wie ein rotes Band erstreckt sich diese Erdbebenzone beispielsweise einmal rund um den Pazifik, schlängelt sich dann über die Inselwelt Südostasiens nach Westen und hinauf in den Himalaya, von dort weiter nach Westen bis hin nach Ostafrika und Südeuropa. Nahezu bebenfrei ist dagegen das Innere einiger großer Landmassen, darunter Australien, Grönland, weite Teile Afrikas und der Norden Europas sowie Asiens. Auch die Ozeane scheinen weitestgehend von den Erschütterungen verschont zu bleiben, nur entlang einiger Linien, die sich wie Nähte um die Erde ziehen, häufen sich sowohl Beben als auch Vulkaninseln.

Und genau diese Verteilung verrät auch die Ursache der Erdbeben: Denn genau dort, wo sich Beben häufen, liegen Verwerfungen im Boden: Nahtstellen, an denen die verschiedenen Platten der Erdkruste aneinanderstoßen. Wie Eisschollen auf dem Meer treiben diese festen tektonischen Platten auf dem weicheren, schmelzflüssigen Teil des Erdmantels. Unterschieden werden leichtere, ozeanische Platten und schwerere, kontinentale Platten. Mit mehreren Zentimetern pro Jahr driften die Platten gegeneinander, auseinander oder seitlich aneinander vorbei. Der „Motor“ für diese Plattentektonik sind Konvektionsströme im Erdmantel. Sie sorgen dafür, dass glutflüssiges Magma in Richtung Oberfläche aufsteigt und die Platten antreibt. Im Bereich der mittelozeanischen Rücken beispielsweise drückt das Magma die ozeanische Kruste seitwärts auseinander. Erkaltet das Magma am Meeresgrund, entsteht neuer Ozeanboden. Vor der Westküste Südamerikas taucht die leichtere ozeanische Platte unter die schwere Kontinentalplatte ab. Infolge dieser Kollision entstanden die Anden, die als Teil des „Pazifischen Feuerrings“ zahlreiche Vulkane aufweisen und von häufigen Erdbeben gekennzeichnet sind. An anderer Stelle, wie an der „Anatolischen Verwerfung“ in der Türkei, schieben sich die Platten seitlich aneinander vorbei und bilden so genannte Transformstörungen - häufige und schwere Erdbeben sind die Folge.

*Erdbeben können verheerende Auswirkungen haben und milliardenschwere Schäden an der Infrastruktur verursachen.
© University of California, Berkeley; FEMA; USGS*



Das Beben von Kaschmir



Oben: Eine Frau steht fassungslos vor den Trümmern ihres Hauses.
Rechts: Polnische Soldaten bei der Suche nach Verschütteten.
© Public domain; U.S. Air Force



8. Oktober 2005 in der Region Kaschmir an der Grenze zwischen Indien und Pakistan. Es ist früh am Morgen, als 90 Kilometer nordöstlich der pakistanschen Hauptstadt Islamabad plötzlich ein Ruck durch den Untergrund geht. In zehn Kilometern Tiefe entlädt sich in Sekundenbruchteilen die enorme Spannung im Gestein, über die Jahre aufgestaut durch die stetige Nordwanderung des indischen Subkontinents. Ein Erdbeben der Stärke 7,6 ist die Folge.

Die Bebenwellen breiten sich innerhalb von Sekundenbruchteilen aus und bringen den gesamten Norden Pakistans und Indiens zum Beben – mit fatalen Folgen. Entlang eines rund hundert Kilometer langen Bruches im Untergrund bleibt kaum noch ein Gebäude stehen. In vielen entlegenen Gebieten der Kaschmir-Region radieren die Erdstöße ganze Ortschaften von der

Landkarte. So auch die Stadt Balakot im Nordwesten Pakistans mit ihren 10.000 Einwohnern. Hier tötet vermutlich der erste Erdstoß allein mehr als 1.000 Schulkinder. Der Unterricht hat gerade angefangen, als mehrere Schulgebäude unter der Wucht des Bebens ins Wanken geraten und zusammenbrechen. Nur wenige Kinder können sich ins Freie retten. Schon kurz nach dem Erdbeben und dem Eingehen der ersten Meldungen befürchten Experten, dies könne sich zu einem der schlimmsten Erdbeben der Geschichte entwickeln. Die Vereinten Nationen rufen zu Spenden auf, viele Staaten, internationale Organisationen und Nichtregierungsorganisationen bieten der Region Hilfe in Form von Geld, Lebensmitteln, medizinischen Ausrüstungen, Zelten und Decken an. Doch in den ersten Tagen nach dem Beben erlaubt die indische Regierung Hilfsorganisationen zunächst nur zögerlich

den Zugang zur betroffenen Region in Kaschmir. Obwohl schon Stunden nach dem Ereignis Hilfskonvois aus der ganzen Welt nach Pakistan und Indien unterwegs sind, dauert es, bis die Medikamente, Decken, Wasserkanister und anderen Hilfsmittel die Bedürftigen erreichen.

Einmal vor Ort, erschweren Zerstörungen, Gewitter und strömender Regen die Suche nach Überlebenden oder Leichen. Beschädigte Straßen und Erdrutsche behindern die Hilfslieferungen. Viele Gebiete sind nur mit Hubschraubern zu erreichen. Einige Helfer versuchen sogar, zu Fuß oder mit Packtier zu den zerstörten Dörfern vorzudringen. Rund 86.000 Todesopfer forderte das Erdbeben in Pakistan, weitere knapp 2.000 in Indien. Drei Millionen Menschen wurden obdachlos und waren ungeschützt dem nahenden Winter ausgesetzt.

Erschütterungen an den „Nähten“ der Erde

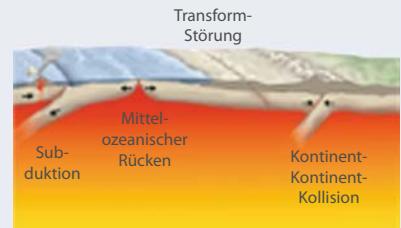
Was aber haben die Plattengrenzen mit Erdbeben zu tun? Die Ursache liegt in der Tiefe, in den Verwerfungen im Gestein, die diese Plattengrenzen erzeugen. Neun der zehn stärksten Erdbeben der letzten 100 Jahre fanden an Subduktionszonen statt. Durch Vorsprünge und Widerstände im Untergrund verhakt sich das Gestein dort häufig. Da sich die Platten trotzdem weiterbewegen, wächst die Spannung an. Irgendwann wird der Druck zu groß, das Gestein bricht ruckartig und als Folge bebt die Erde. Die Subduktionsgebiete verlaufen fast durchgehend an den Westküsten Nord- und Südamerikas bis nach Japan und zu den Inselbögen Südostasiens und bilden den Pazifischen Feuerring. Er ist nicht nur ein Bereich hoher tektonischer, sondern auch vulkanischer Aktivität.

Die Gleitbewegung an einer Transformstörung verläuft ebenfalls nicht reibungslos, wie beispielweise die zahlreichen Erdbeben entlang des San-Andreas-Grabens in Kalifornien oder im Nordwesten der Türkei zeigen. Hier grenzen die Afrikanische und die Eurasische Platte aneinander. Angetrieben von der Plattentektonik wandert der zentrale Bereich der Türkei mit zwei bis drei Zentimetern pro Jahr nach Westen, aber ein Teil seines oberen Rands hängt an Asien fest und verhakt dort an einer großen tektonischen Störung, der nordanatolischen Verwerfung. Dieser Teil geht nicht kontinuierlich mit, sondern bleibt zurück und springt dann immer ruckartig hinterher, wenn die Spannung zu groß geworden ist. Deshalb tritt in der Türkei durchschnittlich alle 15 bis 20 Jahre ein schweres Erdbeben auf. Zuletzt im Jahr 1999 hinterließ ein schweres Beben nahe der Stadt Izmit 18.000 Tote, zahlreiche Verletzte und Sachschäden in Millionenhöhe. Das Beben der Stärke 7,4 war auch in der knapp 100 Kilometer nordwestlich gelegenen Millionenstadt Istanbul noch deutlich zu spüren.

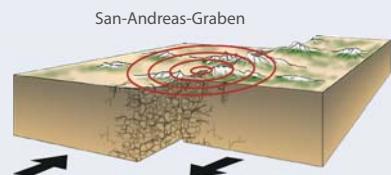
Aber nicht nur an Transformstörungen, auch in Regionen, in denen zwei kontinentale Erdplatten frontal miteinander zusammenstoßen, kann die Erde beben. Die gewaltigen Kräfte, die bei den Plattenbewegungen frei werden, falten, zerbrechen und verschieben das Gestein in diesen Zonen, wölben Gebirge auf und lösen Erdbeben aus, wenn sich die Spannung plötzlich entlädt. Die meisten Beben in Indien, China und Tibet gehen auf eine Kollision der Eurasischen mit der Indisch-Australischen Platte zurück.

Warum die Erde auch in Deutschland bebt

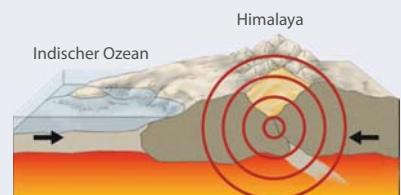
Aber nicht nur an den Grenzen der tektonischen Platten, auch mitten darauf, im Inneren solcher Platten, kann die Erde plötzlich und unerwartet schwanken. Die spektakulärsten Beben dieser Art fanden von Dezember 1811 bis Januar 1812 im amerikanischen New Madrid statt – mehr als 1.600 Kilometer vom nächsten Plattenrand entfernt. Mit drei Stößen der Stärken 8,1 bis 8,3 handelte es sich dabei um das stärkste Beben aller Zeiten innerhalb der USA. Auch in Europa wurden bereits schwere Beben mitten auf der Eurasischen Platte registriert, so zum Beispiel das Erdbeben in der Schweiz 1356, von dem zahlreiche Erzählungen und Gemälde zeugen. Nach heutigen Schätzungen hatte das Beben mit dem Epizentrum in der



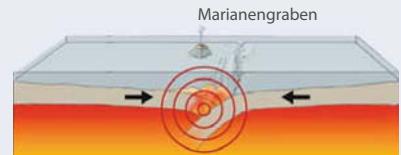
Die aus der Plattentektonik resultierenden Prozesse sind der Ausgangspunkt für Erdbeben.



Prinzip einer Transformstörung, bei der sich zwei Platten seitlich gegeneinander verschieben.



Bei der Kontinent-Kontinent-Kollision bewegen sich zwei Kontinentalplatten aufeinanderzu.

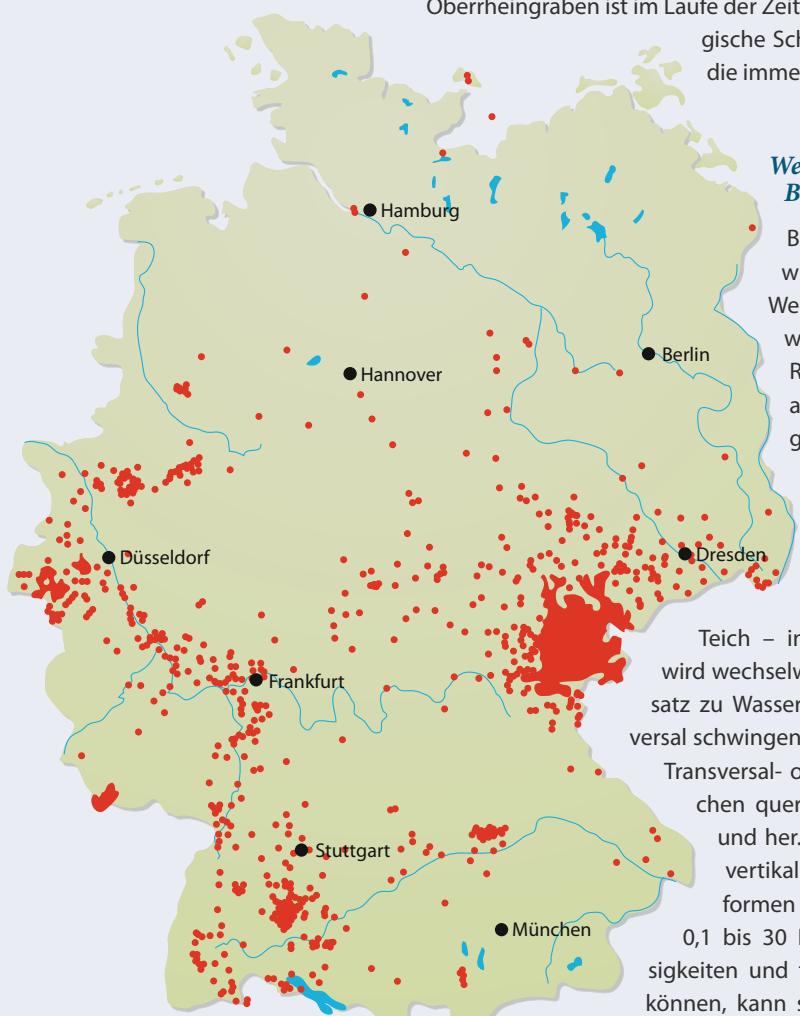


Bei der Subduktion taucht bei einer Kollision die ozeanische Platte unter die Kontinentalplatte ab.
© MMCD NEW MEDIA

Nähe von Basel eine Stärke von 7,4. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Spannungen, die an den Plattenrändern entstehen, sich auf den gesamten starren Plattenkörper übertragen und dadurch im Inneren zu starkem Druck führen. Erdbeben entstehen, wenn geologische Schwachstellen vorhanden sind, die diesem Druck nachgeben. Solche Stellen können zum Beispiel alte Brüche oder ehemalige Plattenrandzonen sein, die im Laufe der Erdgeschichte ins Platteninnere verlagert wurden.

Auch die Erdbeben in Deutschland können so erklärt werden: Die Afrikanische Platte wandert langsam nach Norden und übt Druck auf die Eurasische Platte aus. Durch diese enormen Kräfte wurden die Alpen über Jahrtausende hinweg um viele Kilometer emporgehoben und wachsen auch heute noch um einige Millimeter pro Jahr an. Von dieser Hebung sind auch Süddeutschland und Ostfrankreich betroffen – wenn auch in geringerem Maße. Der zwischen ihnen liegende Oberrheingraben ist im Laufe der Zeit eingebrochen und bildet heute eine geologische Schwachstelle – eine Wunde in der Erdkruste, die immer wieder aufbricht.

*Die Verteilungskarte der Erdbebenherde der letzten 30 Jahre weist deutliche Schwerpunkte auf.
© BGR/MMCD NEW MÉDIA*

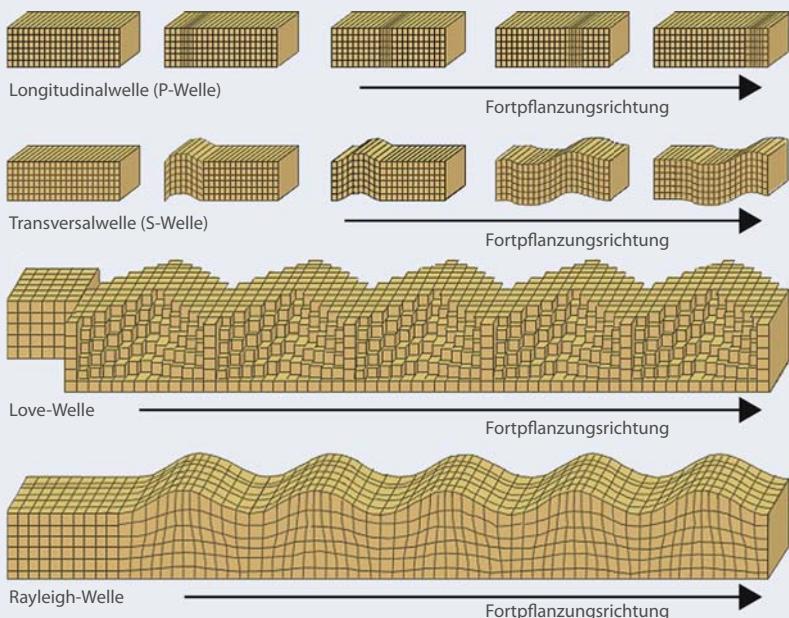


Wellensalat im Untergrund: die Bebenwellen

Bricht Gestein an einer tektonischen Störung, wird die frei werdende Energie in Form von Wellen abgegeben – die Erde bebt. Die häufig wahrgenommene Abfolge von Schütteln, Rollen und Schaukeln bei einem Beben geht auf unterschiedlich schnell aufeinanderfolgende Wellenformen zurück.

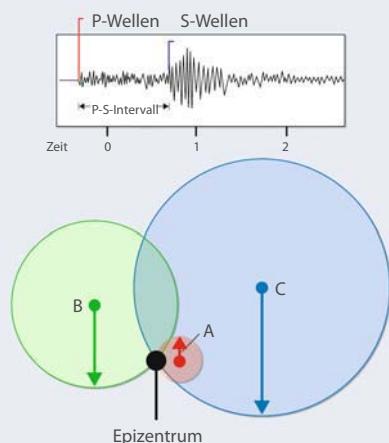
Bei den sich am schnellsten ausbreitenden Wellen, den P- oder Primärwellen, schwingen die Gesteinspartikel – ähnlich wie bei Wasserwellen in einem Teich – in ihrer Ausbreitungsrichtung, das Gestein wird wechselweise komprimiert und gedehnt. Im Gegensatz zu Wasser oder Luft kann Gestein aber auch transversal schwingen. Bei dieser Schwingung, den so genannten Transversal- oder S-Wellen, bewegen sich die Bodenteilchen quer zur Ausbreitungsrichtung der Wellen hin und her. Das Gestein wird dadurch horizontal oder vertikal verformt und geschüttelt. Beide Wellenformen schwingen in einem Frequenzbereich von 0,1 bis 30 Hertz. Während die P-Wellen sich in Flüssigkeiten und fester Materie gleichermaßen fortpflanzen können, kann sich die S-Welle nur in festem scherbaren

Ort und Datum	Todesopfer	Magnitude	Beschreibung
Shaanxi, China 02. Februar 1556	830.000	Ge-schätzt 8,25	Chinesische Chroniken berichten, dass das Beben im Umkreis von 1.000 Quadratkilometern alles verwüstete. Vermutlich starben mehr als 830.000 Menschen, die meisten von ihnen durch den Einsturz von Wohnhöhlen, in denen der Großteil der Bevölkerung lebte. Noch drei Jahre danach traten starke Nachbeben auf.
Tanshan, China 27. Februar 1976	655.000	7,5	Offiziell forderte das Tangshan-Beben 255.000 Menschenleben, inoffizielle Schätzungen gehen jedoch sogar von bis zu 655.000 Opfern aus. Damit ist dieses Beben das opferreichste der letzten 400 Jahre. Die Schäden waren noch im 140 Kilometer entfernten Peking verheerend.
Sumatra, Indonesien 26. Dezember 2004	228.000	9,1	Das Beben im Meeresgrund vor Sumatra gilt bis heute als das drittstärkste seit 1900. Es löste einen Tsunami aus, der in 14 Ländern Südasiens und Ostafrikas schwere Verwüstungen anrichtete. Auch Erdrutsche, Ausbrüche von Schlammvulkanen und Bodenverflüssigungen ereigneten sich. Am schwersten getroffen wurde die Provinz Banda Aceh auf Sumatra. Insgesamt starben 228.000 Menschen während und nach dem Tsunami, bis zu zwei Millionen wurden obdachlos.
Gansu (Ningxia), China 16. Dezember 1920	200.000	7,8	In der Region Lijunbu-Haiyuan-Ganyanchi erreichte die Intensität dieses Bebens den Wert von XII: maximale Verwüstung. Auf einer Länge von 200 Kilometern hob sich der Boden, Erdrutsche begruben ganze Ortschaften, Flüsse veränderten ihren Lauf oder wurden blockiert. Die Anzahl der Todesopfer wird auf 200.000 geschätzt.
Kanto, Japan 01. September 1923	140.000	7,9	Das „Große Kanto-Beben“ gilt als das schlimmste der japanischen Geschicke. Aufklaffende, meterbreite Bodenspalten, Schlammlawinen, Erdrutsche und das ausbrechende Großfeuer vernichteten beinahe ganz Tokio. Die Feuersäulen des entstehenden Brandes waren noch in über 150 Kilometer Entfernung zu sehen. 140.000 Einwohner Tokios, Yokohamas und umliegender Orte kamen ums Leben.
Ashkabad, Turkmenistan 05. Oktober 1948	110.000	7,3	In der Region Ashkabad ließ das Beben nahezu alle Wohngebäude, meist aus Ziegeln errichtet, kollabieren. Nach neueren Informationen soll es bis zu 110.000 Tote gegeben haben. Die Erschütterungen richteten auch an Betonbauten schwere Schäden an und ließen Züge entgleisen.
Sichuan, China 12. Mai 2008	87.000	7,9	Das Erdbeben hinterließ mindestens 87.000 Tote und 374.000 Verletzte. Mehr als 15 Millionen Menschen wurden evakuiert, über fünf Millionen wurden obdachlos. Insgesamt waren zehn Provinzen mit 45 Millionen Menschen betroffen.
Kaschmir, Pakistan 08. Oktober 2005	86.000	7,6	Die Erdstöße ließen rund 200.000 Häuser einstürzen und machten vier Millionen Menschen obdachlos. Mit 86.000 Toten, rund 200.000 Verletzten und mehr als drei Millionen Obdachlosen gilt das Kaschmir-Beben nach dem Tsunami vom Dezember 2004 als die schlimmste Naturkatastrophe der letzten Jahrzehnte. Erdrutsche, Steinschläge und Bodensenkungen ereigneten sich auch in Indien und Bangladesch.
Messina, Italien 28. Dezember 1908	72.000	7,2	Mehr als 40 Prozent der Einwohner Messinas und ein Viertel der Bevölkerung Kalabriens fiel dem Beben, dem daraus resultierenden Tsunami sowie Bränden im Stadtgebiet zum Opfer. Die Erdstöße waren auch in Albanien, Montenegro und auf Malta zu spüren. Noch 1913 ereigneten sich Nachbeben.
Chimbote, Peru 31. Mai 1970	70.000	7,9	Der Ort Huaraz wurde durch einen Erdrutsch fast völlig zerstört, ein weiterer begrub die Stadt Yungay komplett unter sich und tötete 20.000 Menschen. Insgesamt forderte das Beben rund 70.000 Todesopfer, viele davon durch sekundäre Folgen wie Lawinen, Erdrutsche und Schlammlawinen.
Bam, Iran 26. Dezember 2003	26.000	6,7	Die hohe Opferzahl von rund 26.000 Menschen beim Bam-Beben war auf die Lehmziegelbauweise in der Altstadt zurückzuführen. Die Stahlbeton- und Stahlrahmenbauten in der Industriezone im Südosten blieben zum großen Teil unbeschädigt. Stark zerstört dagegen wurde die Festung Arg-e-Bam, die als Touristenattraktion vor dem Beben nicht unerheblich zum Wirtschaftsaufkommen der Region beigetragen hatte.



Unterschiedliche Schwingungsrichtungen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten charakterisieren die bei einem Beben entstehenden Wellentypen.
© MMCD NEW MEDIA

Aus der Zeit, die zwischen dem Eintreffen der Primär- und der Sekundärwellen vergeht, kann die Entfernung des Bebenherds errechnet werden. Drei voneinander entfernt liegende Messstationen können die Lage des Epizentrums bestimmen.
© MMCD NEW MEDIA



Gestein ausbreiten und wird daher von den flüssigen Bereichen des Erdinneren „geschluckt“.

Die P-Wellen pflanzen sich mit 6 bis 13 km/s fast doppelt so schnell fort wie die S-Wellen, die pro Sekunde nur zwischen 3,5 und 7,4 Kilometer zurücklegen. Aus dem zeitlichen Abstand der beiden Wellentypen in einem Seismogramm lässt sich die Entfernung des Bebenherdes und die Herdtiefe berechnen.

Erreichen die S- und P-Wellen die Oberfläche, werden sie in die zerstörerischen Oberflächenwellen umgewandelt. Bei diesen wird die Energie ausschließlich entlang oder nahe der Oberfläche geleitet, tiefer im Untergrund ist die Gesteinsbewegung meist

nur minimal. Zwei Haupttypen von Oberflächenwellen werden unterschieden: Die Love-Wellen, benannt nach dem englischen Physiker Augustus E. H. Love, verformen das Gestein ausschließlich in horizontaler Richtung. Durch ihre oft großen Amplituden gehören diese seitlichen Schwingungen des Bodens zu den zerstörerischsten Wellen eines Bebens, da sie besonders an Gebäuden enorme Schäden anrichten können.

Der 1885 zuerst von Lord Rayleigh beschriebene und nach ihm benannte zweite Typ von Oberflächenwellen erzeugt dagegen rollende Bewegungen des Untergrunds. Während einer Rayleigh-Welle bewegen sich die Gesteinspartikel elliptisch auf einer vertikalen Ebene.

Da alle diese Wellen eine jeweils leicht unterschiedliche Laufzeit haben, besteht ein Erdbeben aus einer Abfolge unterschiedlicher Bodenbewegungen. Die zuerst eintreffenden P-Wellen erzeugen eine Dehnung und Kompression des Bodens, richten aber meist keine großen Zerstörungen an. Einige Zeit später folgen die S-Wellen, die etwas länger anhalten als die P-Wellen. Kurz darauf treffen die Love-Wellen, gefolgt von den Rayleigh-Wellen, ein. Die bebenden und rollenden Bewegungen dieser Oberflächenwellen halten relativ lange an und bilden den Hauptteil eines Bebens. Den Abschluss eines Bebens bildet meist eine Mischung aus den unterschiedlichen Wellentypen, die durch mehrfache Brechung und komplexe Gesteinsstrukturen erst verzögert eintreffen.

Eine Frage der Skalen: Wie messe ich ein Erdbeben?

Tritt irgendwo auf der Welt ein Erdbeben auf, lautet die erste Frage meist: Wie stark war das Beben? Um die Stärke eines Erdbebens anzugeben und verschiedene Beben miteinander zu vergleichen, gibt es unterschiedliche Methoden.

Wenn es darum geht, die zerstörerischen Auswirkungen zu vergleichen, sprechen Erdbebenforscher von der Intensität eines Bebens. Die dafür genutzte Mercalli-Skala wurde 1902 von Giuseppe Mercalli entwickelt und später modifiziert. In dieser Skala werden die Folgen der Erschütterungen, wie zum Beispiel sichtbare Schäden an Bauwerken, Veränderungen an der Landoberfläche und die subjektiven Berichte von anwesenden Beobachtern beschrieben („große Spalten im Mauerwerk, ältere Häuser stürzen ein“). Jedem Beben – auch in Regionen, in denen es keine Seismographen gibt, – kann dadurch eine Intensität zugewiesen werden. Auch erlaubt die Anwendung dieser Skala einen Vergleich mit historischen Erdbeben.

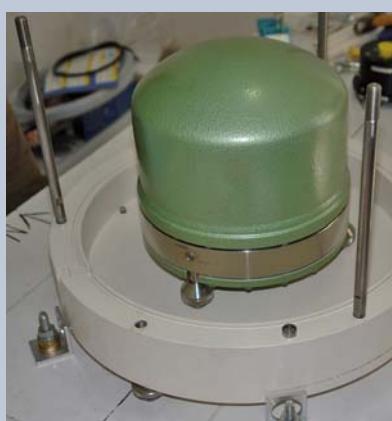
Die Europäische Makroseismische Skala (EMS) und die modifizierte Mercalliskala basieren auf den sicht- und fühlbaren Auswirkungen eines Erdbebens und der damit verbundenen Schäden.

EMS-In-tensität 1998	Modified Mercalli (MM) 1956	Bezeichnung	Auswirkungen
I	I	Nicht wahrnehmbar	Nur mit Instrumenten nachweisbar.
II	II	Kaum wahrnehmbar	Vereinzelt spürbar in den oberen Geschossen von Hochhäusern, hängende Gegenstände pendeln leicht.
III	III	Schwach	Vor allem von ruhenden Personen deutlich spürbar, Vibrationen ähnlich den Erschütterungen von Fahrzeugen.
IV		Allgemein spürbar	In Häusern allgemein spürbar, draußen von wenigen wahrgenommen, Gegenstände schwanken, Fenster klinnen.
V	IV	Stark	Viele Schlafende erwachen, Gebäude zittern, Türen schlagen, Fenster können zer-springen, hängende Gegenstände pendeln stark.
VI	V		
VI	VI	Leichte Schäden	Leichte Gebäudeschäden, Risse im Putz, schwere Möbelstücke bewegen sich.
VII	VII	Schäden	Menschen flüchten ins Freie, mäßige Gebäudeschäden, Kamine und Trennwände stürzen ein, Risse entstehen im Mauerwerk.
VIII	VIII	Starke Schäden	Große Spalten im Mauerwerk, ältere Häuser und Giebelteile stürzen ein, Bäume schwanken, in weichen Böden werden Wellen sichtbar.
IX	IX	Zerstörend	Wand- und Dacheinstürze auch bei gut gebauten Häusern, Erdrutsche, Bodenrisse.
X	X	Stark zerstörend	Backsteinbauten werden zerstört. Bodenspalten bis zu einem Meter, Dämme und Deiche werden beschädigt, Schienen verbogen.
XI	XI	Verwüstend	Nur wenige Gebäude stehen noch, auch erdbebensichere Gebäude erleiden schwere Schäden, Rutschungen und breite Bodenspalten treten auf.
XII	XII	Völlig verwüstend	Völlige Zerstörung von Gebäuden, Veränderung der Bodentopographie, Bebenwellen auf der Bodenoberfläche sichtbar.

Vom Drachen zum Strong-Motion-Sensor



| © GFZ



| © GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum



| © USGS

Das Drachen-Seismoskop

Der chinesische Geograph und Astronom Chang Heng entwickelte im Jahr 132 n. Chr. eines der ersten Erdbebenmessinstrumente aller Zeiten. Das berühmte Drachen-Seismoskop bestand aus einem etwa zwei Meter großen Metallgefäß, an dem acht Drachen – für die acht wichtigsten Himmelsrichtungen – befestigt waren. In ihren Mäulern hielten sie jeweils eine Metallkugel, die bei den ersten Erdstößen durch einen Mechanismus im Inneren des Gefäßes aus ihrer Halterung gelöst werden konnten. Die Richtung, aus der das Beben kam, konnte daran abgelesen werden, welcher Drache seine Kugel fallen ließ. Durch die hohe Reibung der einzelnen Bestandteile des Mechanismus kann dieses Seismoskop nicht sehr sensibel für schwache Bebenwellen gewesen sein, vermutlich registrierte es nur solche, die von Menschen und Tieren ohnehin wahrgenommen werden konnten.

Seismographen

Den ersten Seismographen, der nicht nur die Ankunft von Bebenwellen registrierte, sondern auch die Bodenerschütterungen in ihrem zeitlichen Verlauf aufzeichnen konnte, entwickelte 1892 der englische Professor für Ingenieurwissenschaften John Milne mit seinen Kollegen James Ewing und Thomas Gray. Das Prinzip des Gerätes, nach dem auch die modernen Seismographen funktionieren, beruht auf der Trägheit einer aufgehängten Masse: Ein an einem Rahmen frei aufgehängtes Pendel bleibt in seinen Bewegungen hinter denen des Erdbodens zurück und kann genutzt werden, um die relative Bewegung des Bodens bei einem Beben zu registrieren. Das große Erdbeben in San Francisco 1906 wurde mithilfe eines solchen Ewing-Seismographen aufgezeichnet. Heute werden die Signale elektronisch verstärkt und gefiltert, so dass nur die seismologisch interessanten Wellenlängen digital gesichert werden. Observatorien arbeiten traditionell mit einer Reihe von Seismographen, deren Sensibilitätsstufen unterschiedliche Frequenzen abdecken.

Strong-Motion-Sensoren

Sollen starke Beben aus der Nähe überwacht werden, sind normale Seismographen ungeeignet, da die Pendel in ihrem Inneren bei diesen starken Erschütterungen überdrehen und sogar zerbrechen können. Nach dem Erdbeben von San Francisco 1906 begann man daher mit der Entwicklung von robusten Geräten, die über Monate oder Jahre unbeaufsichtigt in „Warteposition“ stehen bleiben. Mit dem ersten stärkeren Erdstoß können sie selbständig mit der Aufzeichnung beginnen. Im Gegensatz zu Seismographen arbeiten diese „Strong-Motion“-Beschleunigungsmesser nicht mit einem Pendel als Trägheitsmoment, sondern mit Federn, die nicht annähernd so empfindlich auf langsame Bodenbewegungen oder Temperaturänderungen reagieren wie Pendel. Mit ihnen lassen sich die herznahen Erschütterungen starker Beben aufzeichnen, bei denen die Bodenbeschleunigung fünf bis 20 Hertz über der Erdbeschleunigung liegen kann.

Im Gegensatz zur Intensität steht die Magnitude eines Bebens, die auf physikalisch messbaren Parametern beruht. Je nachdem, von welcher Skala dabei ausgegangen wird, kann die Antwort auf die Frage nach der Stärke allerdings sehr unterschiedlich ausfallen. Die früher gängigste und einfachste Methode der Stärkenbestimmung lässt sich direkt aus dem Seismogramm eines Bebens ermitteln: Aus der Amplitude – dem Ausschlag des Seismographen – der registrierten Erdbebenwellen wird die Stärke eines Bebens berechnet. Im Gegensatz zur Intensität eines Erdbebens, die hauptsächlich durch Schadensbeschreibungen bestimmt wird, ist die Stärke eines Bebens daher ein rechnerisch definierter Wert.

Die bekannteste Stärken-Skala entwickelte der kalifornische Seismologe Charles Richter 1935: Aus dem Maximalausschlag in einem Seismogramm, der Entfernung zum Bebenherd und einigen Korrekturfaktoren berechnete er die Stärke. Der Bebenstärke liegt eine logarithmische Skala zugrunde, so dass ein Beben der Stärke 4 zehn Mal stärker ist als eines der Stärke 3. Mithilfe von an verschiedenen Orten aufgestellten Seismographen kann man die genaue Lage des Bebenherdes bestimmen. Aus dem Intervall zwischen dem Eintreffen der P- und der S-Wellen an mindestens drei verschiedenen Messpunkten werden die jeweiligen Entfernungen zum Epizentrum berechnet. Zeichnet man diese Entfernungen in einer Karte als konzentrische Kreise um die Erdbebenstationen, schneiden sie sich in einem Punkt – im Epizentrum. Obwohl die Richterskala in der Öffentlichkeit und in den Medien teilweise noch verbreitet ist, wird sie in der seismologischen Forschung kaum noch verwendet. Denn sie unterscheidet nicht nach Wellentypen und der dafür benötigte Seismograph hat nur begrenzte Aufzeichnungskapazitäten. Erdbeben mit Magnituden größer als 7 werden so nicht mehr exakt erfasst.

Neben spezielleren, aus der Richter-Skala abgeleiteten Magnituden für Oberflächenwellen und P-Wellen („body waves“), wird heute primär das „seismische Moment“ als Maß der mechanischen Krafteinwirkung auf eine geologische Störung genutzt. Für die Höhe des seismischen Moments sind dabei in erster Linie drei Werte verantwortlich: die elastische Festigkeit des Gesteins, die Größe des Bereichs, auf den die Kraft einwirkt, und die Länge der Verschiebung, die bei einem Beben an der Bruchstelle auftritt. Praktischerweise lassen sich die Kenngrößen der so genannten Moment-Magnitude sowohl aus jedem Seismogramm als auch direkt mit Feldmessungen an der Störungsstelle ermitteln. Der Wert berücksichtigt sämtliche Wellentypen und gilt als aussagekräftiges Maß für die mechanische Kraft eines seismischen Ereignisses.

Was macht ein Beben besonders zerstörerisch?

Bei einem Erdbeben wird die gewaltige Kraft und Energie, die sich im Untergrund verbirgt, in Sekundenschluss freigesetzt. Sie verwandelt Städte in Ruinen und gestaltet Landschaften komplett um. Überall, wo Erdbeben auftreten, kommt es zu Verschiebungen des Erdbodens. Mehrere Meter breite Spalten entstehen und der Erdboden wird ineinander verschoben. Küsten erheben sich aus dem Wasser und ganze Berge kommen ins Rutschen. Oft sind auch Lawinen und Tsunamis direkte

Erdrutsch



Entferntes Erdbeben



Tektonisches Erdbeben



Erdbeben unter einem Vulkan



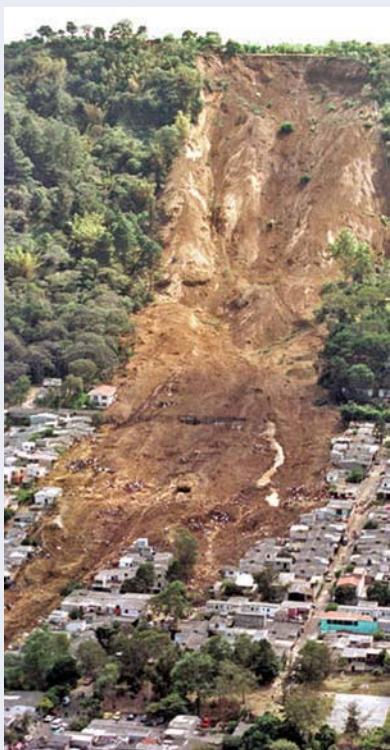
Steinschlag



Rutschender Gletscher



Seismogramme von Beben verschiedener Ursache zeigen jeweils charakteristische Ausprägungen. © MMCD NEW MEDIA



Erdrutsch, ausgelöst durch ein Erdbeben in El Salvador 2001.
© USGS

Bodenverflüssigung wie hier auf einem Feld bei Watsonville/USA ist einer der Sekundäreffekte eines Erdbebens. © USGS/J. C. Tinsley



Folge von Erdbeben. Entscheidend für das Ausmaß der zerstörerischen Wirkung eines Bebens ist nicht allein seine Stärke sondern auch die Beschaffenheit des Untergrundes. Welche Folgen dies haben kann, enthüllte im Jahr 1985 das Beben von Mexico City. Das Epizentrum des Bebens lag damals bei Zacaleta am Pazifikrand, mehr als 350 Kilometer von Mexico City entfernt. Mit einer Magnitude von 7,8 auf der Richterskala erreichten die Schwingungen dort teilweise mehr als die 20-fache Erdbeschleunigung, schwächten sich aber auf dem Weg ins Landesinnere ab und richteten in den Stadtteilen, die auf festem Untergrund errichtet worden waren, nur wenig Schaden an. Ganz anders jedoch in den Stadtgebieten, die auf dem weichen Sediment eines ehemaligen Sees lagen: Sie wurden Opfer einer doppelten Resonanzkopplung zwischen Erdbeben und Untergrund sowie zwischen Untergrund und Gebäuden. Aufgrund seiner beispielhaften Ausprägung wurde dieser Effekt als Mexico-City-Effekt bekannt. Grundsätzlich sind in Gebieten mit felsigem Untergrund aus Granit oder Basalt die Auswirkungen eines Erdbebens weit weniger katastrophal als in Gebieten mit sandigem und feuchtem Boden.

Messungen ergaben, dass der ehemalige Seegrund eine Eigenschwingungsperiode von ein bis drei Sekunden hatte. Für die ankommenden Oberflächenwellen des Bebens wirkte der Untergrund damit wie ein Resonanzboden und verstärkte die Wellen mit dieser Frequenz um das fünf- bis 20-fache. Im gesamten ehemaligen Seebereich schwankte dadurch der Boden mit der bis zu zehnfachen Erdbeschleunigung um zehn bis 40 Zentimeter hin und her. Da die Eigenschwingung vieler Hochhäuser ebenfalls in diesem Frequenzbereich lag, potenzierte sich die Schadwirkung zusätzlich. Ähnliche Effekte waren auch bei den Beben von Loma Prieta in Kalifornien 1989 zu beobachten.

Messungen mithilfe von Strong-Motion-Beschleunigungsmessern ergaben für die seismischen Wellen in der Nähe des Epizentrums niedrigere Amplituden als im fast 100 Kilometer vom Bebenherd entfernten San Francisco. Verursacht wurde dies zum einen dadurch, dass ein Großteil der Wellen an der Basis der Erdkruste reflektiert wurde und erst 80 bis 100 Kilometer vom Epizentrum an die Oberfläche trat. Andere Wellenzeuge wurden von den Gesteinsformationen der Bay-Area in Richtung auf San Francisco abgelenkt. Zum anderen liegen große Teile der Stadt auf künstlich aufgeschüttetem Untergrund. Im Marina District verstärkte dieser unverfestigte Boden die Erdbebenwellen um das achtfache, zusätzlich sackte der gesamte Landstrich durch Verflüssigung des wasserhaltigen Untergrundes um 13 Zentimeter ab.

Manchmal werden durch die Erschütterungen Luft und/oder Wasser aus den Poren verdrängt. Als Folge sacken die auflagernden Bodenschichten nach, der Untergrund senkt sich. Ist der Untergrund bei solchen Setzungen sehr wasserhaltig und locker, wie häufig bei Sandboden, kann auch die so genannte Liquefaktion eintreten: Der Boden verflüssigt sich schlagartig zu einem instabilen Sand-Wasser-Brei. Ein ähnlicher Effekt lässt sich am Strand beobachten: Beim Auftreten

Der Kobe-Schock: von der Überraschung zum Erdbebentraining

Nur 20 Sekunden veränderten im Januar 1995 das Schicksal einer ganzen Stadt und prägten das gesamte Land. Denn in dieser Zeit zerstörte ein Erdbeben mit einer Stärke von 6,9 auf der Richterskala große Teile der japanischen Stadt Kobe. Mit mehr als 5.000 Toten und über 150.000 eingestürzten Gebäuden war es eines der folgenreichsten Erdbeben in Japan überhaupt. Auch wenn die japanische Inselkette in einer der am meisten gefährdeten Regionen der Erde liegt, das Beben von Kobe kam als Überraschung. Denn der Westen des Landes galt immer als relativ sicher. Eher hatte man mit einem erneuten Beben in Tokyo gerechnet. Entsprechend unvorbereitet zeigten sich auch die zuständigen Behörden. Die Informationslage war unzureichend, Rettungsmannschaften verharren zunächst einmal tatenlos.

Auch die Feuerwehr war hoffnungslos überfordert mit den zahlreichen, über das ganze Stadtgebiet verteilten Feuern. Eine Fläche von über 100 Hektar brannte ab, der Sachschaden

lag bei umgerechnet 100 Milliarden Euro. Die angeblich erdbebensichere Trasse der vierstrigen Autobahn brach innerhalb von Sekunden ein, ebenfalls als erdbebensicher geltende Häuser wurden vollständig zerstört. Aber auch zahlreiche niedrige Holzbauten, die in den meisten Vierteln vorherrschten, stürzten ein und rissen andere wie Dominosteine mit sich. Nach dem Beben waren mehr als 300.000 Menschen obdachlos.

Der Schock von Kobe war heilsam. Seitdem wird in ganz Japan die Gefahr durch Erdbeben ernster genommen. Nicht nur technische Lösungen wie erdbebensicheres Bauen oder besonders gesicherte Kraftwerke und Leitungen gehören dazu, sondern auch Informationen über das individuelle Verhalten im Katastrophenfall. Alljährlich finden am ersten September, dem Gedenktag des Großen Kanto-Erdbebens 1923, Katastrophenübungen statt, an denen nahezu die gesamte Bevölkerung beteiligt ist. Trainiert werden Evakuierungsrouterien, aber auch das Verhalten während des Bebens: Nicht

auf die Straße rennen, sondern unter einem Tisch oder Türrahmen Schutz suchen. In Tokyo sind die Evakuierungsgebiete in einigen Bezirken als Nummern auf den Straßenschildern kenntlich gemacht. Gegen die Brände wurden in den meisten Straßen Feuerlöscher angebracht, die bei Bedarf von jedem genutzt werden können. Auch Privatpersonen sind dazu aufgefordert, mindestens einen Feuerlöscher in der Wohnung zu haben und sich mit der Handhabung vertraut zu machen. Schon als Kinder lernen die Japaner zudem, wie wichtig ein gepackter Notfallrucksack sein kann. Darin sollten sich haltbare Lebensmittel, Trinkwasser, Erste-Hilfe-Utensilien und ein Radio befinden, um stets die neuesten Katastrophenmeldungen zu empfangen. Noch hat kein Superbeben die Effektivität dieser Maßnahmen auf die Probe gestellt, aber die Experten sind sich sicher, dass zumindest die Zahl der Opfer dadurch minimiert werden kann.

Schäden durch das Kobe-Erdbeben. © GFDL





quillt dann der zuvor feuchte, aber feste Sand plötzlich als Brei um den Fuß herum nach oben. Im Falle eines Erdbebens hat dies fatale Folgen: Gebäude verlieren den Halt und sinken ein oder kippen. Doch nicht nur der Untergrund, auch das, was sich darauf befindet, die Bausubstanz, bestimmt das Ausmaß der Zerstörung. Bei dem schweren Erdbeben im türkischen Izmit im Jahr 1999 erwies sich die Missachtung von Bauvorschriften für erdbebengefährdete Gebiete als lebensgefährlich. Die billigen und schnell errichteten Häuser hielten dem Beben nicht stand, stürzten ein und begruben tausende von Menschen unter sich. Die grobe Fahrlässigkeit und Profitgier beim Hausbau ist daher immer wieder die Ursache für den unnötigen und tragischen Verlust von Menschenleben bei einem Erdbeben. An Hängen und in Steillagen kann ein Erdbeben ganze Schichten des Untergrunds so destabilisieren, dass größere Erd- und Gesteinsmassen abgleiten und als Erdrutsch niedergehen. Im Extremfall löst so ein einziges Beben hunderte von Erdrutschen aus. Spektakulär, aber meist weniger zerstörerisch sind Erdrisse und -spalten, die über oder nahe dem Erdbebenherd entstehen.

Die Oberfläche hält dem plötzlichen Versatz des Untergrunds nicht stand und reißt. Solche Spalten sind vor allem bei Beben mit sehr flachen Herden oder großer Stärke häufig. Besonders in Ballungsräumen ist es oft die Infrastruktur selbst, die die größten Gefahren darstellt: Straßen brechen auf oder werden durch einstürzende Gebäude unpassierbar. Schienen verwerfen sich, Brücken stürzen ein. Geborstene Gas- oder Stromleitungen lösen Kurzschlüsse aus. Die resultie-



renden Brände können ganze Stadtgebiete dem Erdboden gleichmachen, wie zum Beispiel 1906 in San Francisco. Damals verwüstete eine Feuersbrunst die ohnehin schon stark zerstörte Stadt. Es starben mehr Menschen durch Brände als durch einstürzende Gebäude.

Hauptsächlich durch Feuer verursachte Zerstörungen nach dem Erdbeben in San Francisco 1906 © National Archives and Records Administration

Was tun gegen ein unvorhersagbares Beben?

Trotz aller Versuche, Erdbeben zu erforschen und ihre Vorzeichen zu enthüllen, gibt es bislang keine allgemeinen Kriterien für ein sich ankündigendes Beben. In vielen Fällen lassen sich Veränderungen des Gesteinsdrucks, des Magnet- oder Schwerefeldes oder der Neigung von Gesteinsschichten messen. Auch ungewöhnliche Bewegungen des Grundwasserspiegels, Mikrobeben oder ein Austritt von Radongas können Hinweise auf ein kommendes Beben sein. Doch Sicherheit über das Wann und Wo geben diese Vorzeichen nicht. Zudem sind die Überwachungsmethoden für eine solche Vielzahl von Parametern aufwändig und teuer.

Ein solch eng gestecktes Messnetz gibt es allerdings – zu Forschungszwecken – im erdbebengefährdeten Parkfield in Kalifornien. Der kleine Ort liegt im Bereich der San-Andreas-Verwerfung und ist für die Seismologen besonders interessant, weil dort Erdbeben bisher mit fast uhrwerksartiger Genauigkeit auftraten: rund alle 22 Jahre ein Erdbeben mit der Magnitude von etwa 6,0 auf der Richterskala. Auf der Suche nach Prognosemöglichkeiten und Vorläufersignalen für Beben erschien den Wissenschaftlern der U.S. Geological Survey gerade diese vermeintliche Bere-



Hinweisschild auf
Evakuierungsroute in Japan.
© Public domain

chenbarkeit des nächsten seismischen Ereignisses ideal für eine Versuchsstation. Anfang der 1980er Jahre – rechtzeitig zum nächsten Beben – entstand dort ein gigantisches Versuchsfeld, gespickt mit seismologischen und geodätischen Messstationen aller Art. Da das letzte Beben 1966 registriert worden war, wurde das nächste größere Beben irgendwann zwischen 1988 und 1992 erwartet, nach den Berechnungen hätte es mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit aber spätestens bis 1993 eintreten müssen. Doch das Beben-„Uhrwerk“ ging offenbar nach: Erst am 28. September 2004, vormittags gegen 10:00 Uhr registrierten die Seismologen die ersehnten Erdstöße der Magnitude 6.

Der Versuch, Zeit und den Ort eines Erdbebens exakt vorherzusagen, ist bis heute nicht geglückt. Anders ist es mit der Langzeitprognose, die auf der Abschätzung des Erdbebenrisikos an einem bestimmten Ort basiert. Grundlage dieser Risikoeinschätzungen war dabei die Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit eines großen Bebens an einer Störungsstelle umso größer wird, je mehr Zeit ohne Erdbeben verstreicht. Die durch die Bewegung der Kontinentalplatten entstehende Spannung baut sich langsam auf und entlädt sich dann plötzlich und ruckweise, wenn zum Beispiel ein bestimmter Grenzwert erreicht wird.

Mithilfe von geologischen Methoden, wie der Datierung von alten Verwerfungen durch die Radiokarbonmethode, versuchen Seismologen, aus der zeitlichen Abfolge von Erdbeben an einer bestimmten Stelle auf die Wiederkehrperioden des Bebens zu schließen. So konnte man beispielsweise für die Tanawa-Verwerfung südwestlich von Tokio eine Wiederholungsrate von etwa 700 plus/minus 80 Jahren ermitteln. Für das Beben des Jahres 2004 vor Sumatra ermittelten Forscher anhand von Sedimentproben eine Wiederholungsrate von rund 600 Jahren. Doch auch solche Berechnungen sind nur bedingt verlässlich: Gibt es in einer Region sehr viele tektonische Störungen, die einander beeinflussen, kann

sich die Wiederholungsrate im Laufe der Zeit verändern. Nimmt an einer Stelle eines solchen ausgedehnten Grabensystems beispielsweise die Spannung durch ein Beben plötzlich ab, kann an einer anderen Stelle die Spannung im Gestein ansteigen und sich dadurch das Erdbebenrisiko dort deutlich erhöhen. Vorherige Wahrscheinlichkeitsberechnungen für das entsprechende Gebiet treffen damit nicht mehr zu.

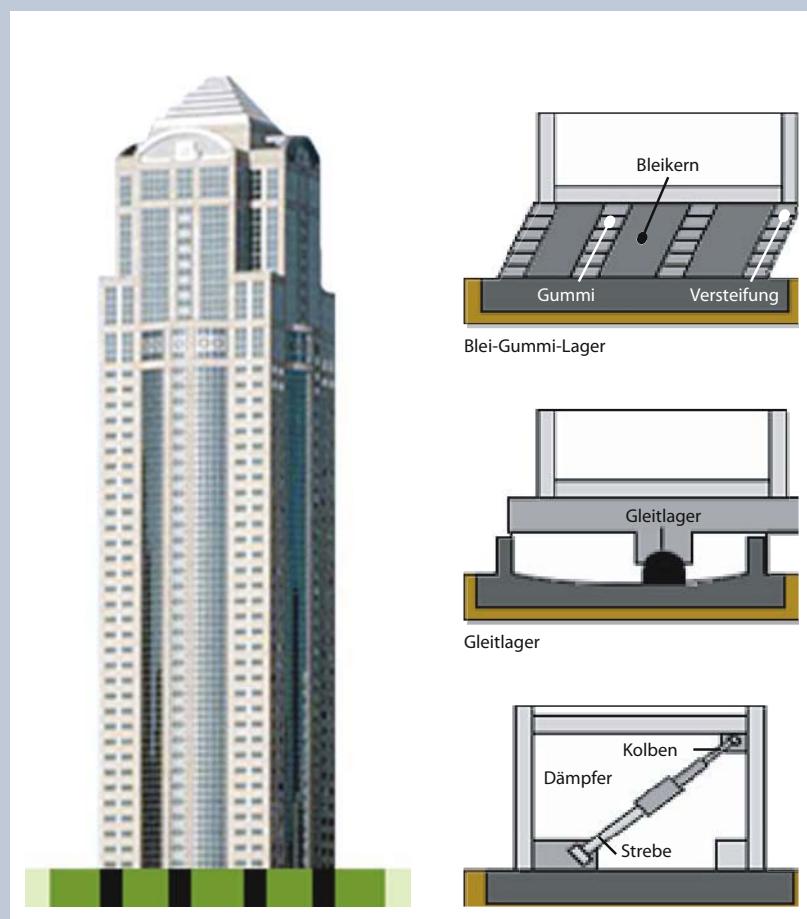
Was also tun? In vielen gefährdeten Gebieten setzen die Menschen heute weniger auf eine Vorhersage als vielmehr auf Vorbeugung, beispiels-

Blick auf eine Messanlage im kalifornischen Parkfield.
© USGS/Scott Haefne



weise durch erdbebensicheres Bauen. Egal wann dann ein Beben kommt, können so größere Schäden vermieden werden. Die meisten Gebäudeschäden entstehen durch die seitlichen Schwingungen des Untergrunds. Um diese abzufangen, haben Ingenieure verschiedene Methoden zur Schwingungsdämpfung entwickelt. So ruhen die Gebäude beispielsweise auf gewaltigen, beweglichen „Stoßdämpfern“ oder aber ein schweres Gewicht in der Gebäudespitze bremst durch seine Trägheit die Ausschläge. Auch Notfallpläne auf Gemeinde-, Provinz- oder staatlicher Ebene sind ein wichtiger Baustein der Katastrophenvorsorge. Hierbei geht es vor allem um die Koordination von schadenmindernden Vorkehrungen und Hilfsmaßnahmen im Katastrophenfalle für alle Beteiligten, aber auch um vorbeugende Öffentlichkeitsarbeit, Einsatzübungen und spezielle Schulungen.

Erdbebensicheres Bauen



| © MMCD NEW MEDIA

Bei einer Blei-Gummi-Dämpfung sitzt die Basis des Gebäudes auf flexiblen Trägern aus Gummi, die im Inneren mit einem Bleikern verstärkt sind. Sie dämpfen die Beschleunigungskräfte so weit, dass das Gebäude den Schwingungen standhalten kann.

Bei einer Gleitlager-Dämpfung ist das Gebäude über ein bewegliches Lager mit seinem Fundament verbunden. Dadurch kann es bei Schwingungen des Untergrunds über die glatte gewölbte Oberfläche des Fundaments gleiten und so die Stöße ausgleichen.

Stoßdämpfer fangen in vielen erdbebensicheren Gebäuden die Kraft der Erdstöße auf. Sie verbinden die senkrechten Stützelemente der Gebäudedbasis mit dem Fundament und geben die ruckartigen Bewegungen des Untergrunds nur gedämpft und verlangsamt an das Gebäude weiter.



Vulkane - gefährliche Feuerspeier

Lavastrom am Pu'u 'O'o auf Hawaii. © Public domain

Glühendes Magma trifft zischend und brodelnd auf eisige Gletscher, Geysire schießen dampfend in die eiskalte Arktisluft und tosende Schmelzwasserströme wälzen sich bedrohlich in die Ebenen – auf Island regieren Feuer und Eis. Vor allem am Vatnajökull, dem größten Gletscher Europas, brodelt es: Gleich mehrere Vulkane verbergen sich hier unter dem bis zu 900 Meter dicken Eispanzer. Im Durchschnitt alle zwei bis drei Jahre bricht einer von ihnen aus – ein grandioses Schauspiel, manchmal mit verheerenden Folgen.

Doch Feuerberge gibt es natürlich längst nicht nur auf Island, sondern auch in vielen anderen Regionen weltweit. Über 500 aktive Vulkane haben Forscher vor kurzem bei einer „Volkszählung“ auf der Erde ermittelt. Dazu kommen unzählige weitere ehemalige Feuerspucker, die aber bis auf Weiteres als erloschen gelten. Diese Vulkane sind nicht zufällig auf der Erdkugel verteilt. Ihr Vorkommen ist eng an geologische Schwachstellen geknüpft. Vor allem an den Nahtstellen der Erdkruste, den Grenzen der großen tektonischen Platten, sitzen sie häufig in dichten Knäueln zusammen – so wie am so genannten Pazifischen Feuerring, einen Vulkangürtel, der nahezu den ganzen Pazifischen Ozean umgibt. Fast 80 Prozent aller Vulkane liegen dabei im Bereich von so genannten Subduktionszonen an konvergierenden, sich aufeinander zu bewegenden Platten. Dort werden die schwereren

ozeanischen Platten unter andere Platten gedrückt. Beim Abtauchen gelangt die Erdkruste jedoch in größere Tiefen und damit in Bereiche höherer Temperaturen. 100 Kilometer unter der Erdoberfläche ist es bereits zwischen 1.000 °C und 1.500 °C heiß. Die Folge: Die Kruste wird aufgeschmolzen. Das entstehende Magma steigt dann wieder auf und bildet die Vulkane. Die Feuerberge der Anden oder ozeanischen Inselbögen, wie zum Beispiel Japan, sind typische Beispiele für diesen Vulkantyp. Immerhin rund 15 Prozent aller Vulkane befinden sich dagegen an divergierenden, sich auseinanderbewegenden Platten, also an Grabenbruchsystemen wie dem ostafrikanischen Rift Valley oder den mittelozeanischen Rücken. Island ist beispielsweise Teil eines solchen Rückens, der durch die Tätigkeit der Vulkane an dieser Stelle bis über den Meeresspiegel ragt. Die restlichen Feuerberge auf der Erde gehen auf so genannte Hot Spots zurück. Damit bezeichnet man lokal begrenzte Stellen, an denen heißes Magma aus dem Erdmantel bis in die Erdkruste aufsteigt und sich schließlich bis zur Erdoberfläche durchschmelzen kann – ein Vulkan entsteht.

Kegel, Decken, Schilder, Schichten – Vulkanformen

Vulkane gleichen keineswegs wie ein Ei dem anderen. Ihre Formen unterscheiden sich sogar viel mehr, als man denkt. Dem klassischen Bild entsprechen am besten Vulkane wie der Ätna auf Sizilien. Diese imposanten Gebilde mit einem gleichmäßigen Kegel und einen tiefen Krater in der Mitte gehören tatsächlich auch zum häufigsten Vulkantyp. Wie ein Vulkan aussieht, entscheidet nicht nur über seine Popularität, sondern liefert Wissenschaftlern auch wichtige Indizien über seine Entstehung. Dies gilt beispielsweise für die größten Vulkane der Erde, die so genannten Schild- und Deckenvulkane. Betrachtet man sie aus der Vogelperspektive, erinnern sie an plattgedrückte Spiegeleier. Typisch für sie sind ihre große Ausdehnung und ihre flachen Hänge. Solche Vulkane entstehen und wachsen durch dünnflüssige, kieselsäurearme Lava, die sanft zu den Seiten abfließt und Flächen von mehreren hunderttausend Quadratkilometern bedecken kann. Der bekannteste Schildvulkan, der Mauna Loa auf Hawaii, hat seinen Ursprung rund 5.000 Meter unter der Meeresoberfläche und reicht 4.170 Meter über das Meer hinaus – damit ist er insgesamt höher als der Mount Everest und eigentlich der

Faszination Vulkanausbruch:
Links: Vulkan Paricutín im mexikanischen Bundesstaat Michoacán. Mitte: Der Ngauruhoe in Neuseeland. Rechts: Vulkan Augustine in Alaska. © NOAA



Die Form eines Vulkans hängt unter anderem vom Eruptionstyp und der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Magmas ab. © USGS; NASA

höchste Berg der Erde. Explosionsartige Ausbrüche von Staub, Asche und Lava führen dagegen zur Bildung von Schicht- oder Stratovulkanen. Ihre markanten und oft sehr steilen Kegel beruhen auf einer wechselnden Abfolge von langsam ausgeflossenen Lavaschichten und Aschenablagerungen. Zu den Stratovulkanen gehören neben dem Ätna auch der Vesuv und der Fujiyama. Ist das Magma eines Vulkans so zähflüssig, dass es beim Aufstieg im Schlot nicht mehr die Erdoberfläche erreicht, kommt es meist zu plötzlichen Ausbrüchen, die dann nur noch Lockermaterial wie Bimsstein, Asche und Lavafetzen zum Teil kilometerhoch in die Atmosphäre schleudern. Diese Feuerberge werden deshalb auch Aschen- oder Schlackenvulkane genannt.



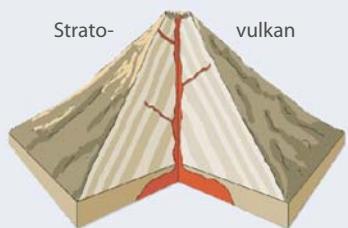
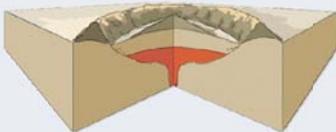
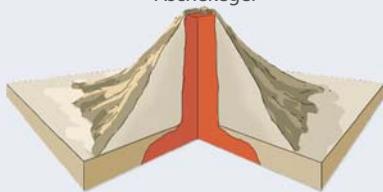
Aschekegel



Caldera



Strato-vulkan



Linearvulkan



Maar



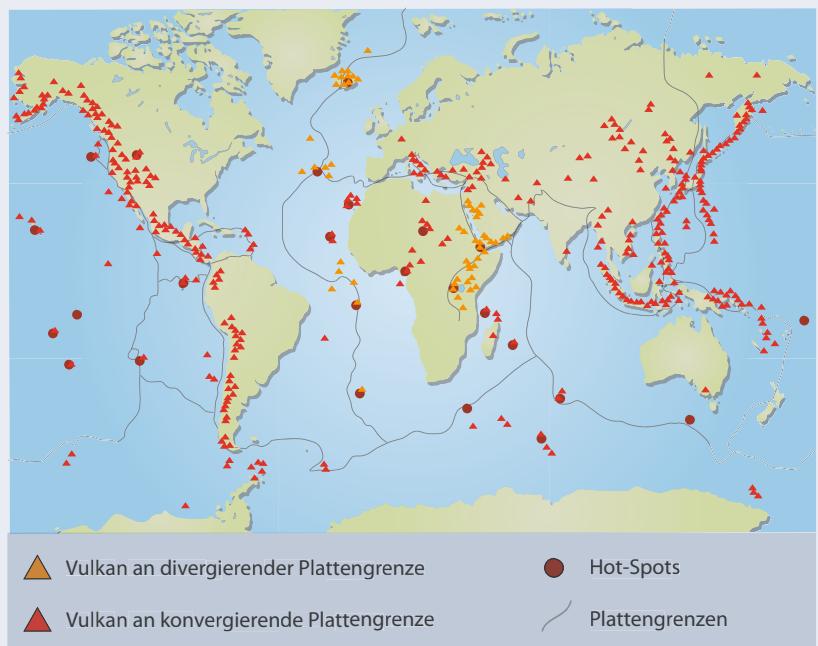
Schildvulkan



Gewaltige Explosionen entstehen vor allem dann, wenn es im Untergrund zum Kontakt zwischen Magma und Grundwasser kommt. Das Wasser verdampft in Bruchteilen von Sekunden und es entsteht ein gewaltiger Druck, der alles darüberliegende Gestein wegsprengt. Übrig bleibt dann am Ende nur ein Maar, ein Explosionskrater, umgeben von einem Trümmerwall. Zahlreiche Vulkane in der Eifel sind bis vor 10.000 Jahren auf diese Weise entstanden. Und auch einer der vielleicht folgenschwersten Vulkanausbrüche in der Geschichte der Menschheit beruhte auf einer dieser so genannten phreatomagmatischen Eruptionen. Am 27. August 1883 brach der Vulkan Krakatau in der Sundastraße zwischen den indonesischen Inseln Java und Sumatra aus. Nach einer Serie von kleineren Eruptionen kommt dabei zu einer gewaltigen Explosion. Mit einer Energie von 100 Millionen Tonnen TNT – ungefähr 5.000-mal so stark wie die Atombombe in Hiroshima – wird der Gipfel des Vulkans abgesprengt.

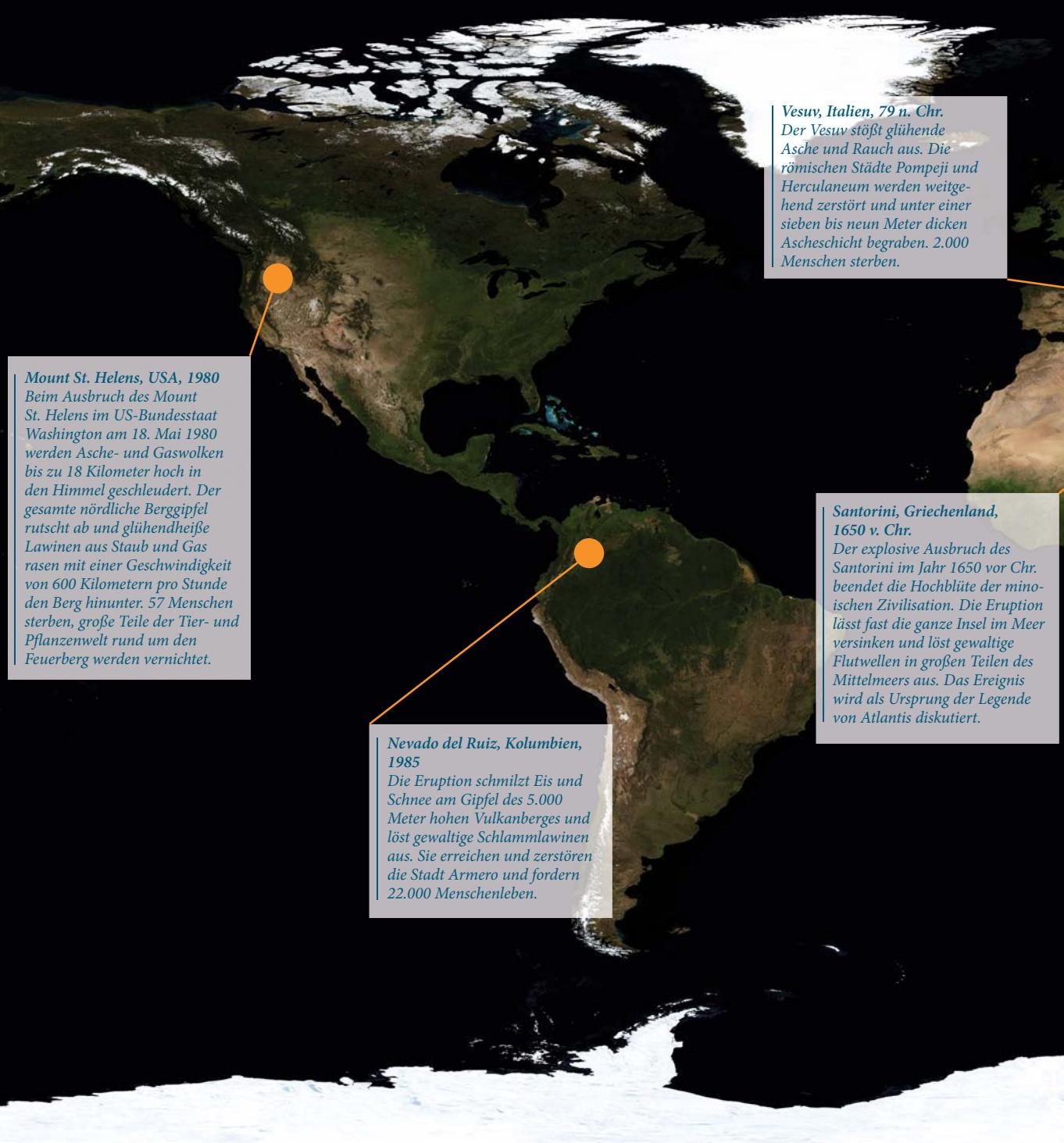
Die Wände des Vulkans brechen während der Eruptionen auseinander und die Magmakammer füllt sich mit Meerwasser. Ein Großteil der Energie stammt deshalb aus der Ausdehnung von heißem Wasserdampf. Vom Krakatau selbst ist nach diesem Ausbruch nur ein winziger Rest übriggeblieben. Die Explosion lässt sich noch in Australien – in 2.000 Kilometer Entfernung – registrieren. Die Auswirkungen sind auch hier dramatisch: Die gigantischen Aschewolken bleiben über drei Jahre in der Atmosphäre und haben eine deutliche Abnahme der mittleren Jahrestemperatur der Erde zur Folge. Djakarta, die Hauptstadt Indonesiens, meldet kurz nach dem Ausbruch völlige Dunkelheit. Zumindest genauso schlimm sind die Auswirkungen des Tsunamis, der durch den heftigen Vulkanausbruch erzeugt wird. Bis zu 40 Meter hoch ist die Welle, als sie die Küsten der umliegenden Inseln erreicht. Fast 300 Küstenorte versinken in den Fluten, mehr als 36.000 Tote sind zu beklagen. Jedoch nicht immer sind aktive Vulkane auch tatsächlich Berge. Bei Spalteneruptionen etwa, wie sie regelmäßig am Mauna Loa auf Hawaii zu beobachten sind, quillt das geschmolzene Magma lediglich aus mehr oder weniger großen Spalten und Rissen hervor. Dabei können am Ende manchmal sogar riesige Areale von der Lava bedeckt sein. In Indien zum Beispiel, beim so genannten Deccan Trapp, sind es sogar über eine Million Quadratkilometer.

Die meisten Vulkane liegen in den geologisch aktiven Regionen der Plattengrenzen. © MMCD NEW MEDIA



Ausbruch ist nicht gleich Ausbruch

Nicht nur die Vulkane selbst, sondern auch die Ausbrüche sind meist völlig unterschiedlich. Ihr Spektrum reicht





Eisvulkane auf dem Saturnmond Titan

Wolken, Regen, Stürme – viele der Wetterphänomene, die es auf der Erde gibt, haben Wissenschaftler mittlerweile auch auf einem der Saturnmonde, dem Titan, identifiziert. Doch damit sind die Analogien zum Blauen Planeten längst noch nicht erschöpft. Auch viele geologische Vorgänge laufen dort offenbar nach ähnlichen Prinzipien ab wie bei uns. Dies gilt beispielsweise für die Platten tektonik, die auf der Erde – vor allem an den Nahtstellen der gewaltigen Lithosphärenplatten – maßgeblich für Vulkanausbrüche und Erdbeben verantwortlich ist. Dennoch war es lange unklar, ob es auf dem Titan auch Vulkanismus gibt. Im Juni 2005 haben die Forscher jedoch ein Indiz dafür gefunden. Auf Spektrometeraufnahmen der NASA-Raumsonde Cassini identifizierten sie nahe dem Titan-Äquator eine 30 Kilometer große Schneckenhaus-Struktur, die sich nach Art einer Kuppel mehrere hundert Meter über die Umgebung erhebt. „Etwas Ähnliches haben wir noch auf keinem anderen Eismond im Sonnensystem gesehen. Unsere bevorzugte Interpretation ist, dass aus diesem Berg Methan

austritt und in die Titan-Atmosphäre entweicht“, erklärt Ralf Jaumann vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Wissenschaftler bezeichnen dieses Phänomen als Eis- oder Kryovulkanismus, weil dabei nicht wie auf der Erde heißes Magma aus dem Mondinneren nach oben transportiert wird, sondern gefrorenes Wasser oder Methan. Weitere Infrarotbilder von einem Cassini-Vorbeiflug am 25. Oktober 2006 scheinen diese Art von Vulkanismus auf dem Titan zu bestätigen: Sie zeigen ein anderes fächerförmiges Gebilde, das stark an Lavaströme erinnert. Schon das Cassini-Radar hatte dieses Phänomen und eine kreisrunde Struktur auf der Oberfläche, von dem dieser Strom auszugehen scheint, bei einem früheren Vorbeiflug fotografiert – aber nicht in derart guter Qualität. „Die Wahrscheinlichkeit steigt, dass es sich bei diesem ringförmigen Gebilde tatsächlich um einen Vulkan handelt“ sagt Rosaly Lopes vom Cassini Radarteam am Jet Propulsion Laboratory. „Bereits anhand der Radardaten identifizierten wir es als möglichen Vulkan, aber die Kombination von Radar und Infrarot macht die Sache noch viel eindeutiger.“

von ruhig verlaufenden und langsamen Lavaausflüssen bis hin zu dramatischen Explosionen, bei denen – wie am Krakatau – ganze Bergkuppen in die Luft fliegen. Wie jedoch eine Eruption genau abläuft, hängt von vielen Puzzleteilen ab. Dazu gehören unter anderem die Zähflüssigkeit sowie der Säure- und Gasgehalt des Magmas. So ist säurearmes, basisches Magma, das unter anderem viele Vulkane Hawaiis spucken, relativ dünn und fließt bei einem Ausbruch als breiter Strom oder in schmalen Lavakanälen bergab. Wird dagegen zähflüssige Lava von vulkanischen Gasen in Schüben aus dem Vulkan schlott geschieleudert, sprechen Wissenschaftler von einer strombolianischen Eruption. Prototyp und Namensgeber für diesen Typ ist der Vulkan Stromboli in Südalien. Ganz anders sieht die Situation aus, wenn saure, kieselsäurereiche Lava vorhanden ist. Denn dabei handelt es sich um eine ziemlich zähe Masse.

Bei nur geringem Gasgehalt staut sie sich an der Austrittsstelle und es entsteht dabei ein überdimensionaler Ppropf. Vulkanforscher nennen so ein Phänomen Lavadom. Der „Korken“ verschließt den Schlot des Vulkans so lange, bis der Druck im Inneren immer stärker wird und er schließlich wie bei einer geschüttelten Sektflasche abfliegt. Anders ausgedrückt: Der Lavadom, der sich durch die Abrieglung des Schlotes gebildet hat, zerspringt in einer Explosion.

Ebenso spektakulär sind so genannte plinianische Eruptionen. Dazu kommt es immer dann, wenn zähflüssige, saure Lava unter hohem Druck durch vulkanische Gase ausgeschleudert wird. Diese ebenfalls ziemlich explosiven Ausbrüche wie beim Mount St. Helens im Jahr 1980 sind meist mit gewaltigen Ascheausstößen verbunden. Ihre Rauch- und Partikelwolken können unter Umständen sogar bis in die Stratosphäre reichen und das Klima beeinflussen.

Mehr als nur Lavafontänen – Folgen von Vulkanausbrüchen

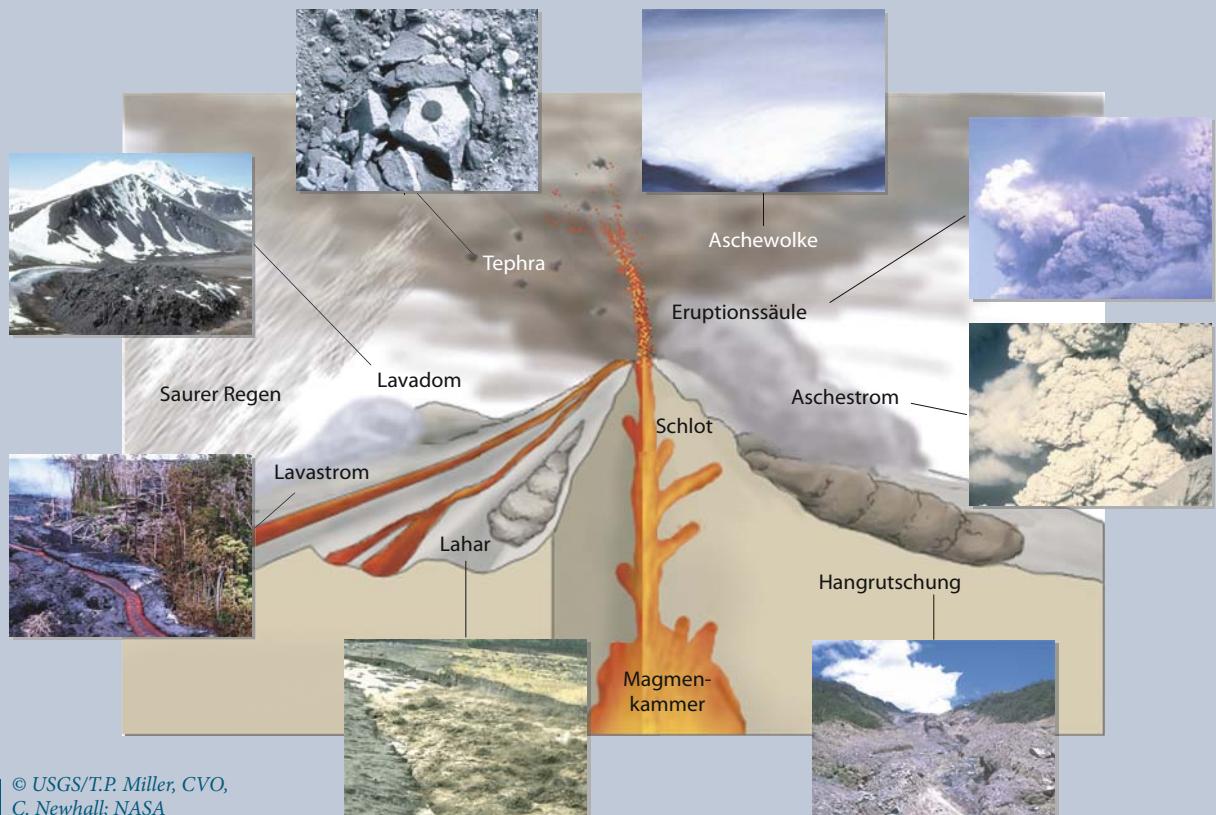
Glühende Lavafontänen und sich bergab windende Lavaströme – so hat nach der Vorstellung der meisten Menschen ein „ordentlicher“ Vulkanausbruch auszusehen. Doch diese beiden besonders fotogenen und farbenfrohen geologischen Phänomene sind keineswegs die einzigen oder gar die gefährlichsten, die bei

Phänomene bei Vulkanausbrüchen

Lavadome entstehen, wenn das Magma in einem Vulkanschlott so zähflüssig ist, dass es nicht abfließt und wie ein Ppropf auf dem Schlot sitzen bleibt. Durch den steigenden Druck werden solche Staukuppen dann plötzlich und unerwartet in einer gewaltigen Explosion zerrissen.

Als **Tephra** werden alle festen Bestandteile bezeichnet, die bei einer Eruption herausgeschleudert werden. Ihre Größe kann sehr unterschiedlich sein: Die Spannbreite reicht von zwei Meter großen Lavabomben bis zur feinen vulkanischen Asche.

Aschewolke und **Eruptionssäule**: Ein explosiver Vulkanausbruch schleudert oft Millionen von Kubikmetern Staub und Asche in Höhen von bis zu 65 Kilometern. Die feinsten Partikel können monate- bis jahrelang in der Atmosphäre bleiben und Klimaveränderungen hervorrufen.



© USGS/T.P. Miller, CVO,
C. Newhall; NASA

Lavaströme können je nach Lavatyp langsam und träge oder dünnflüssig und schnell fließen. Besonders schnell werden sie in Lavakanälen oder Tunneln. Auf Hawaii erreichen solche Lavaströme Geschwindigkeiten von bis zu 155 Metern pro Sekunde.

Lahars – vulkanische Schlamm- und Gerölllawinen – und Hangrutschungen entstehen, wenn Schnee und Eis am Vulkangipfel durch einen Ausbruch plötzlich schmelzen oder wenn Asche- und Erdschichten an Hängen des Berges ins Rutschen kommen.

Ascheströme oder pyroklastische Ströme sind Glutwolken aus bis zu 800 °C heißen Gasen, Stäuben und Aschen. Ähnlich einer Lawine rasen sie mit Geschwindigkeiten von bis zu 200 Kilometern pro Stunde talwärts.

einer Eruption auftreten können. Keine Seltenheit sind neben gewaltigen Aschesäulen – zum Beispiel beim Popocatepetl in Zentralmexiko oder beim Schichtvulkan Soufrière Hills auf der Karibikinsel Montserrat – auch pyroklastische Ströme. Dabei handelt es sich um Glutwolken aus heißen vulkanischen Gasen, Aschen und Gesteinsbruchstücken, die bei einer Eruption ähnlich einer Lawine in rasend schnellem Tempo talwärts fließen. Bekannt für seine pyroklastischen Ströme ist unter anderem der japanische Vulkan Unzen auf der Insel Kyushu. Wissenschaftler haben dort innerhalb weniger Jahre schon einmal mehr als 10.000 solcher Glutwolken gezählt. Längst nicht alle Gefahren, die für Mensch und Natur bei Vulkanausbrüchen auftreten, sind direkte Folgen des Ausbruchs. So können die Erschütterungen der Eruption beispielsweise an den Berghängen gewaltige Erdrutsche auslösen. Liegen auf dem Gipfel eines Vulkans dagegen Eis oder Schnee, schmelzen sie durch die Hitze des Ausbruchs schnell und rasen als heiße Schlammlawinen, so genannte Lahars, zu Tal.

Unabhängig davon, wie eine Eruption abläuft und welche Phänomene dabei auftreten, sind die Ausbrüche der Feuerberge immer wieder faszinierende und oft spektakuläre Naturereignisse. Die Gefahren, die mit diesem Phänomen verbunden sind, werden jedoch oft unterschätzt oder verdrängt – mit teilweise fatalen Folgen. In den letzten 500 Jahren starben etwa 200.000 Menschen an den Folgen von Vulkanausbrüchen. Besonders gefährlich sind dabei die großen und unerrechenbaren Explosivausbrüche wie im Mai 1980 am Mount St. Helens. Damals stiegen Aschewolken kilometerhoch auf und eine Schuttlawine, bestehend aus dem Material des weggesprengten Gipfels, schoss mit 260 Kilometern pro Stunde zu Tal. 57 Menschen wurden getötet, 600 Quadratkilometer Land verbrannt. Dabei fiel der Ausbruch nach der Einschätzung von Wissenschaftlern sogar nur in die Kategorie „mittelschwer“. Noch viel gravierendere Auswirkungen für Mensch und Natur hatten drei historische Vulkanausbrüche.

Vesuv, Tambora und Co. – die Macht der Feuerberge

24. August des Jahres 79 n. Chr.: Eine Naturkatastrophe gigantischen Ausmaßes versetzt das kampanische Land in Angst und Schrecken. Angekündigt von einem tagelangen Beben bricht in der Nähe von Neapel der Vulkan Vesuv aus und begräbt die römischen Badeorte Pompeji und Herculaneum sowie das Dorf Stabiae unter meterdicken Asche- und Lavaschichten. Viele tausend Menschen – in Pompeji allein 2.000 – kommen im Aschereggen und durch die giftigen Vulkan-gase um. Darunter auch der römische Naturforscher Plinius, der in seiner „Naturalis Historia“ die naturwissenschaftlichen Kenntnisse der damaligen Zeit zusammengefasst hatte. Erst 1860 werden die Reste Pompejis bei Ausgrabungen freigelegt. Konserviert durch Lava und Asche finden die Archäologen fast vollständig erhaltene Häuser und können so die ursprüngliche Stadtanlage rekonstruieren.

Szenenwechsel: Circa 64° Nord und 20° West. Island im Jahr 1783: Seit mehr als einer Woche erschüttern Erdbeben die vegetationslose Landschaft im 25 Kilometer langen Rissystem im Süden der Insel. Schließlich bricht der Laki-Vulkan

Die steilen Kraterränder mit ihrer charakteristischen Schichtung auf Santorini zeugen noch heute von dem verheerenden Ereignis im Jahr 1650 v. Chr. © Harald Frater





mit einer Serie von Explosionen aus. Am Ende bedecken zwölf Kubikkilometer Lava auf einer Fläche von 500 Quadratkilometern die Erde. 500 Millionen Tonnen giftiger Gase bedrohen Menschen und Tiere, dunkle Aschewolken verdüstern noch lange nach der Eruption den Himmel. Genauso schlimm sind allerdings die Spätfolgen des Vulkanausbruchs. Aufgestaute Flüsse bringen Überflutungen und Hochwasser, Asche und Lava machen Ackerflächen und Weiden unbrauchbar, die Landwirtschaft in großen Teilen Islands kommt völlig zum Erliegen. Hungersnöte und Krankheiten bedrohen die Menschen. Als unmittelbare Folge des Vulkanausbruchs gehen Bevölkerungszahl und Tierbestand der Insel dramatisch zurück. Noch einmal rund 30 Jahre später: Dieses Mal spuckt der Vulkan Tambora in Indonesien Feuer. Mit der viereinhalbachen Ausbruchsenergie des Mount St. Helens schleudert der Tambora im Jahr 1815 Asche kilometerhoch in die Atmosphäre. Etwa 12.000 Menschen kommen allein durch den heißen Stein- und Ascheregen ums Leben. Weitere 54.000 Einwohner sterben auf den Inseln Sumbawa und Lombok an den Spätfolgen der Eruption: Die dicke Aschenschicht auf den Feldern lässt die

Die Überreste der Stadt Pompeji am Fuß des Vesuvs (Hintergrund) kündigen noch heute von der Gewalt des Ausbruchs von 79 n. Chr. © Harald Frater

Vulkanische Perlenkette – Hawaii sitzt auf einem Hot-Spot

Einige der Inseln des Hawaii-Archipels, vom All aus gesehen.
© NASA Jacques Descloitres/
MODIS/NASA/GSFC



Erst „Big Island“ Hawaii ganz im Südosten, dann Maui und die anderen Hauptinseln, später weiter im Nordwesten die Midways und das Kure-Atoll. Die Inseln des Hawaii-Archipels liegen wie an einer Perlenkette aufgereiht inmitten des Pazifischen Ozeans. Nach einem scharfen Knick nach Norden schließen dann noch die Unterwasserberge der so genannten Emporer Chain ebenso regelmäßig – wie im „Gänsemarsch“ – an die Hawaii-Inseln an. Dieses 4.000 Kilometer lange Gebilde aus gewaltigen Erhebungen sieht aus, als wäre es mit einer Nähmaschine auf den Meeresboden gestickt.

Alles nur Zufall? Diese Frage beschäftigt die Geowissenschaftler schon seit langem. Klar ist, dass alle Inseln und untermeerischen Berge der Hawaii-Emporer-Kette durch Vulkanismus entstanden sind. Die ältesten der Unterwasservulkane, die Forscher nennen sie Seamounts, vor der Küste Kamtschatkas und den Aleuten sind rund 70 bis 80 Millionen Jahre alt. Je weiter man nach Südosten kommt, desto jünger werden die Feuerberge. Die jüngste Insel Hawaii ist gerade mal 500.000 bis eine Million Jahre alt. Anders als die meisten anderen Vulkane der Erde liegen Hawaiis Feuerberge tausende Kilometer entfernt von den geologisch besonders unruhigen Zonen entlang der Plattengrenzen. Schuld an der Entstehung Hawaiis ist ein so genannter Hot Spot, ein heißer

Der Schildvulkan Mauna Loa auf Hawaii gehört zu den größten und höchsten Vulkanen überhaupt.
© USGS/HVO

Fleck, der sich rund 100 Kilometer tief im Erdmantel versteckt befindet. Wie ein gigantischer Schweißbrenner erzeugt dieser unaufhörlich Magma, das sich durch Risse in der Erdkruste seinen Weg nach oben bahnt.

Es sammelt sich schließlich in größeren Magmenkammern in etwa fünf bis zehn Kilometern Tiefe. Von dort aus wird die Gesteinsschmelze dann an die Erdoberfläche geschleudert. Durch den unaufhörlichen Nachschub aus der Tiefe wächst so im Laufe der Zeit – für geologische Prozesse sehr schnell – ein Unterwasservulkan der Wasseroberfläche entgegen. In weniger als einer Million Jahre ist der Feuerberg so hoch geworden, dass er die 5.000 oder 6.000 Meter vom Meeresboden bis zur Wasseroberfläche locker überwunden hat und aus dem Meer ragt – eine Vulkaninsel ist geboren.

Woher jedoch kommt der Nachschub an heißem Gestein für den Hot Spot? Wissenschaftler haben diese Frage mittlerweile weitgehend geklärt. Danach liegt an der Grenzschicht zwischen unterem Erdmantel und Erdkern, in rund 2.900 Kilometer Tiefe, eine gewaltige Blase festen Gesteins, die bis zu 300 °C heißer ist als das umliegende Mantelmaterial. Die Blase wird – warum, weiß niemand so genau – instabil und wächst wie ein gigantischer „Magmenpilz“ in Richtung Erdkruste und bildet so den Hot Spot.



Damit aber ein einziger heißer Fleck eine mehrere tausend Kilometer lange Inselkette wie Hawaii aus dem Boden schießen lassen kann, ist noch ein Helfer nötig. Und zwar kommt hier die Plattentektonik ins Spiel. Denn die Pazifische Platte, auf der auch Hawaii liegt, driftet jährlich mit einem Tempo von acht bis zehn Zentimetern von Südost nach Nordwest. Da der Hot Spot aber einer Theorie zufolge stets am selben Ort bleibt, frisst der „Schweißbrenner“ immer neue „Löcher“ in die Erdkruste und lässt an der Oberfläche mit der Zeit eine ganze Reihe von Vulkaninseln wachsen.

Nur die Vulkane direkt über dem Hot Spot sind aktiv. Ältere, erloschene Vulkane, die „Huckepack“ auf der Platte mitfahren, wandern von dem heißen Flecken weg. Dabei werden sie im Laufe der Jahrtausende wieder kleiner. Dies liegt zum einen daran, dass sie von Wasser und Wind abgetragen werden. Professorin Helga de Wall von der Universität Würzburg, die schon

seit langem den Hot Spot-Vulkanismus auf Hawaii erforscht, nennt noch einen anderen Faktor: „Während die relativ jungen Vulkane noch als Inseln aus dem Meere herausragen, sind die älteren aufgrund ihres Eigengewichtes so tief in den Meeresboden eingesenkt, dass sie unterhalb des Meeresspiegels liegen.“ Je weiter sich nun die Vulkane vom Hot Spot entfernen, desto kälter wird zudem die Pazifische Platte und zieht sich zusammen – die Seamounts schrumpfen immer weiter zusammen.

Die Vulkane der Insel Hawaii entfernen sich unaufhörlich vom Zentrum des Hot Spots und werden vermutlich in nicht allzu ferner Zukunft erkalten und ihre Tätigkeit einstellen. Grund für den deutlich zu erkennenden „Knick“ in der Perlenschnur des Hawaii-Archipels nach Norden, war nach Meinung vieler Forscher eine heftige Richtungsänderung bei der Wanderung der Pazifischen Platte vor rund 45 Millionen Jahren.

Warnung vor der Katastrophe – frühe Erfolge am Mount Pinatubo



Der Ausbruch des Vulkans Pinatubo am 12. Juni 1991, gesehen von der Clark Air Base, etwa 40 km östlich des Vulkan-Gipfels.
© USGS/CVO/Richard P. Hoblitt

Die Philippinen im Jahre 1991: Einer der stärksten Vulkanausbrüche des 20. Jahrhunderts erschüttert die Insel Luzon. Mehr als zehn Kubikkilometer vulkanisches Material stößt der Mount Pinatubo zwischen dem 12. und 15. Juni aus. 20 Kilometer hoch ist die Aschewolke über dem Krater. 10.000 Quadratkilometer der Insel sind schließlich mit einer bis zu 50 Zentimeter dicken Ascheschicht bedeckt. Menschen, Tiere, Natur und Gebäude werden aber auch von Lahars bedroht, die die Vulkanhänge herabfließen. Sie erodieren ganze Landstriche, stauen die Flüsse und begraben Ortschaften unter sich. Mehr als zwei Millionen Menschen in der Umgebung des Mount Pinatubo sind von der Naturkatastrophe letztlich betroffen, fast eine Viertel Million verliert ihre Heimat und die Lebensgrundlage. Trotzdem gehen nur elf Todesopfer direkt auf das Konto des Vulkanausbruchs. Warum? Die Aktivitäten des Vulkans vor dem großen Ausbruch steigerten sich relativ langsam. Schon im April 1991 gab es erste Meldungen über eine verstärkte Tätigkeit des Vulkans. Angehörige der Aeta, einer indigenen Bevölkerungsgruppe, die an den Hängen des Vulkans leben, hatten die zuständigen Behörden des PHIVOLCS – Philippine Institute of Volcanology and Seismology – über Umwege informiert. Zunächst nahm man dort die Warnungen allerdings nicht ernst – der Mount Pinatubo galt seit 600 Jahren als erloschen. Erst als sich die Anzeichen

verdichteten, reagierte PHIVOLCS, baute in Kooperation mit dem United States Geological Survey – USGS – ein Warnsystem auf und gab regelmäßige Bulletins heraus. Schon am fünften April wurde Alarmstufe 1 ausgerufen und damit das Gebiet im Radius von zehn Kilometern um den Vulkan herum zur „high danger zone“ erklärt. Drei Monate später, am siebten Juni, musste diese Zone dann im Rahmen der Alarmstufe vier sogar auf 20 Kilometer erweitert werden. Am 15. Juni, dem Tag der gewaltigsten Eruption des Pinatubo galt sogar ein Gebiet im Umkreis von 40 Kilometern als Hochrisikozone, weil die Wissenschaftler befürchteten, dass das riesige Areal einstürzen und sich eine gewaltige Caldera bilden könnte. Für Warnungen an die Bevölkerung und zur Organisation von Evakuierungen blieb innerhalb der zehn Wochen von den ersten Anzeichen vulkanischer Aktivität bis zum endgültigen Ausbruch genügend Zeit. Obwohl sowohl im Rahmen der Information der Bevölkerung als auch bei den Rettungsmaßnahmen viele Fehler auftraten, konnten doch die meisten Einwohner die Gefahrenregion rechtzeitig verlassen. Nur so ist die geringe Zahl an Todesopfern zu erklären. Kritisch wurde die Situation erst später in den Evakuierungslagern. Fast 1.000 Menschen starben in den Tagen nach dem Vulkanausbruch an Erschöpfung und vor allem an Infektionskrankheiten. Grundsätzlich hatte das Warnsystem aber funktioniert.

Pflanzen eingehen und löst eine große Hungersnot aus. Und auch die globalen Auswirkungen sind verheerend: Die in der Atmosphäre schwebenden Asche-Partikel verursachen eine weltweite Abkühlung, die noch Jahre anhält. Selbst in Europa führt dieser „vulkanische Winter“ zu Ernteausfällen und Hungerkatastrophen.

Wie kann man sich vor Vulkanausbrüchen schützen?

Diese drei Beispiele zeigen deutlich, welche zerstörerische Wirkung die Vulkaneruptionen in der Vergangenheit häufig hatten und auch heute noch haben können. Dass dies aber nicht immer so sein muss, zeigt der heftige Ausbruch des Usu am 31. März 2000 im Norden Japans. Obwohl mehr als 50.000 Menschen in unmittelbarer Nähe des Katastrophengebietes leben, gab es kein einziges Todesopfer. Bloßer Zufall? Wohl kaum. Es ist das Resultat eines funktionierenden Frühwarnsystems an einem Vulkan, der seit langer Zeit von Wissenschaftlern überwacht wird. Mehr als 17.000 Einwohner wurden rund um den Usu rechtzeitig vor der Katastrophe evakuiert. 2.200 von ihnen konnten bereits zwei Tage nach dem Ausbruch wieder in die geräumten Gebiete zurückkehren ...

Wie wichtig solche Alarmsysteme sind, zeigt eine Zahl: Fast 500 Millionen Menschen leben heute weltweit im Gefahrenbereich von Vulkanen. Um zumindest möglichst viele davon rechtzeitig vor einem drohenden Ausbruch warnen zu können, stehen viele aktive Vulkane längst unter der Aufsicht von Forschern. Sie versuchen, die Warnsignale der Feuerberge zu erkennen. Doch Vorhersagen von Vulkanausbrüchen sind nicht einfach, da die Ruhezeiten der Feuerberge sehr lange andauern können. So brach der Vulkan Unzen in Südjapan 1991 nach 900-jähriger Ruhe wieder aus und im gleichen Jahr erwachte auch der Pinatubo auf den Nordphilippinen nach 600 Jahren aus seinem Tiefschlaf. Sogar Vulkane in unmittelbarer Nachbarschaft und in vergleichbarem Alter können sich in völlig unterschiedlichen Phasen befinden. Wissenschaftler haben jedoch einige Methoden entwickelt, diese unberechenbaren Feuerberge zu überwachen. Direkte Beobachtung, seismische Überwachung und ausgefeilte geophysikalische Methoden sollen helfen, einen bevorstehenden Ausbruch zu erkennen.

Die Grundlage für ein solches Frühwarnsystem ist ein Netz von Erdbebenstationen mit Seismographen. Die hochempfindlichen Messinstrumente registrieren noch die leichtesten Bodenerschütterungen, so genannte Mikrobeben, wie sie durch die Bewegungen des Magmas im Untergrund entstehen. Im Allgemeinen nimmt die Häufigkeit solcher Erdstöße bei bevorstehenden Ausbrüchen in den letzten Tagen vor der Eruption zu und die Zentren der Beben wandern an die Stelle, an der der Ausbruch zu erwarten ist. Vor einem Ausbruch heben sich die Vulkane zudem meist ein wenig und schwanken an, um nach dem Ausbruch wieder zusammenzusinken. Findige Wissenschaftler und Ingenieure haben längst Methoden entwickelt, um selbst feinste Änderungen der Hangneigungen und Höhen zu identifizieren. Zum Einsatz kommen dabei unter anderem Neigungsmesser und GPS-Satelliten. Und noch ein Phänomen liefert Indizien für einen

Mithilfe von Lasergeodimetern und satellitengestützten Messungen werden Veränderungen in der Form des Berges und im Boden registriert. Die Daten können wertvolle Hinweise über die Vorgänge im Innern eines Vulkans liefern. © USGS



bevorstehenden Ausbruch: Gase. Ihr chemischer Fingerabdruck, ihre Zusammensetzung ändert sich schon geraume Zeit vor den Eruptionen. Regelmäßige Messungen und Gasanalysen können daher eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage von Vulkanausbrüchen spielen. Darüber hinaus sind auch die Satellitenbeobachtung und die Luftbildauswertung erfolgversprechende Methoden für die Vulkanüberwachung. Denn viele vulkanische Aktivitäten, wie zum Beispiel heiße Gasaustritte, können von Spezialisten auf Luftbildern identifiziert werden. Auch Bodentemperatur und -feuchtigkeit geben wichtige Aufschlüsse über das, was sich im Vulkaninneren tut.

Evakuierungen retten Leben

Das Gemündener, das Weinfelder und Schalkenmehrener Maar in der Nahe von Daun/Eifel. © Martin Schildgen/GFDL

Die besten Eruptionsvorhersagen sind jedoch nicht viel wert, wenn nicht die darauf folgenden Maßnahmen – und das bedeutet in fast allen Fällen die Evakuierung – durchgesetzt werden und organisiert ablaufen. Es ist keine Seltenheit, dass Vulkanologen Alarm schlagen, aber die verantwortlichen Behörden diese Warnungen



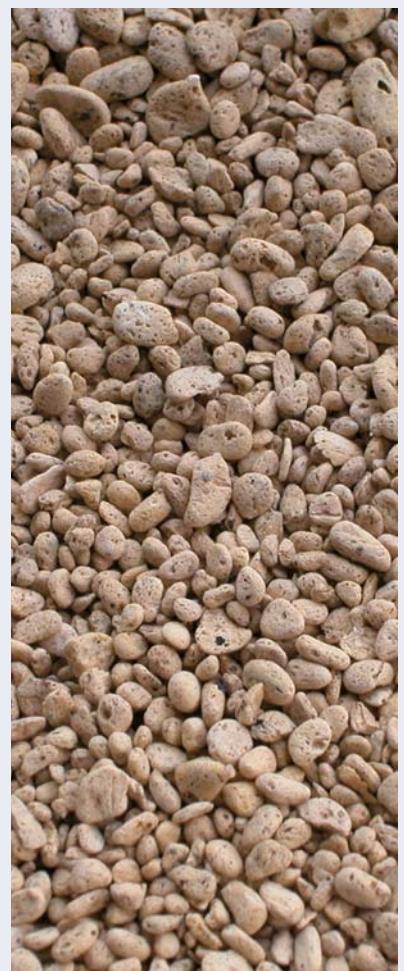
ignorieren. 1985 unterließen die Behörden trotz Warnungen der Experten die Evakuierung der gefährdeten Stadt Armero unterhalb des Nevado del Ruiz in Kolumbien. Als der Vulkan ausbrach, starben mehr als 22.000 Menschen in den Asche- und Schlammströmen. In der Vergangenheit häufiger erprobte Versuche, bedrohte Siedlungen durch Barrieren oder Ablenkern der Lavaströme zu schützen, haben sich dagegen nur selten bewährt. Oft werden sie von der Masse der heißen Lava einfach weggerissen oder überströmt. Am Ätna allerdings gelang es 1993, die Lava so zu bändigen. Damals wurden Erd- und Gerölldämme errichtet, um bewohnte Gebiete von den Lavaströmen abzuschotten – mit Erfolg. Schäden in Höhe von bis zu 25 Millionen US-Dollar blieben den Gemeinden durch diese Massnahmen erspart.

Die Augen der Eifel – Gefahr in Deutschland?

Schon Alexander von Humboldt ließ sich im Jahr 1845 von der Vulkanlandschaft der Eifel begeistern: Maare, Kohlensäurequellen, warme Wässer und Vulkanschlote reihen sich dicht an dicht im Dreiländereck Deutschland, Luxemburg und Belgien. Doch nicht immer war es in der Eifel so beschaulich wie zu Humboldts Zeiten oder heute. Kaum 11.000 Jahre ist es her, dass hier die Vulkane noch Feuer spuckten – erdgeschichtlich gesehen ein Wimpernschlag. Der Höhepunkt des Vulkanismus liegt allerdings viel weiter zurück in der Vergangenheit. Ungefähr vor 45 bis 35 Millionen Jahren, im Tertiär, brodelte die Erde an vielen Stellen, wo heute saftige Wiesen und üppige Wälder zu finden sind. Eine weitere hochaktive Vulkanismusphase begann vor rund 700.000 Jahren. So gibt es denn auch an wenigen Stellen auf der Welt so viele Vulkane auf so engem Raum beieinander wie in der Eifel. Auf mehr als 2.000 Quadratkilometern reihen sich zwischen Rhein und belgischer Grenze rund 240 Schlackenkegel und Vulkane aneinander.

Diese Zeugen der feurigen Vergangenheit sind für den Besucher kaum zu übersehen, ragen sie doch bis zu mehreren hundert Metern über das örtliche Relief hinaus. Die höchste Erhebung der Eifel ist mit 747 Metern die Hohe Acht am Nürburgring – natürlich ein erloschener Vulkan. Neben den Vulkankegeln prägen vor allem die Maare das Landschaftsbild der Eifel. Diese Explosionstrichter entstanden beim unterirdischen Aufeinandertreffen von Grundwasser und Magma. Heute sind die zumeist kreisrunden Krater wassergefüllt und werden auch geheimnisvoll die „Augen der Eifel“ genannt. Auch wenn derzeit nach menschlichem Ermessen mit keinem Ausbruch der Eifelvulkane zu rechnen ist, so ist die Erde unter der Eifel doch alles andere als ruhig. Denn geologisch gesehen haben die Feuerberge vermutlich nur eine Ruhephase eingelegt. So ist die Erdkruste unter der Eifel besonders dünn und an zahllosen Stellen tritt Kohlendioxid oder kohlensäurehaltiges Wasser an die Erdoberfläche – untrügliches Zeichen für die Hitze im Untergrund. Eine Theorie besagt, dass sich unter der Eifel sogar einer der berühmten Hot-Spots, vergleichbar den Hawaii-Vulkanen, befindet, eine relativ ortsfeste Zone, in der aus den Tiefen des Erdmantels glutflüssiges Magma Richtung Erdoberfläche gefördert wird. Trifft dies zu, dann wäre es nur eine Frage der Zeit, bis die Eifelberge wieder Feuer spucken.

*Zeugen des Eifelvulkanismus:
Bims vom Ausbruch des Laacher
See-Vulkans vor rund 12.900
Jahren findet man in den jüngeren
Terrassenschottern des Rheins.
© Harald Frater*





Tsunamis – tödliche Riesenwellen

Überlebende der großen Tsunami-Katastrophe auf Sumatra im Dezember 2004 eilen zu einem bereitstehenden Rettungshubschrauber der U.S. Navy.

© U.S. Navy/James Pinsky

Ein Dröhnen wie das Geräusch eines näherkommenden Flugzeuges schwingt bedrohlich durch die Luft. Dann greifen tosende Wassermassen aus riesigen Wellen nach allem, was sich ihnen in den Weg stellt: ein Tsunami. Bäume knicken ein, Menschen versuchen, sich schreiend vor den todbringenden Fluten in Sicherheit zu bringen, andere verschwinden für immer in den Wogen. Schließlich hat sich der Tsunami fürs Erste ausgetobt – so scheint es zumindest. Doch die Gefahr ist noch längst nicht vorbei. Denn auch auf seinem Rückzug verbreitet der Tsunami noch Angst und Schrecken. Der gewaltige Sog des ablaufenden Wassers reißt Menschen, Tiere, zerstörte Autos und Trümmer jeder Art mit ins Meer zurück.

So oder ähnlich lauten meist die Schilderungen der Überlebenden nach Tsunami-Katastrophen. Und davon gab es immerhin einige. Allein das Hawaii-Archipel mitten im Pazifischen Ozean ist im 20. Jahrhundert mehr als zehn Mal von größeren Tsunamis überrascht worden.

Die verheerendste und folgenreichste Tsunami-Katastrophe aller Zeiten spielte sich jedoch am zweiten Weihnachtstag des Jahres 2004 im Indischen Ozean ab. Ein Erdbeben mit einer Magnitude von 9,1 ereignete sich damals vor der Küste der indonesischen Insel Sumatra. Der Erdstoß erschütterte nicht nur große Teile

der Region, es entwickelte sich auch ein Tsunami, der innerhalb weniger Minuten die Küsten Sumatras erreichte und dort ganze Städte und Dörfer von der Landkarte ausradierte.

Doch nicht nur Indonesien war von der Naturkatastrophe betroffen. Der Tsunami breitete sich auf dem Meer in rasendem Tempo in alle Richtungen aus und überall dort, wo er schließlich auf Land traf, hinterließ er eine Spur der Verwüstung. Egal ob in Thailand, Myanmar, Sri Lanka, Indien oder auf den Malediven: An fast jeder Küste Südostasiens waren tausende von Todesopfern und gewaltige Schäden zu beklagen. Sogar weit entfernt, an der afrikanischen Ostküste, starben in Somalia, Tansania oder Kenia viele Menschen in den Flutwellen. Am Ende hatte der Tsunami 220.000 Bewohner rund um den Indischen Ozean das Leben gekostet, weit über 100.000 wurden verletzt und bis zu zwei Millionen Einheimische verloren durch die Katastrophe ihr Dach über dem Kopf. Die Sachschäden beliefen sich alles in allem auf zehn Milliarden US-Dollar.

Angesichts dieser dramatischen Folgen in Südostasien ist es erstaunlich, dass der japanische Begriff Tsunami eine auf den ersten Blick harmlose Bedeutung hat: die „lange Hafenwelle“. Der Name geht zurück auf frühe Beobachtungen von einheimischen Fischern. Während ihrer Arbeit auf hoher See hatten sie die Wellen meist nicht bemerkt, erst bei ihrer Rückkehr in den Heimathafen stellten sie fest, dass ihre Dörfer und Felder von einem meterhohen Tsunami verwüstet worden waren. Die wahrscheinlich最早esten Beschreibungen eines Tsunamis stammen aber aus einer ganz anderen Region. Überlieferungen zufolge gab es im Jahr 479 v. Chr. im nördlichen Teil der Ägäis gewaltige Schäden, die vermutlich von einer solchen Riesenwelle ausgelöst wurden. Manche Forscher vermuten sogar, dass auch die Geschichte von der Sintflut auf einem Tsunami beruhen könnte.

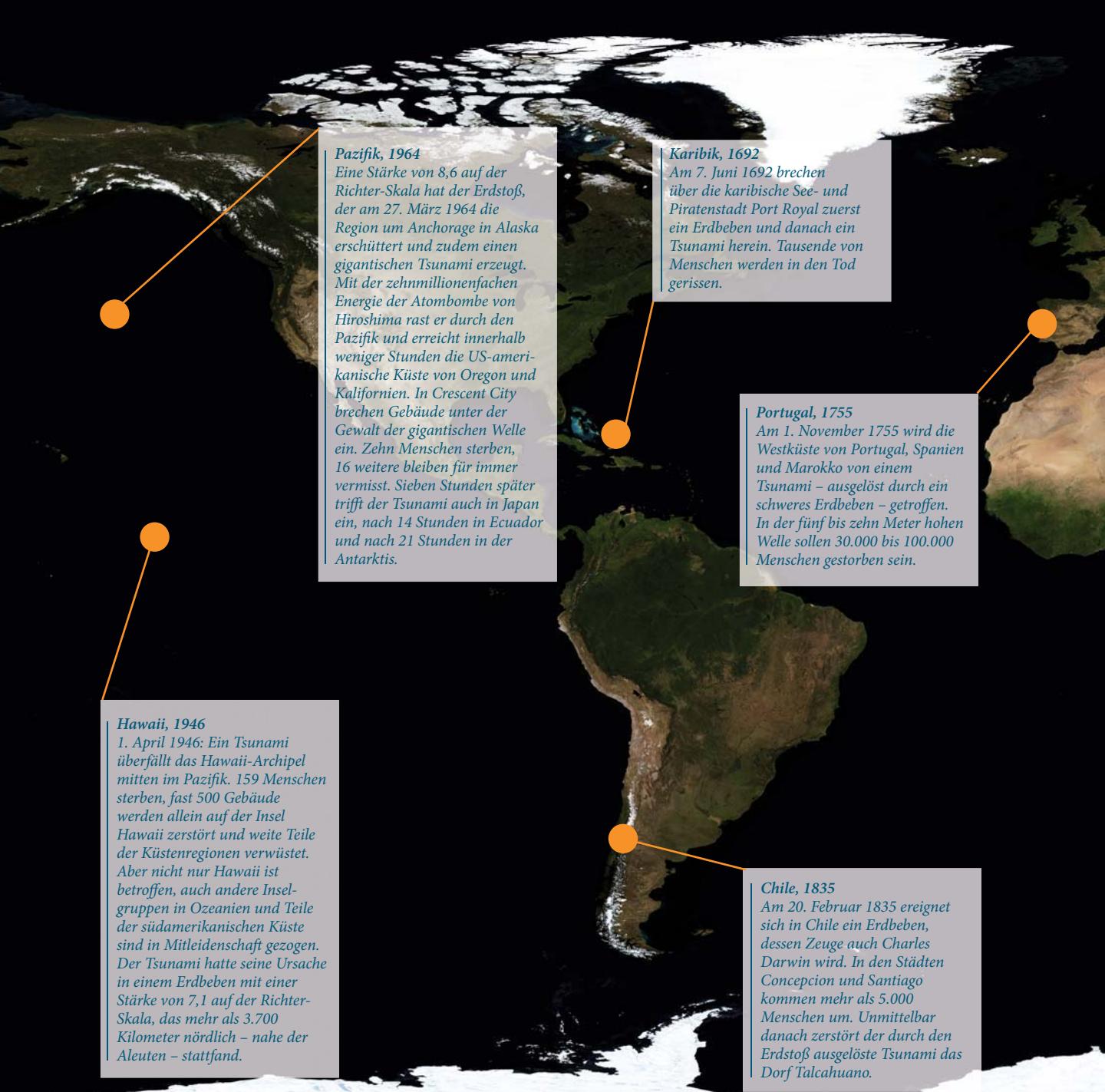
Seebeben, Vulkanausbrüche, Meteoriteneinschläge

Während es sich dabei nur um eine Theorie handelt, sind die Ursachen für Tsunamis mittlerweile weitgehend enträtselt. Nach den Erkenntnissen von Wissenschaftlern können sie bei jeder „Störung“ im Meer entstehen, die große Wassermassen aus ihrem Gleichgewicht bringt – egal ob es sich um einen heftigen unterseeischen Erdrutsch, einen Vulkanausbruch oder einen Meteoriteneinschlag handelt. Denn alle diese Ereignisse haben eines gemeinsam: Sie setzen genügend Energie frei, um große Mengen an Wasser nach oben und zur Seite zu drücken und geben so den Impul für einen Tsunami.

Beispielsweise ereignete sich eine der gewaltigsten Tsunamikatastrophen in der Geschichte der Menschheit im Jahr 1883 nach einem Vulkanausbruch. Damals explodierte der Feuerberg Krakatau in der Sundastraße zwischen den indonesischen Inseln Java und Sumatra. Dabei wurde nicht nur ein großer Teil des Gipfels abgesprengt, auch die unterseeische Caldera stürzte in die leere Magmakammer. Der dabei entstandene Tsunami erreichte innerhalb weniger Stunden viele Küstenregionen und brachte mehr als 36.000 Menschen im Umkreis von

*Nach der Katastrophe: Mit dem wenigen Hab und Gut muss ein Neuanfang gestartet werden.
© U.S. Navy/Elizabeth A. Edwards*









Die Stadt Meulaboh auf der
indonesischen Insel Sumatra
ist ein einziges Trümmer-
feld. © U.S. Navy/Jennifer
Rivera



80 Kilometern um den Krakatau den Tod. 295 Orte wurden im Verlauf der Katastrophe vollständig zerstört. Die Wellen türmten sich örtlich bis zu einer Höhe von 40 Metern auf. Viel häufiger als nach Vulkanausbrüchen ist jedoch Tsunamigefahr in Verzug, wenn die Erde im Meer irgendwo entlang der Plattengrenzen oder an den Hot-Spots bebt. Hat der Erdstoß dann noch eine Stärke von 7 oder mehr auf der Moment-Skala, wird es richtig brenzlig. Solche größeren Seebbenen sind insbesondere entlang des „Pazifischen Feuerrings“ im Pazifischen Ozean relativ häufig. Hier tauchen die dichteren ozeanischen Platten unter die Kontinentalplatten ab, ein Vorgang, der als Subduktion bezeichnet wird.

Bei der Subduktion verhaken sich die Platten ineinander und es bilden sich Spannungen im Gestein. Durch eine plötzliche ruckartige Bewegung der Bruchschollen lösen sich diese Spannungen auf – die Erde bebt. Der Meeresboden wird dabei heftig durchgeschüttelt und stark abgesenkt oder schnellt nach oben. Die gewaltigen Wassermassen, die über der geologischen Störung liegen, kommen dadurch aus dem Gleichgewicht, geraten in Bewegung und es bilden sich Wellen. Werden nun bei einem Erdstoß riesige unterseeische Gebiete deformiert – beim Sumatra-Beben im Dezember 2004 hob sich der Meeresboden beispielsweise auf einer Länge von 1.200 Kilometern um bis zu zehn Metern schlagartig an – kann ein Tsunami die Folge sein.

*Wo endet das Wasser – wo beginnt das Land? Banda Aceh sechs Wochen nach dem Tsunami 2004 in Südostasien.
© U.S. Navy/Jon Gesch*



Wellen mit Turbo-Antrieb

Ist ein Tsunami erst einmal in Gang gebracht, geht es rasend schnell: Von seinem Ursprungsort breiten sich mehrere flache Wogen mit hoher Geschwindigkeit kreisförmig aus. Und zwar je tiefer das Wasser ist, umso schneller. Wissenschaftler haben herausgefunden, dass die Wellen sich dort, wo der Meeresgrund mehr als vier Kilometer unter der Wasseroberfläche liegt, sogar mit Jet-Geschwindigkeit auf die Küsten zubewegen. Während bei einem Tsunami auf dem offenen Meer nicht einmal ein einfaches Paddelboot in Gefahr gerät, wird es in Küstennähe gefährlich: Aus der harmlosen, kaum einen Meter hohen Woge entwickeln sich steilaufragende, zum Teil bis zu 40 Meter hohe Wellengiganten, die ganze Küstenregionen zu verschlingen drohen. Der Grund dafür ist, dass die wachsende Bodenreibung das Tempo der Welle abrupt abbremst. Die Wellenlänge des Tsunamis schrumpft dramatisch, ohne dass sich die mitgeführte Energie wesentlich verringert.

So war es auch am 1. November 1755, als nach dem schweren Erdbeben von Lissabon „nur“ zehn Meter hohe Brecher gegen die Küsten Portugals prallten und ihren Beitrag zur fast vollständigen Zerstörung der Metropole Lissabon leisteten. 30.000 bis 100.000 Menschen starben damals durch eine Feuersbrunst und die Flutwellen – eine der zerstörerischsten Naturkatastrophen in der Geschichte Europas. Ein Tsunami kracht dabei nicht in Form einer tosenden, brechenden Welle an Land, die denen an Surfstränden auf Hawaii oder anderswo ähnelt. Stattdessen beobachten Forscher eine blitzschnell steigende und fallende „Flut“, die die tiefer gelegenen Küstengebiete mit großer Heftigkeit überschwemmt. Wie sich die Riesenwelle im Detail verhält, hängt von verschiedenen Faktoren vor Ort ab. Riffe, Flussmündungen, unterseeische Gebirge, vorgelagerte Inseln, die Neigung eines Strandes – alle diese Faktoren können das Aussehen des Tsunamis beim „Landgang“ beeinflussen. So wie der Funker an Bord eines Schiffes bei Gefahr SOS-Meldungen absetzt, so gibt auch der Tsunami meist deutliche Warnsignale ab, bevor er die Küste erreicht. So registrieren Forscher beispielsweise vor der Ankunft des Tsunamis manchmal einen extrem weiten Rückzug des Wassers – eine ungewöhnliche „Ebbe“. Aber noch aus einem anderen Grund ist bei Tsunamis Vorsicht geboten. Ein Tsunami besteht normalerweise nicht aus einer einzelnen Welle, sondern aus mehreren aufeinanderfolgenden Wogen. Viele Menschen haben ihr Leben verloren, weil sie nach der ersten Tsunamikugel in ihre Häuser zurückgekehrt sind und dort von einer weiteren, teilweise noch stärkeren Riesenwelle überrascht wurden.

Schäden ohne Ende

Ein Tsunami kann nach Schätzungen von Wissenschaftlern eine Million Tonnen Wasser bewegen – entsprechend groß ist die Energie, die ein Tsunami mit sich führt, wenn er das Festland erreicht. Die dadurch hervorgerufenen Schäden haben meist gewaltige Ausmaße. Dies hat zuletzt der Tsunami im Jahr 2004 im Indischen Ozean gezeigt. Insgesamt sind allein in den letzten 100 Jahren mehr als 270.000 Menschen bei den verschiedenen Tsunamikatastrophen in den Wellen ertrunken, ganze Küstenstriche wurden verwüstet, Dörfer und Städte von der Landkarte

*Überlebenshilfe aus der Luft:
Ein Hubschrauber der U.S. Navy
versorgt indonesische Tsunami-
Opfer. © U.S. Navy/Jacob J. Kirk*





Banda Aceh: Eine Stadt liegt in Trümmern nach dem Tsunami 2004. © U.S. Navy/Tyler J. Clements

radiert und Ernten vernichtet. Auch starke Erosionsschäden werden immer wieder nach Tsunamis beobachtet. Strände, die die Natur in Jahrzehnten oder Jahrhunderten angelegt hat, kann ein Tsunami in 30 Sekunden wieder abtragen.

Von den Überschwemmungen und Verwüstungen betroffen sind meist die flachen Küstenbereiche. Besondere Gefahr droht dabei Flussmündungen und Meeresbuchten, die die Wassermassen wie ein Trichter konzentriert und ihre Wucht verstärken. Gerade diese Orte sind jedoch beliebte Siedlungsgebiete und daher mit einem enormen Risiko behaftet. Viele der schlimmsten Schäden entstehen aber nicht nur durch die Überflutung selbst, sondern auch durch den gewaltigen Sog, wenn sich die Welle wieder ins Meer zurückzieht. Ganze Häuser und Hallen samt Fundament entreißen die Wassermassen dann dem Land. Die Sachschäden nach Tsunamis gehen längst in die Milliarden. Für Versicherungen zählen die Riesenwellen deshalb zu den gefährlichsten und teuersten Naturkatastrophen überhaupt.

Strategien gegen das Wasser

Wieder einmal tobende Wassermassen. Palmen knicken ab wie Streichhölzer. Schiffe werden an Land geschleudert. Menschen rennen um ihr Leben. Erneut hat ein Tsunami zugeschlagen. Diesmal auf Hawaii. Und wieder einmal wie aus heiterem Himmel und ohne jede Vorwarnung. 159 Menschen können im Jahr 1946 den Fluten nicht entkommen, 96 davon allein in Hilo, dem Hauptort von Big Island, der Hauptinsel. Hilo gilt unter Meeresforschern ohnehin als „Wellenfalle“. Immer wieder werden Tsunamis durch das besondere Relief des Meeresbodens rund um das Hawaii-Archipel hierhin geführt. Aber die Naturkatastrophe hat dieses Mal auch etwas Gutes. Endlich beginnen Wissenschaftler und Politiker sich Gedanken darüber zu machen, wie man sich vor den schlimmsten Folgen der Riesenwellen schützen kann. Das man Tsunamis nicht verhindern kann, ist klar, deshalb muss man Strategien entwickeln, wie gefährdete Regionen vor einem drohenden Tsunami gewarnt werden können. Guter Rat ist zunächst teuer. Schließlich aber kommt die zündende Idee: Die USA errichten im Jahr 1948 das Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) mit Sitz auf Hawaii.

Was als Schutz für die US-amerikanische Bevölkerung begann, ist mittlerweile zu einem multinationalen Unterfangen geworden. Fast alle Pazifik-Anliegerstaaten beteiligen sich inzwischen am PTWS und arbeiten mit den amerikanischen Instituten und Forschern Hand in Hand. Mithilfe eines Messnetzes im Pazifik registrieren die Wissenschaftler jede seismische Aktivität in dem riesigen Gebiet. Zusätzlich werden Daten zur Meeresbewegung durch Bojen und über Satellit in die Tsunami-Überwachungszentren geliefert. Liegen ungewöhnliche Wasserstände vor, geben die Forscher Alarm. Bei einem Erdbeben ab einer Stärke von 7 oder mehr ist besondere Eile bei der Auswertung geboten. Da das Relief des Meeresbodens weitgehend bekannt ist und die Geschwindigkeit eines Tsunamis von der Wassertiefe abhängt, kann man die Laufzeiten anschließend recht genau bestimmen. Sobald fest steht, welchen Weg der Tsunami nehmen wird, infor-



mieren die Behörden die breite Öffentlichkeit in den betroffenen Gebieten über Radio- und Fernsehsender oder per E-Mail bzw. Handy. Parallel werden eventuell notwendige Evakuierungsmaßnahmen eingeleitet. Sehr gut funktioniert hat dieses Frühwarnsystems auch am 26. Dezember 2004 bei dem schweren Erdbeben vor der Küste der indonesischen Insel Sumatra – ohne am Ende allerdings die katastrophalen Folgen des Tsunamis verhindern zu können. Denn die größte Tragik dieses Naturereignisses bestand darin, dass bereits zwölf Minuten nach den verheerenden Erdstoß eine Tsunami-Warnung möglich gewesen wäre. Denn zu diesem Zeitpunkt hatten die seismischen Messstationen rund um die Welt den Erdbebenherd bereits lokalisiert und Experten wie am Pacific Tsunami Warning Center befürchteten das Schlimmste. Doch aufgrund fehlender Ansprechpartner in den betroffenen Ländern konnte die Warnung nicht rechtzeitig weitergegeben werden. In Zukunft sollen die wertvollen Minuten und Stunden bis zum Auftreffen möglicher Tsunamis auf die Küstenzenonen nicht mehr ungenutzt verstreichen. Dafür bürgt unter anderem das neu entwickelte deutsch-indonesische Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean GITEWS (German Indonesian Tsunami Early

Tsunami-Warnsystem im Pazifik:
Messstationen registrieren
Erdbeben und ungewöhnliche
Änderungen des Wasserstands
und ermöglichen so eine frühzeitige
Alarmierung der gefährdeten
Küsten. © MMCD NEW MEDIA

INTERVIEW

Dr. Jörn Lauterjung vom Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) koordiniert das „German Indonesian Tsunami Early Warning System“.



Das Tsunami-Frühwarnsystem GITEWS ist im November 2008 offiziell an Indonesien übergeben worden und hat seinen Betrieb aufgenommen. Ist damit im Indischen Ozean die Gefahr von Tsunami-Katastrophen wie am zweiten Weihnachtstag 2004 gebannt?

Die Gefahr eines Tsunamis im Indischen Ozean ist durch die Einrichtung eines Frühwarnsystems natürlich nicht gebannt. Starke Erdbeben werden in der Region immer wieder auftreten und auch Tsunamis auslösen. Das Frühwarnsystem kann helfen, durch rechtzeitige Warnung und Evakuierung Menschenleben zu retten, insbesondere in Gegenden, die weiter entfernt vom Entstehungsort des Tsunamis sind. Weiterhin haben die Arbeiten am Frühwarnsystem zu einer intensiven Beschäftigung mit dem Gefährdungspotenzial einzelner Regionen und zur Vorbereitung und Umsetzung präventiver Maßnahmen geführt.

Warum gilt das neue Frühwarnsystem als modernstes seiner Art?

Wir haben beim Aufbau des Systems die Chance genutzt, in das neue System viele erst in den letzten Jahren entwickelte Methoden zu integrieren, und wir haben sehr darauf geachtet, dass das System modular aufgebaut ist, so dass wir flexibel bleiben und auch in Zukunft neue Methoden und Mess-Systeme einbinden können. So ist bei dem System die Einbindung der GPS-Technologie neu und auch im Bereich der Modellierung und Simulation haben wir die aktuellsten Ansätze und Entwicklungen berücksichtigt.

Sie und die anderen beteiligten deutschen Wissenschaftler begleiten noch einige Zeit den Betrieb des Frühwarnsystems. Was muss noch getan werden?

Das gesamte System besteht aus mehreren unterschiedlichen Teilsystemen, die im laufenden Betrieb aufeinander abgestimmt und optimiert werden müssen. Ebenso muss ein komplexes System wie das Frühwarnsystem auf die geologischen und ozeanographischen Randbedingungen abgestimmt werden. Der wichtigste Part ist aber, dass die indonesischen Kollegen, die das System in der Zukunft betreiben müssen, intensiv geschult und trainiert werden müssen.

Haben Sie bereits Anfragen aus anderen ebenfalls von Tsunamis bedrohten Ländern/Regionen vorliegen, die auch ein maßgeschneidertes Frühwarnsystem wie GITEWS haben wollen?

Wir haben nicht nur viele Anfragen aus verschiedenen Ländern und Regionen vorliegen, wir haben in den letzten Jahren bereits in mehr als zehn Ländern um den Indischen Ozean begonnen, Teile des Warnsystems – maßgeschneidert für die jeweiligen Länder und Bedürfnisse – aufzubauen und in Betrieb zu nehmen.

Braucht auch Europa ein Tsunami-Frühwarnsystem?

Das Mittelmeer ist ähnlich tsunamigefährdet wie der Indische Ozean. Eine Analyse der historischen Ereignisse zeigt aber, dass im Mittelmeer auch andere auslösende Ereignisse, neben Erdbeben sind das Vulkanismus und untermeerische Hangrutschungen, eine wichtige Rolle spielen. Es ist unbestritten, dass auch Europa ein Tsunami-Frühwarnsystem braucht. Zurzeit läuft ein intensiver Diskussionsprozess in Europa, wie das am besten zu organisieren ist.

Warning System), das am 11. November 2008 in Jakarta offiziell eingeweiht und an die indonesischen Projektpartner übergeben wurde. Neben dem GFZ sind unter anderem das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht an GITEWS beteiligt. Ziel von GITEWS ist es, die Auswirkungen von Tsunamis im Indischen Ozean so weit wie möglich zu verringern. „Durch dieses Frühwarnsystem gewinnen die Menschen etwa 20 Minuten Zeit, um sich in Sicherheit zu bringen: Wir hoffen, dass es viele Leben retten wird“, erklärt GFZ-Wissenschaftler Jörn Lauterjung, der Projektkoordinator von GITEWS. Für einige Zeit begleiten die deutschen Wissenschaftler noch den Betrieb und die Optimierung des Systems, im Anschluss daran wird es von den Kollegen vom Meteorologischen, Klimatologischen und Geophysikalischen Dienst Indonesiens (BMKG) alleine weitergeführt. Aber nicht immer müssen es komplizierte elektronische Geräte sein, die die Menschen vor Tsunamis schützen. Die Verantwortlichen in einigen besonders tsunamigefährdeten Städten, wie zum Beispiel Callao in Peru oder Shizuoka in Japan, setzen auf sehr viel handfestere Strategien. Mit mächtigen Schutzwällen oder Mauern aus Metall versuchen sie, die Schäden durch die Wassermassen in Grenzen zu halten. Doch trotz der enormen Kosten für diese Megaprojekte bieten auch sie nicht immer ausreichend Sicherheit, wenn ein Tsunami mit unvorstellbarer Wucht auf die Küste trifft.

Ausbringen einer Messboje für das Tsunami-Warnsystem im Indischen Ozean. © Deutsches GeoForschungZentrum





Von einer Rutschung
zerstörte Häuser, umgeben
von Schlammmassen in La
Conchita, Kalifornien.
© FEMA/John Shea



Massenbewegungen

Wenn die Schwerkraft stärker ist

Fließen, kriechen, fallen, stürzen - und immer den Hang hinab. Wenn die Schwerkraft stärker ist, sind Menschenleben gefährdet und Schäden vorprogrammiert. Massenbewegungen sind eine der wenigen Naturgefahren, auf die der Mensch einen deutlichen Einfluss hat: Eine tödliche Lawine – ausgelöst durch einen leichtsin-

nigen Ski- oder Snowboardfahrer oder durch eine Hangrutschung, weil der natürliche und den Boden fixierende Bewuchs vom Mensch gerodet wurde. Flächennutzung und Flächenversiegelung spielen hier eine große Rolle. Und immer aufwändiger werden die Befestigungsmaßnahmen, die dabei helfen, Katastrophen zu vermeiden.



Erdrutsche – wenn Hänge abwärts gleiten

Tödliche Katastrophe: Beim La-Conchita-Erdrutsch im Jahr 2005 im US-Bundesstaat Kalifornien starben zehn Menschen.
© USGS/Mark Reid

Von Alaska bis Feuerland, von Madrid bis Wladiwostok, vom Atlas bis zum Kap der Guten Hoffnung, nirgendwo ist man vor ihnen sicher: Erdrutsche zählen zu den am weitesten verbreiteten geologischen Gefahren auf der Welt. Erste schriftliche Belege über die Folgen solcher Extremereignisse – die Wissenschaftler sprechen von Massenbewegungen – stammen schon aus der Zeit um 1770 v. Chr. Die damals von Erdbeben ausgelösten Erdrutsche sperren in China die Flüsse Yi und Lo und führten zu riesigen Überschwemmungen.

Auch die Einwohner Perus sind seit Jahrtausenden gut vertraut mit solchen Katastrophen. Sie haben sogar unterschiedliche Worte dafür erfunden, um die verschiedenen Formen zu beschreiben. Als „Huaico“ bezeichnet man in Peru eine Lawine mit größeren oder kleinen Gesteinsbrocken, „llapana“ dagegen beschreibt einen gemächlichen, ruhigen Schlammstrom. Und auch bei uns ist Erdrutsch nicht gleich Erdrutsch. Je nach Material, das sich bewegt, und der Geschwindigkeit, mit der es abrutscht, unterscheidet man bei uns Bergrutsche oder Felsstürze, Schutt- und Steinlawinen, Schuttrutschungen, Muren oder Bodenkriechen. Obwohl die Anzahl der Todesopfer und die Sachschäden durch Erdrutsche in den letzten Jahren immer weiter zu steigen scheinen, handelt es sich dabei um oft um „verschwiegene“ Naturkatastrophen. Die Auswirkungen von Erdrutschen tauchen

in Tageszeitungen oder im Fernsehen meist nicht detailliert auf. In der Regel fließen sie der Einfachheit halber in die Zahlen von spektakulären Naturkatastrophen wie Erdbeben oder Vulkanausbrüchen mit ein. So weiß kaum jemand, dass bei dem schweren Sichuan-Erdbeben am 12. Mai 2008 in China viele der mindestens 87.000 Toten nicht durch den Erdstoß oder die Nachbeben ums Leben kamen, sondern durch Erdrutsche. Ähnlich war es auch beim Beben in Kaschmir, das im Oktober 2005 rund 86.000 Menschenleben forderte. Relativ eindeutig belegt sind dagegen die Opferzahlen bei zwei anderen Erdrutschten. So starben 1970 in Peru mindestens 20.000 Menschen bei einer einzigen Schlamm- und Gerölllawine in den Städten Yungay und Ranrahica am Fuß des 6.768 Meter hohen Berges Huascarán, 1985 gab es bei einer ganzen Serie solcher Erdrutsche in Kolumbien sogar 22.000 Tote. Die finanziellen Schäden aus diesen Katastrophen überschreiten in Ländern wie China, Indonesien oder Indien jedes Jahr regelmäßig die Milliarden-Dollar-Grenze.

Naturkatastrophe oder „man-made disaster“?

Auch in Mitteleuropa gab es in den letzten 120 Jahren mindestens vier Zeiträume, in denen besonders viele Erdrutschungen beobachtet wurden. Die vielleicht schlimmste Erdrutschserie fand um die Jahreswende 1982/83 in Rheinland-Pfalz statt. Innerhalb von 24 Stunden wurden 280 solcher Ereignisse gemeldet, dabei gerieten insgesamt zehn Millionen Kubikmeter Erdmassen in Bewegung. Studien haben ergeben, dass solche Häufungen immer dann auftreten, wenn zwei oder drei Jahre lang hintereinander überdurchschnittlich viel Niederschlag fällt.

Solange der Boden nur feucht ist, ist alles noch in Ordnung. Dann hält die Oberflächenspannung eines dünnen Wasserfilms die Bodenteilchen zusammen und festigt so den Untergrund. Staut sich aber durch viel Regen die Nässe im Boden, drängt das zusätzliche Wasser die Bodenkörner auseinander. Es wirkt wie ein Schmiermittel und macht den Boden instabil. Beste Voraussetzungen für einen Erdrutsch. Kommt dann noch ein akuter Auslöser – plötzliches Auftauen der gefrorenen Erde durch einen Wärmeeinbruch oder ein heftiger Regenguss – hinzu, ist die Katastrophe häufig nicht mehr aufzuhalten. In Asien oder Amerika sind es häufig schwere Tropenstürme wie Hurrikans oder Zyklone, die das „Fass zum Überlaufen“ bringen. Mit ihren heftigen Regenfällen machen sie ganze Hänge instabil und legen so die entscheidende Grundlage für todbringende Erdrutsche. Eine andere natürliche Ursache für Erdrutsche sind großflächige Erschüt-

Bezeichnung	Auswirkungen
Bergrutsch	Bei einem Bergrutsch bricht das Gestein entlang eines Hangs und gleitet als mehr oder weniger geschlossene Einheit mit hoher Geschwindigkeit den Hang hinab.
Steinlawine	Steinlawinen bestehen aus durch Fallen und Rutschen zerkleinertem Gesteinsmaterial, das mit hoher Geschwindigkeit (mehr als fünf Kilometer pro Stunde) zu Tal strömt.
Bodenkriechen	Bodenkriechen ist die langsamste Form der Massenbewegung: Nur wenige Millimeter pro Jahr wandert dabei der Boden oder Schutt hangabwärts. Meist ist diese Bewegung nur an charakteristischen Verformungen der Erdoberfläche oder schiefer werdenden Bäumen zu erkennen.
Schuttrutschung	Bei einer Schuttrutschung löst sich ein zusammenhängender Teil eines Hangs oder einer Bodenschicht und gleitet mit hoher Geschwindigkeit zu Tal.
Schuttlawine	Schuttlawinen oder Muren gehören zu den schnellsten Massenbewegungen. Bis zu 70 Kilometer pro Stunde können die Ströme aus wassergesättigtem Boden, zerkleinertem Gestein und Holztrümmern von umgerissenen Bäumen erreichen.

*Rechte Seite: Retten, was zu retten ist: Freunde und Nachbarn helfen obdachlosen Bewohnern im kalifornischen Laguna Niguel beim Aufräumen.
© FEMA/Dave Gatley*

terungen der Landschaft durch Erdbeben oder Vulkanausbrüche. Besonders leicht entstehen Massenbewegungen an Hängen, die aus sehr tonigem oder lehmigem Material bestehen oder bei denen mehrere geologische Schichten parallel zur Hangneigung aufeinanderliegen. Auch der Mensch ist nicht ganz unschuldig an vielen Erdrutschen: In fast 40 Prozent aller Fälle löst er ein solches Ereignis selbst aus, zum Beispiel durch Hanganschnitte für den Straßenbau, Aufschüttungen oder andere Baumaßnahmen. Zusätzlich haben auch schon länger zurückliegende menschliche Eingriffe noch heute massive Auswirkungen auf die Hangstabilität. Vor allem die schon im Mittelalter begonnen großflächige Rodung der Hangwälder hat vielerorts zu kahlen Hangflächen geführt, die der Erosion schutzlos ausgesetzt sind.

Besonders fatal: Gerade diese Hanglagen mit Aussicht sind oft begehrtes Bauland. So wurde in Rheinhessen vor einiger Zeit ein Gebiet mit dem vielsagenden Namen „In der Rutsch“ bebaut. Für die stolzen Bauherren damals ein teures Vergnügen: Trotz spezieller Fundamente kam es durch Erdbewegungen zu deutlichen Schäden an den Wohnhäusern. Nicht unerheblich zum Erosionsproblem trägt der stetig wachsende Tourismus bei. Überall in den Bergregionen werden neue Skipisten und Wanderwege angelegt und Hotels errichtet. Die Schneisen, die so in den natürlichen Bewuchs gerissen werden, machen die Bergflanken noch anfälliger.

Warnsignale auf der Spur

Den natürlichen Ursachen stehen daher eine ganze Menge menschengemachter Gründe für die zahllosen Erdrutsche, Bergstürze und Schlammlawinen der letzten Jahre gegenüber. Doch was passiert eigentlich genau, wenn ein Hang in Bewegung gerät? Startet alles mit einem Sandkorn, das sich löst, und steigert sich danach in einer logarithmischen Kaskade oder bewegen sich – aus welchem Grund auch immer – plötzlich alle Partikel gleichzeitig? Beginnt die Bewegung an der Basis eines Hangs vergleichbar mit dem Vorgang, wenn man im Supermarkt aus einer Pyramide mit Konservendosen oder Apfelsinen die unterste hinauszieht? Oder läuft sie vom Gipfel aus an und wächst wie ein Schneeball, der einen Hang herabrollt?

Diese und andere Fragen versuchen Wissenschaftler wie Dave Montgomery am University of Washington's Quaternary Research Center zu beantworten. „Wir haben viele Theorien, aber nur wenige harte Fakten“, sagt der Forscher. „Sicher ist, dass einige Erdrutsche – vor allem bei sandigen Böden – als langsame Erdbewegung beginnen. In diesen Fällen können steigender Porendruck und minimale Deformationen des Bodens unter der Oberfläche als Warnsignale dienen.“ Diese Vorboten der Katastrophe können heute mithilfe sorgfältig platzierte Messinstrumente bereits präzise gemessen werden. Montgomery zweifelt aber, ob diese Warnsignale von großem Nutzen sind. „Wenn ein einigermaßen großer Bereich in Bewegung gerät, geht der Rest ganz schnell. Erdrutsche bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu zehn Metern pro Sekunde. In dem Moment, wo





Risikofaktoren bei Erdrutschen

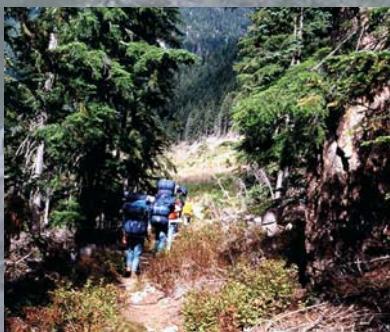
Rodung:

Bergwälder schützen Hänge vor dem Abrutschen. Die Wurzeln der Bäume geben dem Boden Halt und verhindern, dass die Erde weggeschwemmt wird. Werden die Schutzwälder gerodet, wächst auch die Gefahr von Erdrutschen und Schlammlawinen.



Besiedlung:

Durch die steigende Bevölkerungsdichte wachsen auch die menschlichen Siedlungen. Gerade im Gebirge dehnen sie sich zunehmend bis an erdrutschgefährdete Hänge aus. Dadurch steigt das Risiko, dass sich ein Erdrutsch in bewohntem Gebiet ereignet.



Tourismus:

Für den zunehmenden Tourismus werden in vielen Bergregionen Wälder gerodet, Skipisten und Wanderwege angelegt und neue Hotels errichtet. Sie reißen Schneisen in den natürlichen Bewuchs und können Hänge dadurch anfälliger für Erosion und Rutschungen machen.



Trittschäden:

Wenn zu viele Kühe oder Schafe auf einer Hangweide gehalten werden, zertrampeln sie den Untergrund. Fehlen die Gräser und Kräuter, die vorher mit ihren Wurzeln den Hang befestigt haben, wird der Untergrund leichter instabil.

© Harald Frater; USGS; California Department of Water Resources

Wildverbiss:

Zu große Wilddichte in den Bergwäldern führt dazu, dass besonders die jungen Triebe der Bäume angeknabbert und zerstört werden. Der Wald kann sich dadurch nicht mehr von selbst verjüngen und wird immer lichter. Das Risiko von Erdrutschen wächst.



Baumaßnahmen:

Viele Straßen in Gebirgsgegenden verlaufen nicht in den Tälern, sondern werden in die Hänge hineingebaut. Dadurch entstehen künstlich verstieilte Hangpartien, die besonders leicht ins Rutschen kommen.



Waldsterben:

Der Mensch trägt mit Emissionen von Luftschaadstoffen erheblich zum Waldsterben in vielen Gebirgsregionen bei. Schwefeldioxid, Stickoxide und der aus ihnen entstehende saure Regen schädigen die Bäume, machen sie anfälliger gegenüber Schädlingen und können sogar zu großflächigen Kahlstellen führen.



Staunässe:

Staut sich Wasser im Boden, wirkt es wie ein Schmiermittel. Erde und Geröll verlieren ihren Zusammenhalt und ganze Felsschichten können auf einem Wasserfilm leichter zu Tal rutschen.



man das Geräusch hört, bleibt deshalb auch nicht mehr genügend Zeit, um der Katastrophe auszuweichen.“ Solange sich solche Massenbewegungen in weitgehend unbesiedelten Gebieten abspielen, bleiben die Schäden überschaubar. Zur echten Katastrophe werden Erdrutsche immer dann, wenn Menschen davon betroffen sind. Durch die extreme Bevölkerungsexplosion in vielen Ländern der Erde dehnen sich die Siedlungen heute auch im Gebirge bis in erdrutschgefährdete Hänge aus. Dadurch steigt das Risiko, dass sich ein Erdrutsch in bewohntem Gebiet ereignet, drastisch an. Die Folgen, die sich dann aus solch einem Ereignis ergeben, sind häufig katastrophal.

Fatale Launen der Natur

13. November 1985, Kolumbien. Bei der Explosion des Feuerbergs Nevado del Ruiz werden Unmengen heißer Asche und Gestein ausgeworfen. Das vulkanische Material und die Gas- und Aschewolken breiten sich blitzschnell über den schneedeckten Gletscher aus und tauen große Mengen davon ab. Lawinen aus heißer Lava, Staub, geschmolzenem Schnee und Schlamm bahnen sich ihren Weg Richtung Tal und sammeln dabei weiteres Geröll und Sedimente ein. Mit der Zeit entstehen so heiße Lahars von gigantischem Ausmaß und großer Dichte. 40 Meter dick sind diese Matsch- und Schuttfluten, als sie in den Flusstäler weitab vom Vulkan ankommen. Sie bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 50 Kilometern pro Stunde vorwärts. Knapp zweieinhalb Stunden nach dem Ausbruch

*Schuttkegel aus erodiertem Material sind typisch für Hochgebirge wie hier in den österreichischen Alpen. Sie werden häufig vom natürlichen Bewuchs aufgehalten.
© Harald Frater*



Jahr	Land	Ergebnis
2007	Indonesien	Tagelang anhaltende schwere Regenfälle führen im Dezember auf der indonesischen Insel Java zu mehreren verheerenden Erdrutschen. Die Schlammmassen begraben zum Teil ganze Dörfer unter sich. Mindestens 130 Menschen sterben bei der Naturkatastrophe, viele tausend Bewohner der betroffenen Regionen verlieren ihr Dach über dem Kopf.
2006	Philippinen	Lang anhaltender Starkregen und ein leichter Erdstoß sorgen im Februar für einen schweren Bergutsch auf der philippinischen Insel Leyte. Die Erdmassen verschütten rund 100 Häuser und eine Grundschule. Mindestens 141 Menschen kommen ums Leben, über 1.000 gelten als vermisst.
2000	Italien/Schweiz	Tagelange Unwetter führen im Oktober 2000 im Alpenraum zu verheerenden Flut- und Erdrutschkatastrophen. Besonders schwer betroffen sind das italienische Aosta-Tal und das Schweizer Kanton Wallis. Im eidenössischen Bergdorf Gondo reißt eine Schlamm- und Schuttawine mindestens acht Häuser mit und begräbt einige Bewohner unter sich. Mehrere Menschen können nur noch tot aus den Trümmern geborgen werden.
1998	Nicaragua, Casitas	In einer sieben Kilometer breiten Schlammlawine löst sich der Kraterrand des Vulkans Casitas im Nordwesten Nicaraguas und begräbt fünf Dörfer unter sich. Auf seinem 16 Kilometer langem Weg ins Tal reißt der Erdrutsch, der durch die starken Regenfälle im Gefolge des Hurrikans „Mitch“ ausgelöst wurde, tausende von Menschen mit sich, mindestens 7.000 Bewohner der Region sterben.
1994	Indonesien, Merapi	Im Jahr 1994 geht nach dem Ausbruch des Merapi-Vulkans auf Java eine glühend heiße Lawine aus Lava, Schlamm und Geröll ab und dringt in kürzester Zeit mehr als sieben Kilometer weit ins Boyong-Tal vor. Ungefähr 100 Menschen werden von dem Lahar überrollt und getötet.
1987	Italien	Im oberen Tal der Adda (Veltlin) kommt es zu einer der gewaltigsten geologischen Katastrophen dieses Jahrhunderts in den Alpen. Am 28. Juli 1987 stürzt eine Gesteinsmasse von rund 40 Millionen Kubikmetern mehr als 1.000 Meter in die Tiefe und verteilt sich über die Talsohle. Der Bergsturz ist von einer orkanartigen Druckwelle begleitet, der Wälder und Kirchtürme knickt wie Streichhölzer. Die Adda staut sich zu einem gewaltigen See auf, der unterhalb gelegene Orte zu überfluten droht. 20.000 Menschen werden blitzartig evakuiert. Die einzigen Opfer sind schließlich acht Menschen, die sich geweigert hatten, ihre Häuser zu verlassen.
1985	Kolumbien, Nevado del Ruiz	20 Millionen Kubikmeter heiße Asche und Gestein werden bei der Explosion des Feuerbergs Nevado del Ruiz in Kolumbien im Jahr 1985 ausgeworfen. Das vulkanische Material und die Wolken breiten sich über den schneedeckten Gletscher aus und lassen große Mengen davon abtauen. Eine explosive Mischung aus heißer Lava, Asche, geschmolzenem Schnee und Schlamm entsteht und bahnt sich seinen Weg Richtung Tal. Knapp zweieinhalb Stunden nach dem Ausbruch erreicht einer dieser Lahars die 74 Kilometer vom Explosionskrater entfernt gelegene Stadt Armero und begräbt sie unter einer dicken Schlamm- und Geröllschicht. Fast alle Einwohner der Stadt – 22.000 Menschen – kommen bei dieser Katastrophe ums Leben.
1982	USA	1982 sorgen schwere Stürme in vielen Orten des US-Bundesstaats Kalifornien für Erdrutsche und Schlammlawinen. Zahlreiche Tote und gewaltige Schäden sind zu beklagen.
1963	Italien	In der Nacht zum 9. Oktober 1963 kommt der gesamte südliche Hang des Vajont-Tals in den italienischen Alpen ins Rutschen. In Sekundenschnelle rast das gelöste Erd-, Stein- und Geröllmaterial in einen riesigen Stausee. Eine 70 Meter hohe Flutwelle ist die Folge. Mehrere Dörfer werden überschwemmt. Rund 2.500 Menschen sterben an den Folgen des Erdrutsches und des Hochwassers.
1962/1970	Peru	Vom Gipfelgletscher des 6.768 Meter hohen Huascarán lösen sich am 10. Januar 1962 gewaltige Mengen an Eis und Schnee. Nach fast 1.000 Metern freiem Fall trifft das Gemisch auf den Untergrund und wird zu einer Schnee- und Schlammlawine von fast 13 Millionen Kubikmetern Ausdehnung. Sie zerstört die im Tal gelegene Stadt Ranrahirca und sechs weitere Dörfer. 4.000 Menschen werden getötet. Im Mai 1970 wiederholt sich das Ereignis, als ein sehr schweres Erdbeben mit der Magnitude 7,8 die Region heimsucht. Wieder gibt es viele tausend Todesopfer. Allein in dem Ort Yungay sind es vermutlich 20.000.

Mit Ansage – der Erdrutsch im Vajont-Tal

| Schema und Lage des Erdrutsches im Vajont-Tal. © MMCD NEW MEDIA



Eine fatale Kombination von Erdrutsch und Überschwemmungen war es, die das Vajont-Tal in Italien im Oktober 1963 in die größte Katastrophe seiner Geschichte stürzte. Begonnen hatte alles, als von 1956 an in der Schlucht mit dem Flüsschen Vajont die mit 261,6 Metern damals höchste Staumauer der Welt errichtet wurde. Dabei entstand

eine gewaltige Talsperre mit über 150 Millionen Kubikmetern Fassungsvermögen. Ziel war es unter anderem, die Stadt Venedig mit reichlich Energie zu versorgen. Doch das Megaprojekt stand von Anfang an unter keinem guten Stern. Denn die Bauherren hatten bei der Planung die geologischen Verhältnisse in der Region und



die davon ausgehenden Erdrutsch-gefahren ignoriert. 1960 schickte die Natur den Ingenieuren dann eine letzte eindeutige Warnung: An der südlichen Flanke des Stausees rutschte ein großer Teil des steilen Berges in den See. Zwar wurden Wissenschaftler der Universität Padua mit der Untersuchung des Vorfallen beauftragt, doch ihre Simula-tionen ergaben keine Hinweise auf eine drohende Gefahr – die Füllung des Sees ging weiter. Am 9. Oktober 1963 um 22:39 Uhr begann dann das Drama. Der gesamte südliche Hang – drei Kilometer lang, über einen Kilometer breit und 150 Meter dick – geriet ins Rutschen. In Sekundenschnelle donnerten 270 Millionen Kubikmeter Erde und Gestein herab und rasten mit über 100 Kilometern pro Stunde zu großen Teilen in den Stausee. Folge: eine riesige, bis zu 70 Meter hohe Flut-welle. Knapp 30 Millionen Kubikmeter Wasser schwäpften daraufhin über die Krone des Damms und ergossen sich in einer todbringenden Woge in das tiefer gelegene Tal. Die Wassermassen überraschten die meisten Menschen im Städtchen Longarone und anderswo im Schlaf. Zeit für Warnmeldungen oder Evakuierungsmaßnahmen war nicht geblieben. 2.500 Bewohner des Vajon-Tals starben am Ende in den Fluten, fünf Ortschaften wurden ausra-diert. Der Damm selbst blieb merkwür-digerweise unbeschadet.

erreicht schließlich einer dieser Lahars die 74 Kilometer vom Explosionskrater entfernt gelegene Stadt Armero und begräbt sie unter einer dicken Schlamm- und Geröllschicht. 22.000 Menschen kommen bei dieser Katastrophe ums Leben. Eine Katastrophenwarnung hatte es nicht gegeben.

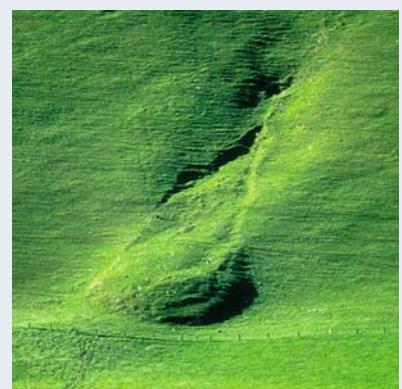
Szenenwechsel. Nicaragua im Jahr 1998. Starke Regenfälle im Gefolge des Hurrikans „Mitch“ lösen in der Region um den Vulkan Casitas eine meterhohe Schlamm- und Geröllawine aus, die donnernd ins Tal schießt. Sie begräbt fünf ganze Dörfer unter sich und kostet mindestens 7.000 Menschenleben. Entstanden waren die am instabilen Hang des Feuerbergs gelegenen Siedlungen, weil in den sicheren Ebenen kein Platz für die Kleinbauern und Arbeiter war. Nicht immer sind die Folgen von Massenbewegungen so verheerend wie in dem kleinen Staat in Mittelamerika oder in Kolumbien. Beim langsamsten Vorgang – dem Bodenkriechen – neigen sich beispielsweise nur Zäune oder Masten und es verziehen sich Gebäude ohne Fundament. Kommen dagegen tatsächlich weite Bereiche ins Gleiten, wandern alle darauf stehenden Gebäude huckepack mit abwärts. Diese Talfahrt kann ohne große Folgen bleiben, wenn der Hang in sich stabil bleibt. Bewegt sich aber der Untergrund schneller und zerfällt in einzelne Blöcke, werden die betroffenen Häuser oder Industrieanlagen zerstört.

Auch alles, was größeren Bergrutschten oder Felsstürzen im Weg steht – Menschen, Autos oder Straßen – wird mitgerissen oder verschüttet. Solche Naturereignisse riegeln gelegentlich sogar ganze Täler ab und stauen Flüsse oder Bäche zu neuen Seen. Gelingt es dem eingespernten Wasser, sich einen Weg durch die Geröllmassen zu bahnen, drohen talabwärts Flutwellen. Besonders gefürchtet sind zudem Muren. Diese gefährlichen Ströme aus Wasser, Erde und Gesteinschutt bilden sich bei plötzlichen, starken Regenfällen oder während der Schneeschmelze. Meist fließen sie schnell in bereits vorhandenen Rinnen wie Wildbächen oder Lawinen ruckartig oder in einer gleichmäßigen Bewegung zu Tal. Dort angekommen, können diese Schlammströme Wege, Siedlungen oder Land dem Erdboden gleichmachen.

Nie wieder Erdrutsche? Die Natur hat die besten Hilfsmittel

Viel haben Forscher und Ingenieure mittlerweile ausprobiert, um Bevölkerung und Natur in gefährdeten Gebieten vor Erdrutschten zu schützen. Das Repertoire, das den Wissenschaftlern dabei zur Verfügung steht, um die Schäden möglichst gering zu halten, ist vielfältig. Billiger und langfristig vielversprechender ist es aber – da sind sich Geologen und Politiker einig – solche Gebiete gänzlich von der Besiedlung auszunehmen. In vielen Regionen der Welt wird deshalb eine weitere Bebauung der erdrutschanfälligen Gebiete gezielt verboten oder stark reglementiert. Geologische Kartierungen oder die Auswertung zurückliegender Ereignisse unterstützen die Verantwortlichen dabei, solche Zonen festzulegen. Ein Vorbild dabei könnte vielleicht Japan sein. Das Land in Fernost ist fast überall äußerst gebirgig oder zumindest stark hügelig. Deshalb schreibt die Regierung gezielt vor, welche Gebiete siedlungspolitisch genutzt werden dürfen, und bestimmt auch

Bodenkriechen ist die langsame Massenbewegung: Nur wenige Millimeter bis Zentimeter pro Jahr wandert der Boden hangabwärts. © Harald Frater





An engen Schluchten oder von Auswaschung bedrohten Bächen werden querliegende Holzstämme als Schutzverbauung eingesetzt.
© Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

die erforderlichen Baukonstruktionen. Forschung, Beobachtung und Aufklärungskampagnen unterstützen diese Vorschriften. Ergebnis: Seit 1958, dem Beginn des Erdrutsch-Überwachungsprogramms, haben sich dort die Zahl der Todesopfer und die Sachschäden deutlich reduziert. Aber schon heute leben unzählige Menschen in erdrutschgefährdeten Gebieten. Welche Möglichkeiten gibt es, diese vor solchen Extremereignissen zu schützen? Vielerorts versuchen Wissenschaftler und Techniker, durch Aufforstungen, Entwässerungsmaßnahmen oder Stützmauern die Situation in den Griff zu bekommen. Je nach Beschaffenheit des Hangs und des Untergrunds können dabei sowohl technische als auch biologische Methoden genutzt werden. So können an engen Schluchten oder von Auswaschung bedrohten Bachbetten querliegende Holzstämme als Schutz dienen. Sie halten den Boden fest und verhindern, dass er weiter abgetragen wird.

Der vielleicht effektivste natürliche Schutz vor einem Erdrutsch ist aber nach Ansicht von Experten eine dichte Bewaldung. Deshalb beginnt man zunehmend damit, von Kahlschlag bedrohte Hänge wieder aufzuforsten. Bis die frischen Anpflanzungen allerdings wieder genauso gut abschirmen wie der ursprüngliche Wald, vergehen einige Jahre oder Jahrzehnte. Dem Problem der Staunässe – einem der Hauptauslöser von Erdrutschen – versuchen die Wissenschaftler dagegen mit moderner Technik Herr zu werden. Ausgeklügelte Drainagesysteme leiten das Wasser ab und verhindern so, dass größere Erdmassen in Bewegung geraten.

Warnung vor der Katastrophe

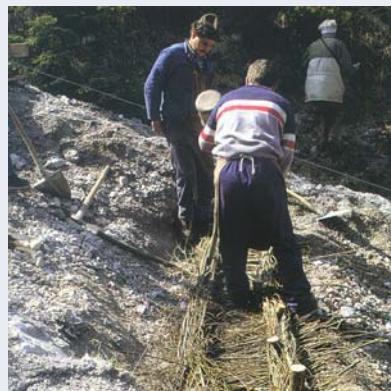
Alle diese Maßnahmen haben aber ihre Grenzen: Die „Riesen“ unter den Erdrutschen, bei denen sich Millionen Kubikmeter Fels, Erde und Geröll auf einmal lösen, lassen sich durch solche Methoden nicht aufhalten. Deshalb überwacht man beispielsweise in Europa oder den USA mithilfe modernster Technik besonders gefährdete Hänge. Die Resultate verschiedener Messinstrumente, darunter Regenmesser, Bodenmikrofone und Sensoren für eine Porendruckmessung, sollen darüber Auskunft geben, ob sich ein Erdrutsch anbahnt oder nicht.

Oft zeigen sich in den Hängen schon vor einem solchen Ereignis beispielsweise langsame Bewegungen des Erdreichs oder Gesteins, die mit mechanischen oder elektronischen Dehnungs- und Neigungsmessern gemessen werden können. Einfache Faustregeln, ab wann die Bewegung einen kritischen Wert erreicht, gibt es allerdings (noch) nicht. Bis ein sicher funktionierendes Frühwarnsystem zur Verfügung steht, wird es daher noch eine Weile dauern. Erst wenn alle grundlegenden Phänomene, die während eines Erdrutschs eine Rolle spielen, endgültig bekannt sind, kann es letztlich einen besseren Schutz der Menschen in den gefährdeten Gebieten geben. Wie nötig so ein „Hang-Checker“ sein könnte, zeigt ein Blick in die Zukunft. Die fortschreitende Bevölkerungsexplosion gerade in den Entwicklungsländern wird dazu führen, dass auch in den nächsten Jahrzehnten nahezu jeder zur Verfügung stehende Hang für Siedlungen genutzt wird. Und selbst in den industrialisierten Ländern ist es fraglich, ob potenzielle Bauherren künftig darauf verzichten werden, erdrutschgefährdete Gebiete zu

bebauen. Zu verlockend ist häufig das Panorama dieser Landstriche, zu schnell werden ehemalige Erdrutschkatastrophen in der Region und die damit verbundenen Gefahren aus dem Bewusstsein der Menschen verdrängt. Aber nicht nur die Anzahl der Menschen, die von Erdrutschen bedroht werden, steigt weiter an, noch ein anderes Schreckgespenst lauert bereits im Hintergrund. Kommt es in Zukunft wirklich zu der vorhergesagten Zunahme an schweren Unwettern als Folge des Klimawandels –, so die Befürchtung der Geologen – wird es schon bald so viele verheerenden Erdrutsche geben wie niemals zuvor. Die Wissenschaftler berufen sich dabei unter anderem auf Erdrutschforschungen, die schon vor etlichen Jahren in Kalifornien stattgefunden haben. Im Rahmen der sintflutartigen Regenfälle nach dem El-Niño-Wetterphänomen von 1997 gab es dort entlang der nordkalifornischen Küstenkette von Big Sur bis Mendocino eine unglaubliche Zahl an Schlamm- und Gerölllawinen. 18.000 dieser Extremereignisse sollen damals in kürzester Zeit aufgetreten sein. Wie die Forscher nachweisen konnten, kam es dabei ab einer bestimmten vorausgesagten Regenfallschwelle in der Tat zu einem extrem gehäuften Auftreten solcher Massenbewegungen. Ähnliche Resultate bei den geologischen Untersuchungen anderer Erdrutschserien haben diese Beobachtungen bestätigt.

Hinzu kommt: Die für das 21. Jahrhundert prognostizierten deutlich wärmeren Winter unter anderem in Mitteleuropa werden in den Gebirgen noch eine andere bedrohliche Entwicklung in Gang setzen. So wird sich die Grenze des dauerhaft gefrorenen Bodens – Permafrost – beispielsweise in den Alpen in immer höhere Lagen zurückziehen. Nach Schätzungen der Klimaforscher könnten sogar bereits um 2050 die meisten alpinen Permafrostböden für immer verschwunden sein. Das Problem dabei: Der abschmelzende Permafrost setzt gewaltige Mengen von Schutt und Lockermaterial frei. Sobald das Eis als „Kitt“ verschwunden ist, hat die Erosion hier ein leichtes Spiel. Bei Unwettern und starken Regenfällen können sich dann ganze Schuttpakete von den Flanken der Hänge lösen und zu zerstörerischen Schlammlawinen werden. Schon jetzt gehen Experten davon aus, dass ein Drittel aller Muren in den Alpen durch die bisherige Erwärmung der Atmosphäre verursacht wird.

Links: Hangsicherung in erdrutschgefährdeten Abschnitten. Mitte: Die Entwässerung des Untergrunds durch Drainagerohre soll Staunässe verhindern. Rechts: Aufforstung ist eine effektive Schutzmaßnahme. © Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit; California Department of Water Resources





Lawinen – der weiße Tod

Schneebrettlawinen sind extrem gefährlich, da sie einen Druck von 30 bis 40 Tonnen pro Quadratkilometer entwickeln können.
© Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Jedes Jahr das gleiche Bild: Kaum ist die Wintersportsaison in vollem Gange, ist auch für die Lawinen Hochsaison. Immer wieder verschüttet die weiße Pracht ganze Ortschaften und fordert unzählige Todesopfer. Der „weiße Tod“ kostet jedes Jahr hunderte von Menschen das Leben, die meisten von ihnen Skifahrer oder Bergwanderer. Unter allen tödlichen Unfällen, die sich in den Bergen ereignen, ist die Hälfte auf Lawinen zurückzuführen.

Lawinen existieren, seit es Berge gibt. Sie sind in allen Hochgebirgen anzutreffen und nicht zu vermeiden. Besonders oberhalb der Baumgrenze gehören sie zu den normalen Prozessen der Natur. Die meisten von ihnen verlaufen ohne jeden Schaden für Menschen oder Siedlungen. Jährlich gehen weltweit etwa 25.000 größere Lawinen zu Tal, ungezählte kleinere bleiben weitgehend unbemerkt. Zur Naturgefahr wurden Lawinen erst, als die Menschen anfingen, die Gebirgsregionen zu besiedeln und zu durchqueren.

Schon Hannibal soll bei seiner legendären Alpenüberquerung im Jahr 218 v. Chr. die Hälfte seiner Truppen durch eine Lawine verloren haben und auch Napoleon erging es nicht besser. Während früher vor allem Reisende und einige wenige waghalsige Siedler gefährdet waren, ist mit zunehmender Besiedlung lawinengefährdeter Regionen und Hänge das Risiko von Lawinenabgängen mit kata-

strophalen Folgen gewachsen. Heute kostet „der weiße Tod“ jedes Jahr hunderte von Menschen das Leben. Allein in der Schweiz sterben jährlich zwischen 20 und 60 Menschen im Schnee. Unter allen tödlichen Unfällen, die sich in den Bergen ereignen, ist die Hälfte auf Lawinen zurückzuführen. Lawinenwarnungen während der Wintersaison und Lawinenschutzmaßnahmen an gefährdeten Hängen sollen die Gefahr von Menschen und Siedlungen fernhalten, doch ganz verhindern lassen sich Lawinenkatastrophen bis heute nicht.

Lawinenrettung: der Tod wartet nur 15 Minuten

Plötzlich ist die Bergidylle zerstört: Wo vorher noch eine stille weiße Schneelandschaft war, stürzt donnernd und tobend eine Schneemasse zu Tal. Jetzt ist es für Flucht meistens schon zu spät, der überraschte Skifahrer oder Bergwanderer wird von der Lawine erfasst und mitgerissen. Ob ein Mensch eine Lawine überlebt oder nicht, hängt entscheidend davon ab, wie er sich während der Lawine im Schnee verhält, welche Ausrüstung er hat und wie schnell er gerettet werden kann. Statistiken zeigen, dass die Chance, mit dem Leben davonzukommen, für Lawinenopfer in den ersten 15 Minuten sehr groß ist – vorausgesetzt sie gehören nicht zu den unglücklichen fünf Prozent, die noch vor Stillstand der Lawine tödlich verletzt werden.

Wenn das Lawinenopfer vollkommen von den Schneemassen verschüttet ist, läuft die Zeit: Bei der Suche nach dem im Schnee Begrabenen zählt jede Minute. Denn sehr schnell wird der Sauerstoff knapp. Die meisten Opfer erstickten nach 15 bis 35 Minuten, wenn sie keine luftgefüllte Atemhöhle unter dem Schnee haben. Nach 90 bis 130 Minuten jedoch kommt meist jede Hilfe zu spät: Die Verschütteten sterben an Unterkühlung und Sauerstoffmangel. Statistiken des Schweizer WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF zeigen, wie entscheidend der Faktor Zeit für das Überleben einer Lawine ist: Von 473 Totalverschütteten überlebten 31 Prozent derjenigen, die direkt durch Zeugen des Unglücks gerettet wurden. Musste erst eine Rettungsmannschaft angefordert werden, sank die Überlebensrate auf nur noch elf Prozent.

Entsprechend wichtig ist das Verhalten der Einzelnen: Früher wurde oft empfohlen, sich durch Schwimmbewegungen so lange wie möglich an der Oberfläche der Schneemassen zu halten und mit Hilfe der Hände einen Hohlraum vor Mund und Nase zu schaffen. Allerdings sind solche Versuche nicht selten erfolglos. Erheblich wirkungsvoller sind daher technische Hilfsmittel wie Lawinen-Airbags oder Lawinenpiepser, die eine schnelle Bergung ermöglichen. Die Lawinen-Airbags sind im Prinzip nichts weiter als ein bis zwei in einen Rucksack integrierte Kunststoffballons, die im Falle eines Lawinenabgangs durch Ziehen einer Reißleine aufgeblasen werden. In wenigen Sekunden füllen sie sich mit 150 Litern eines Stickstoff-Luft-Gemisches und werden zu einem über den Schultern liegenden Kragen. Durch das Luftpolster wird einerseits die Dichte des Menschen, die normalerweise die Schneedichte weit übertrifft, verringert – der Verschüttete wird leichter und sinkt nicht so rasch in die Tiefe der Schneemasche. Weitau-

*Immer wieder begraben Lawinen Häuser oder ganze Ortschaften unter meterhohen Schneemassen.
© Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit*







Kriechlawinen sind so langsam, dass ihre Bewegung in der Regel kaum zu sehen ist, sie „schleichen“ zu Tal. Dennoch stehen sie den „normalen“ Lawinen in ihrer Zerstörungskraft kaum nach. Kriechschnee kann Bäume entwurzeln, Felsblöcke aus dem Boden wuchten und sogar massive Gebäude von ihren Fundamenten drücken.



Lockerschneelawinen entstehen vor allem in trockenem, kaltem Neuschnee, aber auch bei extrem durchnässten Schneedecken. Der nur wenig verfestigte Schnee verliert an einer punktförmigen Abrissstelle plötzlich den Halt und stürzt zu Tal. Erst auf ihrem Weg bergab gewinnt die Lockerschneelawine größere Breite.



Schnaubrettlawinen gehören nicht nur zu den häufigsten und am besten untersuchten Lawinen, sie sind auch extrem gefährlich: Innerhalb weniger Sekunden reißt die Schneedecke auf und eine ganze Schneeschicht rutscht gleichzeitig ab. Sie kann einen Druck von 30 bis 40 Tonnen pro Quadratmeter entwickeln und in Extremfällen wurden auch schon Werte von 100 Tonnen pro Quadratmeter gemessen.



Staublawinen beginnen meist als Fließlawine mit trockenem, wenig verfestigtem Schnee. Durch Luftturbulenzen an der Spitze wird der Schnee aufgewirbelt, fein zerstäubt und rast mit hoher Geschwindigkeit bergab. Mensch und Tier können in dem mit Staudräcken bis zu drei Atmosphären umherwirbelnden Schneestaub regelrecht ertrinken. Sie sind durch punktförmige Abrissstellen gekennzeichnet.

Lawinen sind nicht alle gleich. Welcher Typ sich entwickelt, ist vor allem von der Schnee- und Geländebeschaffenheit und dem Wetter abhängig. © Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

*Links: Für die Lawinenforschung wurde im Schweizer Vallée de la Sionne diese Staublawine durch Sprengung ausgelöst.
© WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF*

wichtiger aber ist ein zweiter Effekt: Der Airbag vergrößert das Volumen, das der Skifahrer einnimmt. In der Lawine entmischen sich die vielen einzelnen Schneebrocken unter dem Einfluss der Schwerkraft, größere Teilchen werden dabei nach oben gespült, kleinere nach unten gezogen. Durch den Airbag wird der Verschüttete zu einem größeren „Brocken“ und bleibt daher eher oben. Wie erfolgreich dieses Hilfsmittel ist, ergab eine Auswertung des WSL-Institut für Lawinenforschung SLF in Davos: Innerhalb von zehn Jahren registrierten die Forscher 120 Fälle aus ganz Europa, in denen Lawinenopfer mit dem Airbagsystem ausgerüstet waren. Von diesen überlebten 114 Personen – das entspricht 95 Prozent und damit einem weitaus höheren Anteil Geretteter als ohne Airbag.

Ebenfalls am Rucksack befestigt ist der noch eher ungebräuchliche „Avalanche Ball“, ein zusammengefalteter Luftsack, der sich im Lawinenfall aufbläst. Wie eine Boje soll der an einer längeren Schnur befestigte Ball dann an der Oberfläche der Schneemassen schwimmen und so Rettern die Position eines Verschütteten anzeigen. Auch die Lawinenrettungstruppen greifen heute vor allem auf technische Hilfsmittel zurück. Während früher der Lawinensuchhund in Kombination mit Schneesonden fast die einzige Chance war, einen Verschütteten zu finden, helfen heute Peilgeräte oder das Lawinen-Verschütteten-Suchgerät (LVS) bei der Ortung.

Wird ein Verschütteter dann tatsächlich noch lebend gefunden, kann er jedoch auch noch nachträglich an den Folgen von Luftmangel und Unterkühlung sterben. Die Bergretter müssen deshalb so rasch wie möglich die Atemwege des Überlebenden vom Schnee befreien und ihn, falls nötig, künstlich beatmen. Für die Mediziner beginnt jetzt der Kampf gegen die Unterkühlung. Ist der Überlebende noch bei Bewusstsein, werden ihm heiße, gesüßte Getränke – ohne Alkohol – eingeflößt, um den Körper von innen her aufzuwärmen.

Der Bernhardiner mit dem Rumfässchen um den Hals ist zwar legendär – hat aber mit der Realität nichts zu tun. Mit Windschutz und speziellen Wärmedecken vor weiterer Auskühlung geschützt, werden die wichtigsten Verletzungen notdürftig verarztet, bei Bewusstlosen die Wiederbelebungsmaßnahmen so lange fortgesetzt, bis der Rettungshubschrauber oder ein Motorschlitten den Verletzten ins nächste Krankenhaus bringt.

Wann entsteht eine Lawine?

Warum aber kommt es überhaupt zu Lawinen? Und warum nur in bestimmten Gebieten? Letztlich entstehen Lawinen aus der Wechselwirkung von mehreren natürlichen Faktoren wie Gelände, Wind, Schneedeckenaufbau, Neuschneemenge und Temperatur. Entscheidend für die Lawinenbildung ist dabei vor allem die Schnee- und Wetterlage des Gebietes. Prinzipiell ist jeder größere Schneefall lawinenträchtig und umso gefährlicher, je mehr der Wetterablauf von der „normalen“ Wetterlage abweicht. Aber auch die Geländeform hat einen – wenn auch weniger entscheidenden – Einfluss.

Vorhersagen über die Lawinen-gefahr basieren auf regelmäßigen Untersuchungen, wie beispielsweise die Bestimmung der Kornform oder die Temperatur in einer Schneeschicht.

© Harald Frater



Die Lawinengefahr steigt mit zunehmender Hangneigung. Als besonders kritisch gelten Neigungen zwischen 35 und 50 Grad. Ist ein Hang flacher, entwickeln sich innerhalb der Schneedecke nur schwache Zug- und Scherkräfte, Lawinen sind dabei eher selten. Aber auch hier gibt es Ausnahmen: Über einer glatten Harschschnee- oder Felsunterlage oder einer Bergwiese mit langem Gras können auch schon bei 17 bis 24 Grad Lawinen abgehen. An Steilhängen mit mehr als 50 Grad Hangneigung bleibt der Schnee gar nicht erst lange liegen, sondern gleitet in kleinen Schneerutschen ab. Der typische Lawinenhang ist steil, schattig, kammnah und gefüllt mit frischem Triebsschnee.

Je mehr Neuschnee gefallen ist, desto größer wird die Lawinengefahr. Besonders kritisch ist dabei immer der erste schöne Tag nach einer Schlechtwetterperiode. Das Gewicht des frischen Neuschnees kann für eine in der Schneedecke liegende instabile Schicht zu hoch sein. Bricht sie zusammen, wird sie für die darüber liegenden Schichten zur Rutschbahn und eine Lawine geht ab. Wenn bei Schneefällen Wind herrscht, wird der Schnee aufgewirbelt und in Windschattenhängen abgelagert. Solche so genannten Triebsschneeanansammlungen bilden oft Schneewächten an Bergkämmen und bergen ebenfalls erhöhte Lawinengefahr. Bereits zehn bis 20 Zentimeter Neuschnee innerhalb von drei Tagen führen bei ungünstigen Bedingungen zu einem markanten Anstieg der Schneebrettgefahr. Durch das Gewicht der Schneedecke entstehen gewaltige Scherkräfte, denen die verschiedenen Schneeschichten oft nur eine ungenügende Festigkeit entge-

*Das am SLF entwickelte Snow-MicroPen ist in der Lage, auch feinste Schichten innerhalb der Schneedecke zu erkennen.
© WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF*



Jahr	Land	Ereignis
2002	Nordossetien	Die rund 1.000 Meter hoch liegende Karmadon-Schlucht ist ein beliebtes Naherholungsgebiet der Hauptstadt Wladikawkas. Am 20. September 2002 wird sie zur tödlichen Falle, als sich eine Lawine löst und ein Bergdorf unter sich begräbt. 125 Menschen sterben, der obere Teil der Schlucht ist seither in eine Gletscherebene verwandelt.
1999	Österreich	Im österreichischen Skiorort Galtür im Paznauntal begräbt eine Lawine mehr als 50 Menschen und zerstört zahlreiche Häuser des Ortes. Wegen der anhaltenden Lawinengefahr und starker Schneefälle müssen tausende von Urlaubern aus dem Tal evakuiert werden. 38 Menschen sterben in den Schneemassen.
1998	Teheran, Iran	Mehr als 200 Lawinen innerhalb einer Woche ereignen sich im Januar 1998 auf der Straße zwischen Teheran und der Stadt Mashad. Eine davon begräbt einen Bus und mehrere Autos unter sich, tötet 32 Menschen und verletzt mindestens 80. 35 Autos werden bis in ein benachbartes Tal mitgerissen.
1998	Thanggu, Indien	Starke Winde lösen im Südosten Indiens eine Lawine aus, die mindestens 19 Menschen tötet. Die Schneemassen treffen ein Militärlager, in dem sich zur Zeit des Unglücks 100 Soldaten aufhalten. Das Lager war in 4.250 Metern Höhe an einer Bergflanke errichtet worden. Starker Schneefall behinderte die Rettungsarbeiten.
1997	Tadschikistan	46 Menschen sterben im November 1997 in einer Lawine auf dem Anzob-Pass in Tadschikistan. Die Lawine begräbt 15 Lastwagen und Autos unter einer zwölf Meter dicken Schneeschicht. Von den insgesamt 50 Verschütteten können nur noch vier lebend geborgen werden.
1997	Afghanistan	In Nordafghanistan stürzt eine Lawine auf den Salang-Highway und tötet mindestens 100 Menschen. Die Lawinenopfer sind unterwegs zur nächsten Busstation, als sich die Schneemassen unter Donnern lösen und alles unter sich begraben.
1996	Kashmir, Pakistan	Eine Lawine begräbt das Bergdorf Kala Lot im pakistansch besetzten Kashmir unter sich und zerstört sieben Häuser und tötete mindestens 35 Menschen. Das Gebiet im Neelum-Tal wurde bereits früher häufig von Erdrutschen und Lawinen heimgesucht.
1995	Katmandu, Nepal	Eine Lawine verschüttet ein Bergsteigercamp unterhalb des Mount Everest, 83 Menschen können noch gerettet werden, 26 Bergsteiger und Träger sterben.
1991	Bayerische Alpen	Zwischen dem 16. und 20. Februar 1991 ereignen sich im bayerischen Alpenraum 20 Lawinenunfälle. Dabei werden insgesamt 27 Skifahrer von Lawinen mitgerissen, sieben von ihnen sterben.
1970	Val d'Isère, französische Alpen	Am 10. Februar 1970 ereignet sich ein Lawinenunglück im beliebten Skigebiet Val d'Isère. 39 Menschen sterben in den Schneemassen.
1962/1970	Huascaran, Peru	Vom Gipfelgletscher des nördlich von Lima gelegenen Huascaran lösen sich am 10. Januar 1962 rund drei Millionen Kubikmeter Eis und Schnee. Nach fast 1.000 Metern freiem Fall trifft die gewaltige Masse auf dem Boden auf und wird zu einer Schne- und Schlammlawine mit einem Volumen von fast 13 Millionen Kubikmetern. Sie zerstört die im Tal gelegene Stadt Ranrahica und sechs Dörfer und tötet 4.000 Menschen. 1970 wiederholt sich das Unglück als Folge eines Erdbebens.
1965	Wallis, Schweiz	Von dem oberhalb einer Staudammbaustelle liegenden Gletscher Allalin im schweizer Kanton Wallis reißen auf einer Breite von mehreren hundert Metern Eismassen ab und stürzen auf die im Tal liegenden Wohn- und Werkbaracken der Baustelle. 88 Menschen sterben.
1954	Blons, Vorarlberger Alpen	Am 11. Januar 1954 rast eine Lawine direkt in den Ort Blons. Noch während Rettungsteams die 118 Verschütteten bergen wollen, folgt eine zweite Lawine, die nun auch einen Großteil der Bergungstruppen unter sich begräbt. 55 Menschen können nicht mehr lebend gerettet werden.
1950/51	Gesamter Alpenraum	Lang anhaltende Schneefälle mit Schneezuwachsen von zum Teil mehr als einem Meter innerhalb von 24 Stunden lösen im Winter 1950/51 im gesamten Alpenraum ungewöhnlich viele Lawinen aus. Am 11. Februar 1951 trifft die Vallascia-Lawine das Dorf Airolo im Tessin, 18 Wohnhäuser werden zerstört, zehn Menschen sterben. Insgesamt kommen in diesem Winter fast 300 Menschen durch Lawinen ums Leben, allein in der Schweiz entsteht ein Sachschaden von fast 18 Millionen Franken.

gensetzen können. An einem Lawinenhang genügen meistens kleine zusätzliche Belastungen, zum Beispiel das Gewicht eines einzelnen Wintersportlers, um das Gleichgewicht zu zerstören und eine Lawine auszulösen. Tiefe Temperaturen nach Schneefällen verzögern die Verfestigung der Schneedecke und erhöhen dadurch die Lawinengefahr. Aber auch steigende Temperaturen können das Lawinenrisiko erhöhen, denn sie lassen die Schneedecke aufweichen. Im Frühjahr erhöht sich die Lawinengefahr im Laufe des Tages mit zunehmender Erwärmung und Sonneneinstrahlung.

Den Lawinen auf den Grund gegangen

Doch auch wenn die Risikofaktoren inzwischen gut bekannt sind, Lawinen bergen noch so manches Geheimnis: So ist beispielsweise nach wie vor ungelöst, was eigentlich beim Abgang einer Lawine in der Schneedecke passiert. Wissenschaftler, unter anderem vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, suchen darauf eine Antwort. Sie nehmen dabei den Schnee ganz genau unter die Lupe und röntgen kleine Schneeproben mit einem Computertomographen. Aus den dabei entstehenden exakten dreidimensionalen Bildern können die Forscher die Kräfte und Spannungen bestimmen, die zwischen den einzelnen Schneekörnern herrschen. Diese sind der springende Punkt bei der Lawinenbildung: Wenn sie die Schneekörner nicht mehr zusammenhalten können, rutscht die Schneedecke als Lawine ab.

Wie schnell Lawinen sind, welche Kräfte in ihnen herrschen, wo sie Schnee mitreißen und wieder ablagern, sind ebenfalls wichtige Fragen, mit denen sich die Wissenschaftler beschäftigen. Das SLF betreibt dazu sogar eine eigene Versuchsanlage im Vallée de la Sionne (Kanton Wallis), in der sehr große Lawinen künstlich ausgelöst und ganz genau vermessen werden können. Die Forscher überwachen die Lawine von einem Bunker, der etwas erhöht am Gegenhang steht – bei besonders großen Versuchslawinen müssen die Beobachter von ihren Kollegen anschließend ausgegraben werden. Leider sind Versuche im Vallée de la Sionne aber nur wenige Male pro Winter möglich, und zwar immer dann, wenn es in kurzer Zeit sehr viel geschneit hat. Die aus den Beobachtungen gewonnenen Erkenntnisse fließen in Computersimulationen, welche für die Gefahrenzonenplanung eingesetzt werden: Wo ist es so gefährlich, dass gar nicht gebaut werden darf? Wo nur mit Auflagen, zum Beispiel mit verstärkten Wänden? Vergleiche zwischen den Lawinenwintern 1951 und 1999 belegen, dass im Lawinenschutz in den letzten fünfzig Jahren große Fortschritte erzielt wurden: So verloren beispielsweise noch 1951 fast 100 Personen bei Lawinenniedergängen in der Schweiz ihr Leben, 1999 „nur“ drei Dutzend – und das bei vergleichbaren Wetterbedingungen und obwohl der Alpenraum inzwischen viel intensiver genutzt wird. Da in höheren Lagen der Gebirge Schnee mehr als die Hälfte des Jahres die Landschaft dominiert, interessieren die Lawinенforscher auch die Interaktionen zwischen Schnee, Naturgefahren und der Natur. Sie untersuchen beispielsweise, was Lawinenniedergänge für Pflanzen bedeuten, wie ein optimaler Schutzwald aussieht oder wie Tiere – seien es Steinböcke oder Schneearlgen – mit dem Schnee zureckkommen.

Untersuchung der Schneebeschaffenheit zur Einschätzung der Lawinengefährdung.
© Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit



Rechts: Suche nach Verschütteten bei der Lawinenkatastrophe von Galtür. © Österreichisches Bundesheer

Verbauung von Stahlnetzen in den Gefährdungsbereichen sind ein aufwändiger, jedoch wirksamer Schutz gegen Lawinen.
© Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit



Schadensbegrenzung: Bauwerke gegen den Schnee

Während früher viele Bergtäler im Winter menschenleer und von der Außenwelt abgeschnitten waren, bringt heute der Skitourismus tausende von Menschen über gut ausgebauten Zufahrtsstraßen und Bahnlinien noch in die entlegenste Bergregion. Jahrhundertelang haben die Bergbewohner mit der „weißen Gefahr“ zu leben gelernt und ihre Höfe und Siedlungen nur an sicheren Orten errichtet, heute sind auch lawinengefährdete Gebiete mit Ferienhäusern und Hotels dicht bebaut.

Spätestens die Tragödie von Galtür im österreichischen Paznauntal im Frühjahr 1999 hat gezeigt, dass Lawinen für solche Siedlungen eine extreme Bedrohung darstellen können. Trifft eine herabstürzende Lawine auf ein Gebäude, halten die Außenwände dem enormen Druck der Schneemassen meist nicht Stand. Der Schnee reißt die Häuser mit sich oder dringt in das Innere ein. Schneebrettlawinen entwickeln dabei einen Druck von bis zu 100 Tonnen auf einen Quadratmeter. Aber selbst die extrem langsamen Kriechlawinen sind in der Lage, massive Gebäude von ihren Fundamenten zu drücken. Bei dem Unglück von Galtür wurden mehr als 50 Menschen unter dem Schnee begraben und zahlreiche Häuser des Ortes zerstört. Tausende von Urlaubern mussten evakuiert werden. Gehen Lawinen in unbewohnten Waldgebieten nieder, können sie auch dort erheblich Schäden anrichten. Der Wald bietet zwar einen natürlichen Schutz vor Lawinen, da Bäume zumindest kleinere Schneemassen aufhalten können. Dennoch werden jedes Jahr viele Hektar forstwirtschaftlicher Nutzfläche vernichtet. Die Bahnen häufiger Lawinenabgänge lassen sich oft auch im Sommer erkennen. In den Lawinengassen innerhalb eines Waldes findet man kaum Bäume, sondern nur Krüppel und Jungwuchs.

In den meisten Alpenländern sind Lawinenrisikogebiete heute in so genannten „Gefahrenzonenplänen“ erfasst. Der Neubau in diesen Zonen ist verboten. Die bereits bestehenden Siedlungen und Gebäude jedoch sind immer noch bedroht. Als Folge ist der Aufwand, der für Lawinenabwehr und Schutzvorrichtungen getrieben werden muss, in den Alpenregionen heute enorm. Die Experten unterscheiden dabei zwischen kurz- und langfristigem Lawinenschutz. Bei den kurzfristigen Maßnahmen reagiert man auf eine akute Lawinengefahr. Die Bildung einer Lawine wird nicht verhindert, sondern zum Teil sogar unter kontrollierten Bedingungen selbst ausgelöst. Schutz ist hier in erster Linie passiv und beinhaltet das Sperren von Straßen und Skipisten, Evakuierungen oder die Verbreitung von Lawinenwarnungen. Im Gegensatz dazu will langfristiger Lawinenschutz Lawinen aktiv verhindern oder zumindest bremsen oder ablenken. Massive Verbauungen aus Beton, Barrikaden aus Stahlstangen und Netze aus Drahtseilen sollen gefährdete Siedlungen schützen und an den Hängen den Schnee am Gleiten hindern. Massive Betonfundamente oder im Fels verankerte Halterungen sollen der Wucht des Schnees trotzen. Die Kosten für solch aufwändige Lawinenschutzmaßnahmen sind allerdings hoch: Allein in der Schweiz wurden seit 1950 1,2 Milliarden Franken für Lawinenschutzmaßnahmen ausgegeben. Auch aus diesem Grund setzt man

Drei Tiefs und viel Schnee – der Lawinenwinter 1999

Von Karsten Schwanke: Es schneit – immer noch – und das schon seit 48 Stunden. Ununterbrochen, ohne Pause. Die Schneehöhe auf der Bergstraße muss inzwischen auf über einen Meter angewachsen sein. Es ist nicht so leicht auszumachen, wo sich der Weg befindet: Die Sicht beträgt nur wenige Meter, der starke Wind fegt den Schnee fast waagerecht über die Erde. Hinter den Häusern türmen sich die Schneewehen schon bis zum Dach hinauf. Seit gestern Abend hängen wir in unserem Wetterbüro im Appenzellerland in der Schweiz auf 1.150 Metern Höhe fest. Haben die Nacht oben auf dem Berg verbracht, in unseren Büros auf Pritschen geschlafen. Gegen Mittag, vor einer halben Stunde, kam der Bauer mit seinem Traktor und einer Schneefräse. Wir wollen runter, ins Tal, und kleben nun mit unseren Autos direkt hinter ihm. Normalerweise brauchen wir für die zwei Kilometer ins Dorf keine zehn Minuten. Heute wird es fast eine Stunde. Unser Ziel ist der kleine Supermarkt am Dorfplatz: einmal Lebensmittel bunkern und zurück. Wir müssen uns beeilen, denn der Sturm weht die Bergstraße in wenigen Minuten wieder zu. Der Schnee fliegt direkt über die Motorhaube hinweg. Es dauert nicht lange, und das Auto kommt ins Schlingern. Wühlt sich mit letzter Kraft nach oben. Wir sitzen fest. Trotz Schneeketten und Allradantrieb. Beim nächsten Versuch kommen wir 20 Meter weiter, aber dann ist endgültig Schluss. Die Straße ist erneut dicht. Wir holen Schaufeln, versuchen, den Schnee unter unseren Autos wegzubekommen, aber es nützt alles nichts. Drei festgefahrene Autos sind zu drei runden Schneehaufen geworden. In nur fünf Minuten. Wir stapfen durch den Schnee zu einer Hütte, warten auf den Traktor, der uns nach und nach rauszieht. Eine weitere Nacht verbringen wir in unseren Büros ... Der Lawinenwinter im Februar 1999 war selbst für Meteorologen ein außergewöhnliches Ereignis. An so viel Schnee konnten sich selbst die ältesten Dorfbewohner nicht erinnern. Auf manchen Bergen lagen mehr als acht Meter. Auf der Straße zur Schwägalp (1.350 Meter), einem Pass am Säntis, waren noch Ende April die Schneewände am Straßenrand mehr als fünf Meter mächtig. Ausgelöst wurde der Extremsschneefall durch eine sehr stabile Nordwestwetterlage. Über drei Wochen lang strömten die Luftmassen aus Nordwest ziemlich direkt vom Nordmeer in Richtung Alpen. In dieser Strömung haben sich



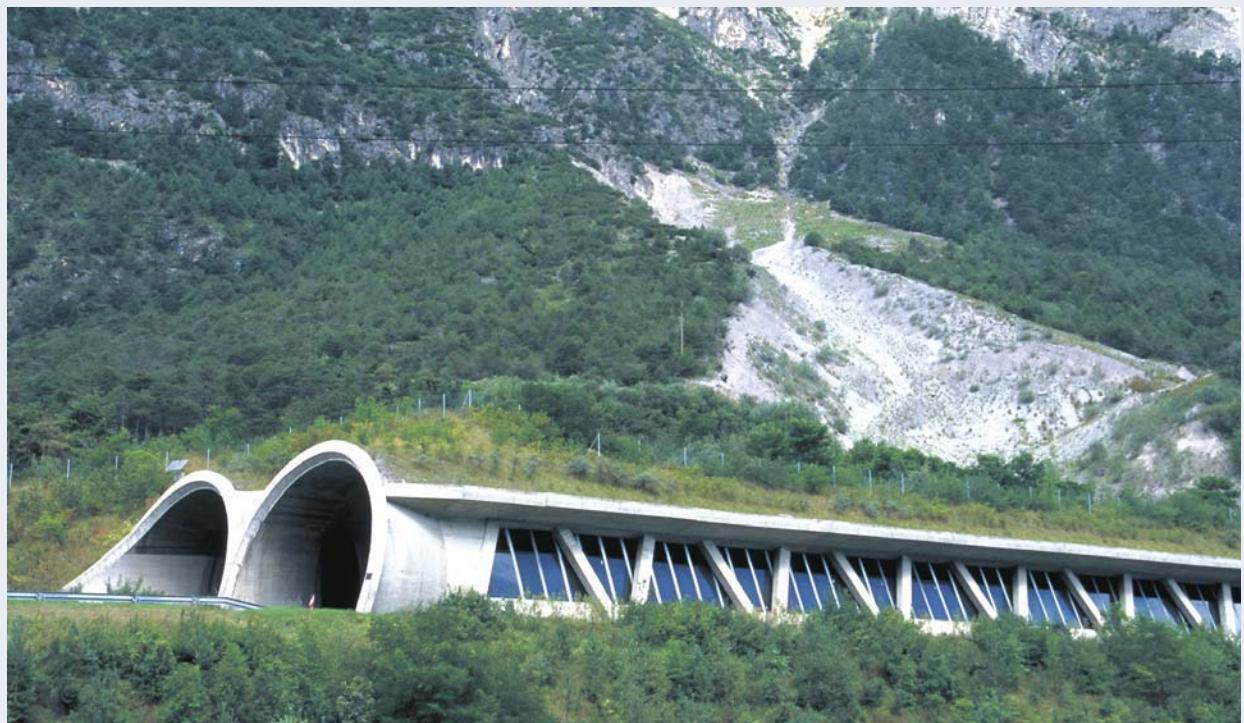
immer wieder kleinere Tiefdruckgebiete eingelagert, die sich jeweils vor Island – über dem warmen Golfstrom – mit reichlich Feuchtigkeit versorgt hatten. Drei besonders schneereiche Tiefs zogen mit dieser Nordwest-Höhenströmung im einwöchigen Abstand auf die immer gleichen Berge zu: Zwischen Berner Oberland – Ostschweiz/Graubünden –, Vorarlberg und Tirol fiel der mit Abstand meiste Schnee. Tiefs im Hochwinter sind flache Gebilde, reichen manchmal nur vier bis fünf Kilometer hoch. Deshalb können sie auch nicht über die Alpen überspringen. Sie verschwinden erst, wenn sie sich fast vollständig aufgelöst haben, die ganze Feuchtigkeit in Form von Regen oder Schnee aus ihnen herausgefallen ist. Und so fiel aus jedem dieser drei Nordmeertiefs bis zu zwei Meter Schnee. Die Lawinengefahr blieb über Tage und Wochen hinweg extrem hoch – es herrschte mehrmals für mehrere Tage die höchste Stufe 5 – „sehr groß“. Ein Großteil der bis zu fünf Meter hohen Lawinenschutzgitter war unter den Schneemassen regelrecht verschwunden. Manche Lawinen rasten über diese Verbauung hinweg – andere lösten sich an Hängen, an denen seit Jahrhunderten keine Lawinenabgänge beobachtet worden waren. Viele Verkehrswege im gesamten Alpenraum waren unterbrochen und ganze Talschaften über Tage hinweg von der Außenwelt abgeschnitten. Bei den drei verheerendsten Lawinenniedergängen kamen im französischen Chamonix und im schweizerischen Evolène jeweils zwölf sowie in Galtür in Österreich 31 Menschen ums Leben.

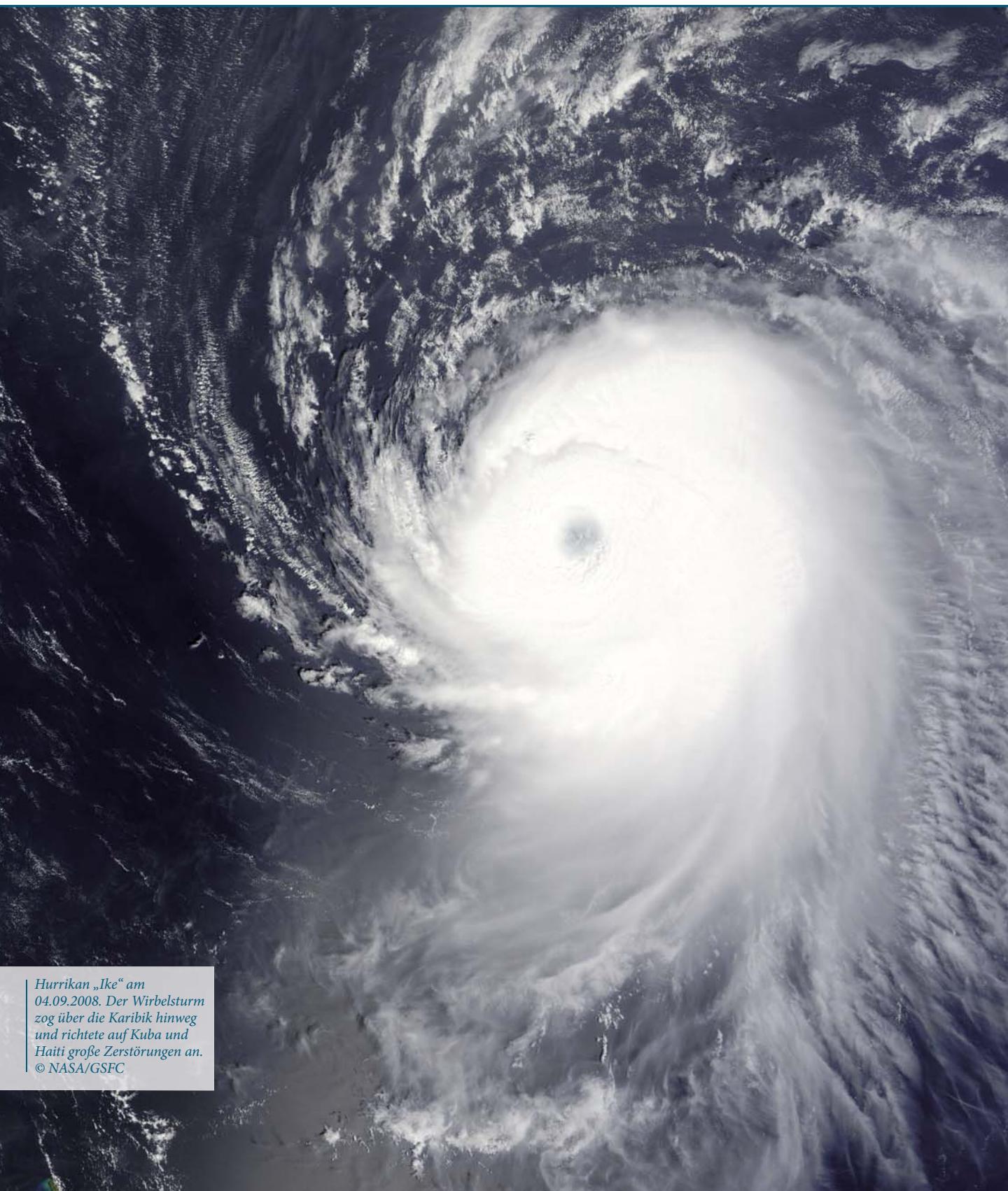


heute wieder verstkt auf natürlichen Lawinenschutz durch Bergwler. Der Wald stellt nicht nur den billigsten, sondern auch den besten und wirksamsten Schutz dar, unter bestimmten Bedingungen ist er jeder baulichen Maßnahme haushoch überlegen. Allerdings ist die Wiederaufforstung nicht ganz einfach. Gerade an sehr exponierten Hängen haben die eingesetzten Baumarten nicht nur unter Wind, Kälte und oft auch Wassermangel zu leiden, die noch jungen Bäume missen auch bis zu einem gewissen Alter durch zusätzliche Schutzbauten vor Kriechschnee und Lawinen geschützt werden.

Zustztig zu den langfristigen Lawinenschutzmaßnahmen geben Lawinenwarndienste wärend der Wintersaison mehrmals täglich aktuelle Lawinenbulletins und -warnungen heraus. Messstationen überwachen kontinuierlich die Wetter- und Schneebedingungen an ausgewählten Standorten und ermöglichen so den Schne- und Lawinenforschern eine Einschätzung der Lawinengefahr. Neben den aktuellen Lawinenlageberichten erstellen Lawinenforscher auch längerfristige Lawinengefahrenkarten. Mithilfe von Lawinenchroniken, Satellitenmessungen, Analysen der klimatischen Verhältnisse und der speziellen Hangeigenschaften berechnen sie die Lawinenwahrscheinlichkeit für verschiedene Gebiete und teilen sie in Gefahrenzonen ein. Diese Lawinengefahrenkarte hilft nicht nur den Kommunen bei der Entscheidung über neue Lawinenschutzmaßnahmen oder eine eventuelle Sperrung von gefährlichen Hängen, sie dient auch als Grundlage für die Genehmigung neuer Haus- oder Straßenbauprojekte.

Lawinengitter im Gipfelbereich (links oben) und im Wald (links unten) sollen Lawinen im Vorfeld vermeiden. Lawinengalerien (unten) schuten hauptsächlich Verkehrsadern. © Harald Frater





Hurrikan „Ike“ am
04.09.2008. Der Wirbelsturm
zog über die Karibik hinweg
und richtete auf Kuba und
Haiti große Zerstörungen an.
© NASA/GSFC



Stürme und Fluten

Die Kraft von Wind und Wasser

Wirbelstürme, Tornados und auch die Winterstürme unserer Breiten hat es schon immer gegeben und wird es immer geben. Sie sind ganz normale Bestandteile unseres globalen Wettersystems. Angesichts der großen Schäden, die diese Stürme immer wieder anrichten, fällt es uns Menschen allerdings manchmal schwer, dies zu akzeptieren.

Doch nicht nur der Wind kann für verheerende Schäden anrichten – auch das Element Wasser ist längst nicht immer nur Lebensspender und Lebensgarant. Ganz im Gegenteil: Immer, wenn die Pegel der Flüsse neue Rekordwerte anzeigen oder gewaltige Wassermassen auf die Küsten der Erde „zurollen“, ist Gefahr im Verzug – für Mensch und Natur.



Winterstürme – tobende Winde der mittleren Breiten

Diese Wolke bedeutet nichts Gutes: Sie bringt Sturm. Die Aufnahme entstand unmittelbar vor einem „Supercellstorm“ in den USA. © NASA

Sie tragen Namen wie „Kyrill“, „Jeanett“ oder „Wiebke“, erstrecken sich über hunderte von Kilometern und hinterlassen eine Spur der Verwüstung – Winterstürme. Innerhalb von wenigen Stunden brechen die tobenden Tiefdruckwirbel scheinbar aus dem Nichts über Europa herein. Den betroffenen Gebieten bleibt kaum eine Chance, sich gegen sie zu rüsten.

Die Windgeschwindigkeiten im Inneren eines solchen Tiefdruckwirbels sind zwar geringer als die ihrer tropischen Verwandten, der Hurrikans, doch in puncto Wanderungsgeschwindigkeit können diese ihnen kaum das Wasser reichen: Bis zu 2.000 Kilometer am Tag legt ein „ausgewachsener“ Wintersturm zurück. Und auch die Auswirkungen unserer Winterstürme sind nicht weniger verheerend als die der Hurrikans:

Bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 180 Stundenkilometern knicken jahrhundertealte Bäume um wie Streichhölzer, Dächer segeln durch die Luft und ganze Landstriche versinken in Dunkelheit und Kälte, weil Strom und Telefonleitungen unterbrochen sind. Konzentriert auf nur einen Quadratmeter, rammen extreme Böen jedes Hindernis mit der Wucht einer halben Tonne – kaum etwas hält da noch stand. Nicht weniger dramatisch sind die Folgen auf dem Meer: Der Winddruck kann meterhohe Wellen auftürmen und sie Richtung Küste schieben. 1962

nimmt ein Sturmtief aus Neufundland Kurs auf Skandinavien und treibt gewaltige Wassermassen auf Hamburg zu. 15 Prozent der Stadt versinken am Ende in den Fluten.

Nicht selten haben große Stürme sogar den Lauf der Geschichte entscheidend geprägt und verändert. So zum Beispiel der große Orkan im Sommer 1588: Ohne ihn sähen unsere Landkarten und Geschichtsbücher heute vermutlich ganz anders aus. Denn er manövrierte die spanische Armada auf ihrem Weg nach England besser aus, als es jeder Admiral hätte tun können: Der starke Wind zwang die schweren, nur bedingt sturmtauglichen Galeonen der Spanier, an der französischen Küste vor Calais Schutz zu suchen. Und genau dies wurde ihnen zum Verhängnis: Wie auf einem Tablett waren sie dort den Engländern unter Sir Francis Drake ausgeliefert, die sich mit ihren leichteren, seetüchtigeren Schiffen durch den Sturm gewagt hatten. Die Schlacht gewann Drake, die spanische Armada war verloren.

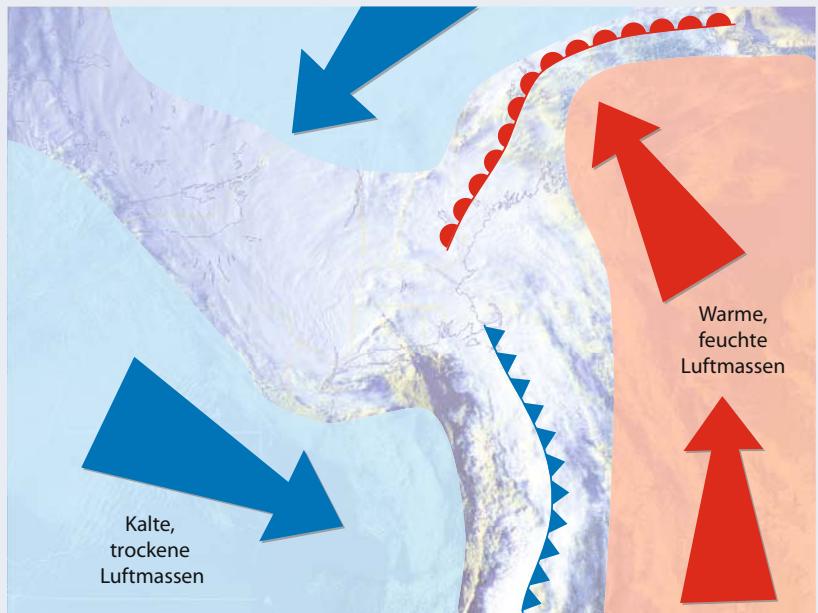
Wie entstehen Winterstürme?

Glattes Meer, weit und breit kein Land in Sicht – scheinbar harmlos präsentiert sich das Gebiet mitten im Nordatlantik, irgendwo zwischen Island und den Azoren. Doch der Schein trügt: Diese Meeresidylle ist die Sturmküche Europas. Hier entstehen so entfesselte Wirbel wie „Lothar“ oder „Kyrill“ und machen sich auf ihren Weg nach Osten, mitten hinein in das Herz Europas.

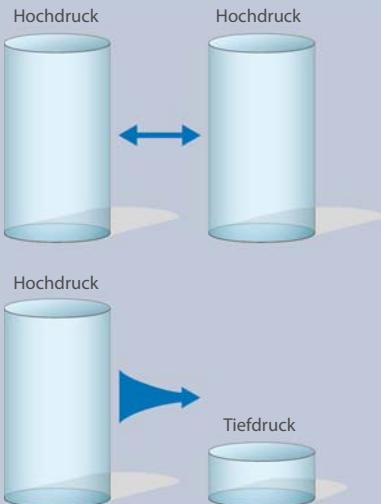
Schuld daran ist ein Aufeinandertreffen der Gegensätze: Kaltluft gegen Warmluft, Hochdruck gegen Tiefdruck. Im Herbst und Winter, wenn die Sonne sich rar macht, wird es kalt im Norden. Und die niedrigen Temperaturen lassen den Luftdruck sinken: Wie eine klamme, feuchtkalte Decke überzieht die polare Luftmasse die Nordhalbkugel. Bis südlich von Island reicht die Winterkälte. Im Süden dagegen, nahe dem Äquator, herrscht nach wie vor angenehmes Badewetter. Warmer Luft steigt hier auf und macht sich, angetrieben von den globalen Luftströmungen, auf den Weg nach Norden. Dabei erhält sie durch die Erddrehung und die dabei wirkende Corioliskraft einen „Spin“, sie wird nach Osten abgelenkt.

Irgendwo zwischen Island und den Azoren ist es dann soweit: Die Richtung Nordosten heranströmende Tropenluft trifft auf die dichte kalte Polarluft. Diese ist, ebenfalls abgelenkt durch

Ein Sturmtief entsteht beispielsweise, wenn sich feuchtwarme Luftmassen nach Norden und trockene, kalte Luftmassen nach Süden bewegen. Dort, wo sie sich begegnen, erzeugen die Luftdruckunterschiede starke Winde, die entgegen dem Uhrzeigersinn um das zentrale Tiefdruckgebiet wehen. © NOAA/MMCD NEW MEDIA



Wie entstehen Wind und Stürme?



Je stärker der Luftdruck, desto stärker der Wind.

© MMCD NEW MEDIA

Unsere Atmosphäre verharrt nie in einem Ruhezustand, sondern ist ständig in Bewegung. Von erdumspannenden Luftströmungen bis hin zum lokalen Phänomen des Berg-Tal-Winds werden alle diese Strömungen durch einen Motor angetrieben: dem Bestreben nach Ausgleich. Weil Erdoberfläche und Atmosphäre nicht überall gleich warm oder kalt sind, bilden sich Bereiche unterschiedlichen Luftdrucks. Die Luft strömt immer vom hohen zum tiefen Druck und gerät so in Bewegung, Wind entsteht. Er ist einer der Motoren unseres Klimasystems.

Wann aber wird der Wind zum Sturm? Das geschieht immer dann, wenn die Unterschiede von Temperatur und Luftdruck besonders groß sind. Je steiler der so genannte Gradient, also je geringer der Abstand zwischen den beiden Extremen, desto stärker wird der Wind. Er strebt nach schnellem Ausgleich. Auf den Wetterkarten kann man die Luftdruckdifferenzen und damit indirekt auch die Stärke des Windes an der Lage der Isobaren ablesen. Liegen diese Linien gleichen Luftdrucks nah beisammen, herrschen große Druckunterschiede auf kleinem Raum und die Windgeschwindigkeit ist meist hoch. Ist der Isobarenabstand dagegen groß, weht der Wind meist nur schwach.

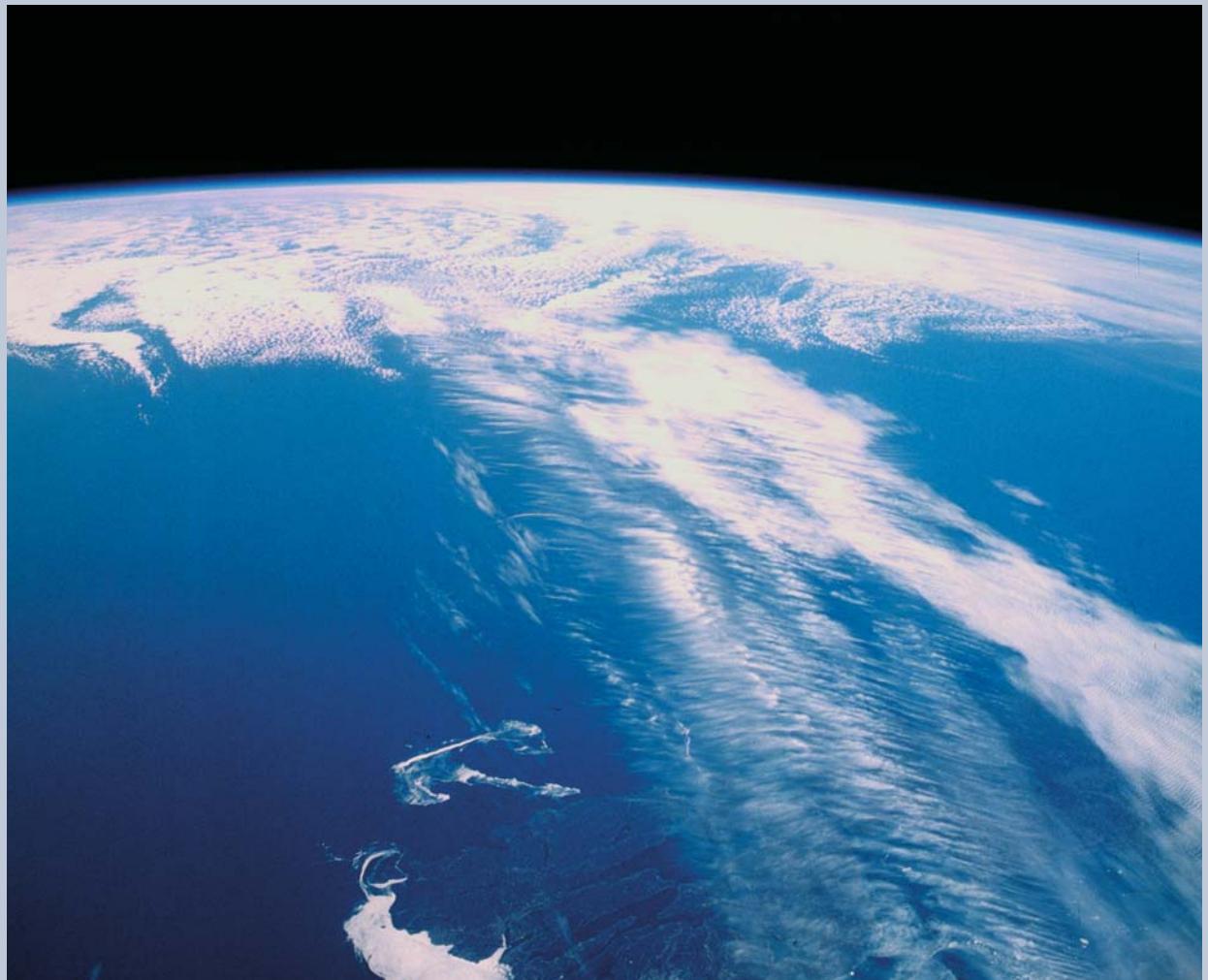
Weit oben über der Erde, in den höheren Atmosphärenschichten, sind starke Winde normal. Sie gehören zu den festen Strömungsmustern des irdischen Klimasystems. Je nach Lage wehen sie konstant in eine Richtung und prägen damit auch das Wetter der unter ihnen liegenden Regionen. So steuert einer dieser so genannten Strahlströme oder „Jetstreams“ in unseren Breiten die Zugbahnen von Hoch- und Tiefdruckgebieten: Stabil zwischen dem 40. und 60. Breitengrad liegend, weht er mit bis zu 600 Kilometern pro Stunde aus Westen und treibt dabei die Druckgebiete mit sich. Der Luftverkehr nutzt die Strahlströme oft als „Autobahnen“ der Lüfte. So fliegen Flugzeuge von den USA nach Europa bewusst in Höhe des Strahlstroms, um mit diesem Rückenwind ihr Flugziel schneller zu erreichen.

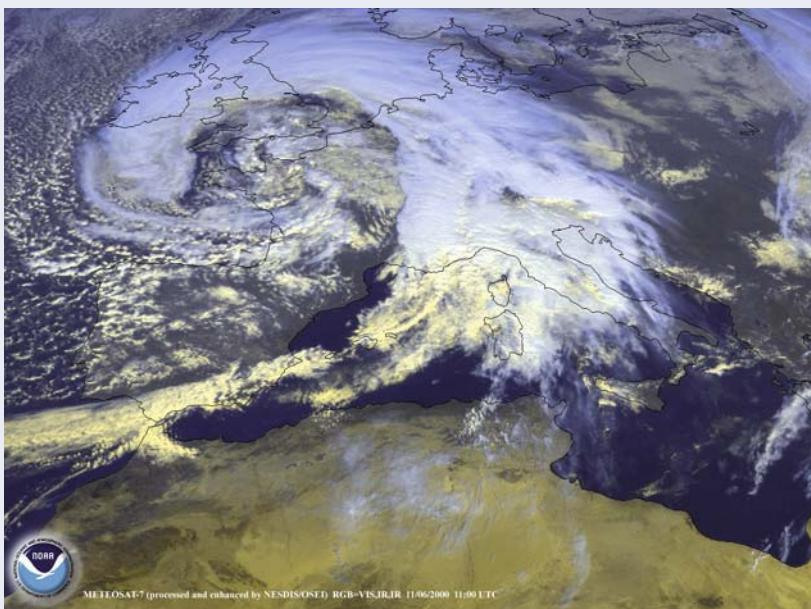
Ganz anders aber sieht es aus, wenn starke Winde weiter unten, in den tieferen Atmosphärenschichten auftreten. Denn dann wird es gefährlich. Diese Winde sind es, die Herbst- und Winterstürme in unseren Breiten, aber auch die Wirbelstürme der Tropen antreiben. Bereits bei Windstärke 9 und Windgeschwindigkeiten um die 80 Kilometer pro Stunde können die Stürme bereits kleinere Schäden an Gebäuden anrichten. Die höchsten Windgeschwindigkeiten am Boden werden in Tornados erreicht. In Einzelfällen wurden dabei sogar schon bis zu 700 Kilometer pro Stunde gemessen. Ihre Gewalt kann Häuser förmlich explodieren lassen. Entsprechend dramatisch sind häufig die Verwüstungen, die diese „wirbelnden Winde“ hinterlassen. Stürme geben aber auch den entscheidenden Anstoß für eine bessere Verarbeitung von Wetterdaten. Im Jahr 1854 zog ein Sturm mit Windstärke 11 über das Schwarze Meer nach Nordosten, vernichtete zahlreiche

Handelsschiffe und große Teile eines Armeelagers vor Sewastopol. Die Flotten der Türkei und ihrer englisch-französischen Verbündeten wurden von dem Sturm vollkommen überrascht.

In der hinterher vom französischen Kaiser Napoleon III. (1808 bis 1873) angeordneten Untersuchung wurde sehr schnell klar, dass der Sturm nicht urplötzlich entstanden war, sondern das Tief schon vorher existiert hatte. Mithilfe aktueller Wetterdaten und der damaligen telegrafischen Verbindung zur Krim hätte die Armee zumindest rechtzeitig gewarnt werden können. Diese Erkenntnis trug in der Folge zur Entwicklung einer systematischen Wetterbeobachtung bei.

Ein Jetstream steuert in unseren Breiten die Zugrichtung der Tiefdruckgebiete. Das Starkwindband kann Windgeschwindigkeiten von 600 Kilometern pro Stunde erreichen. © NASA/JSC





Dieses Sturmsystem brachte im November 2000 schwere Überschwemmungen nach England, Irland und Frankreich. Sechs Menschen starben. © NOAA

die Eddrehung, auf direktem Konfrontationskurs, denn sie zieht es nach Südosten. Das Resultat ist vorprogrammiert: Beide Luftmassen prallen aufeinander, eine Front entsteht. Da keiner ausweichen kann, schiebt sich die leichtere Warmluft über die dichtere, kalte Polarluft. Dabei wird sie, angetrieben durch die Corioliskraft, weiter Richtung Nordosten abgedrängt. Als Folge beginnt die Luftmassengrenze Wellen zu schlagen, an einigen Stellen gerät das Frontalgebiet sogar ins Trudeln. Langsam beginnt sich dann das Luftmassenkarussell zu drehen und der Luftdruck sinkt.

Aus dem All sind jetzt bereits erste Warnzeichen erkennbar: Ein riesiger, kommaförmiger Wolkenwirbel bildet

sich und nimmt immer mehr an Größe zu. Gleichzeitig beginnt er sich zu drehen, langsam zwar, aber deutlich sichtbar. Im Zentrum dieser Drehbewegung sinkt der Luftdruck weiter ab. Der Tiefdruckkern saugt noch mehr kalte Luft an, immer schneller strömen jetzt die Luftmassen, die Windgeschwindigkeiten nehmen zu. Auf mehr als 1.000 Kilometer ist der Wolkenwirbel inzwischen angewachsen. Und jetzt beginnt er zu wandern: Im wahrsten Sinne des Wortes im „Sturmschritt“ rasen die wirbelnden Luftmassen Richtung Osten, Richtung Mitteleuropa. Die Strecke Paris–Moskau ist für sie manchmal gerade mal eine Tagesreise.

Dabei sind Winterstürme nur selten Einzelkämpfer. Im Gegenteil: Mit Vorliebe suchen sie Europa gleich rudelweise heim. Im Winter 1999/2000 überzogen beispielsweise gleich drei schwere Stürme innerhalb von nur wenigen Tagen Europa: Am 3. Dezember 1999 bildete „Anatol“ den tosenden Auftakt. Er raste mit Windstärke zwölf und Windgeschwindigkeiten von mehr als 180 Stundenkilometern über Großbritannien, Dänemark und Schweden hinweg. Die Folge war unter anderem ein neuer dänischer Naturkatastrophen-Schadensrekord von mehr als zwei Milliarden Euro. Doch kaum hatte sich Nordeuropa erholt, folgten dicht hintereinander am 26. und 27. Dezember schon die nächsten beiden Rudelmitglieder: „Lothar“ und „Martin“. Sie übertrafen „Anatols“ Schadensbilanz noch einmal um gut das Dreifache.

Sturmserien wie diese entstehen besonders häufig in milden Wintern. Denn in sehr kalten Wintern sorgt ein Hochdruckgebiet über dem Osten Europas nicht nur für Schnee und Eis, es wirkt auch als Schutzwall: Wie ein Riegel schiebt es sich zwischen Europa und Atlantik. Als Folge werden die von Westen heranziehenden

Luftmassen, und damit auch die Sturmtiefs, blockiert und abgelenkt. In milden Wintern aber fehlt dieses Schutzhoch – und Europa ist den einfallenden Stürmen schutzlos ausgeliefert.

Genau diese Situation könnte uns jedoch in Zukunft häufiger blühen. Denn mit dem Klimawandel nehmen auch die milden Winter in Europa zu, Schnee wird immer seltener. Fehlt aber die kühlende Schneedecke in Mitteleuropa, kann das Kältehoch nicht so weit nach Westen vorstoßen – der atmosphärische Sturmwall fehlt. Und nicht nur das: Die Stürme, die zu uns gelangen, bringen zukünftig auch mehr Regen mit sich, denn die immer wärmer werdende Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen. Vollgesogen wie ein Schwamm strömt diese feuchte Warmluft dann in unsere Breiten und entlädt hier ihre gesamte Wasserfracht in sintflutartigen Regengüssen. Schon jetzt haben Untersu-

Die schon vor 150 Jahren entwickelte Beaufort-Skala beschreibt in 13 Stufen die typischen Merkmale der unterschiedlichen Windstärken. Die Skala wurde später noch um die Angabe der Windgeschwindigkeiten ergänzt.

Beaufort	Bezeichnung	m/s	km/h	Merkmale auf See	Merkmale an Land
0	Windstille	0–0,2	0–1	Glattes Wasser	Rauch steigt senkrecht empor, Flaute
1	Leiser Zug	0,3–1,5	1–5	Gekräuseltes Wasser	Rauch zeigt Windrichtung an, sehr leichte Brise
2	Leichter Wind	1,6–3,3	6–11	Aufgerauhtes Wasser	Blätter und Windfahnen bewegen sich
3	Schwacher Wind	3,4–5,4	12–19	Mäßige Wellen, keine weißen Schaumkronen	Zweige bewegen sich
4	Mäßiger Wind	5,5–7,9	20–28	Erste weiße Schaumkronen, Wellen bis zu einem Meter hoch	Dünne Äste bewegen sich
5	Frischer Wind	8,0–10,7	29–38	Voll entwickelte Schaumkronen	Mittlere Äste bewegen sich, kleine Laubbäume schwanken
6	Starker Wind	10,8–13,8	39–49	Mittlere See, Wellenkämme brechen, Wellenhöhe bei 3 m	Dicke Äste bewegen sich
7	Steifer Wind	13,9–17,1	50–61	Große See, Schaumstreifen in Windrichtung, Wellen bis zu 4 m hoch	Ganze Bäume schwanken
8	Stürmisches Wind	17,2–20,7	62–74	Große See, Wellen 5,5 m hoch, Gischt beginnt zu fliegen	Zweige brechen von den Bäumen ab
9	Sturm	20,8–24,4	75–88	Voll entwickelter Seegang mit langen Wellenkämmen, Schaum auf den bis zu 7 m hohen Wellen	Kleinere Schäden an Häusern, hebt Dachziegel ab, bricht Äste
10	Schwerer Sturm	24,5–28,4	89–102	Hoher rollender Seegang, Wellen bis zu 9 m, Gischt färbt Wasseroberfläche weiß	Entwurzelt Bäume, beschädigt Häuser
11	Orkanartiger Sturm	28,5–32,6	103–117	Bis 11 m hohe Wellen, fliegende Gischt	Verbreitete Sturmschäden
12	Orkan	> 32,6	> 117	14 m und höher brechende Wellen, fliegende Gischt, kaum Sicht	Wirft Bäume und freistehende leichte Gebäude um, schwere Sturmschäden an Gebäuden

chungen in den USA, Europa und Australien gezeigt, dass sich die Niederschlagsmuster verändern. Und in Mitteleuropa drohen immer häufiger trockene Sommer und milde, dafür um so nassere Winter.

An den Statistiken der Meteorologen ist bereits ablesbar, dass die Zahl der Orkantiefs, die über dem Atlantik entstehen, sowie der Anteil an Westwetterlagen seit den 1970er Jahren bis etwa 1990 zugenommen haben. Neuere Klimamodelle deuten zudem darauf hin, dass sich die Wiege der Stürme, die Polarfront zwischen Island und den Azoren, allmählich weiter nach Osten verlagert. Sie rückt damit langsam, aber sicher immer näher an das europäische Festland heran. Die Folge: Künftig könnten „meteorologische Bomben“ wie „Lothar“ noch schneller über Mitteleuropa hereinbrechen. Die ohnehin durch diese Überraschungsgäste leidgeprüften Meteorologen hätten dann kaum noch eine Chance, eine Sturmwarnung herauszugeben. Geschweige denn so rechtzeitig, dass Schutzmaßnahmen getroffen werden können.

Verwüstungen in ganz Europa - die Auswirkungen

Links: Winterstürme legen regelmäßig ganze Wälder um; das Ausmaß der Verwüstung hier nach „Kyrill“. Mitte: Ein Wintersturm zerstörte diese Autowracks in Kalifornien. © Public domain; FEMA/John Shea

In der Nacht vom 18. auf den 19. Januar 2007 brach einer der verheerendsten Winterstürme seit langem über Europa herein: „Kyrill“. Mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 150 Kilometern pro Stunde zog er über Deutschland und weite Teile Mitteleuropas hinweg. Nach 24 Stunden hatte er eine wahre Schneise der Verwüstung geschlagen. 49 Menschen waren gestorben und Sachschäden von mehr als zehn Milliarden Euro entstanden.



Winterstürme wie „Lothar“ oder „Kyrill“ haben in den vergangenen Jahren in Europa immer wieder ganze Landstriche verwüstet, Wälder und Küstenorte zerstört und Schäden in Milliarden- Euro- Höhe angerichtet. Sie treffen in Europa auf besonders dicht besiedelte und hoch industrialisierte Regionen und entsprechend hoch sind die Zerstörungen. Und noch ein Faktor kommt zum Tragen: Winterstürme erreichen zwar mit 100 bis 150 Kilometern pro Stunde nicht so hohe Geschwindigkeiten wie tropische Wirbelstürme, dafür dringen sie jedoch weit ins Landesinnere vor. Die mit bis zu 1.500 Kilometern riesige Ausdehnung eines Sturmtiefs kann ein ganzes Land in Mitleidenschaft ziehen. Je nach Orientierung von Hängen und Tälern können die Landschaftsformen den Wind zusätzlich verstärken und kanalisieren. Dies war auch im Jahr 1999 bei „Lothar“ der Fall, bei dem die Luft über Süddeutschland zwischen dem Tiefzentrum über dem Rhein-Main-Gebiet und den Alpen wie durch eine Düse gepresst wurde.

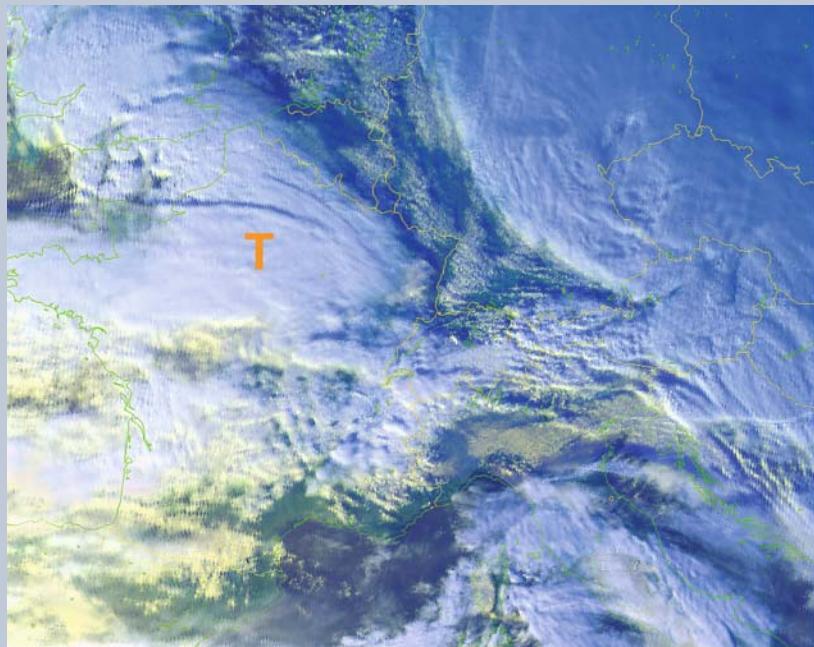
Wie viel Schaden ein Wintersturm dann tatsächlich anrichtet, ist jedoch nicht nur von seiner Windgeschwindigkeit abhängig. Auch die Dauer der Windeinwirkung, die Windrichtung und die Turbulenz innerhalb des Sturmes spielen eine wichtige Rolle. So entstehen viele Schäden erst nach längerer Sturmdauer: Zermürbt durch die Vielzahl von „Windangriffen“, ermüdet das Material und bricht schließlich. Bläst der Wind nicht stetig aus einer Richtung, sondern „springt“ und bringt zudem noch starke Böen mit sich, dann ist dies für viele Bauwerke, aber auch die Natur fatal: Denn die Bäume mit ihrem Wurzelwerk sind auf so schnelle Wechsel der Belastung nicht eingestellt.

Rechts: Im Januar 2005 raste ein Wintersturm über Kalifornien hinweg, der beträchtlichen Schaden anrichtete. Dieses Haus wurde durch einen umstürzenden Baum beschädigt.

© FEMA/John Shea



„Lothar“: der Sturm, der aus dem „Nichts“ kam



Sturm „Lothar“ wütet über Mitteleuropa. © NASA

wochenlang ohne Strom. Doch es sind weniger die nackten Zahlen, die in Erinnerung bleiben, als vielmehr die Stärke und Heftigkeit, mit der der Orkan über die betroffenen Regionen hereinbrach – und viele überraschte. Letztlich war dies auch der Auslöser einer umfangreichen öffentlichen Diskussion über die Qualität der Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes.

Die Wetterkarten der Weihnachtsfeiertage 1999 waren geprägt von einem kolossalen Tiefdrucksystem, das sich von Island bis zur Nordsee erstreckte und relativ unentschlossen vor sich hin dümpelte. Dieses System („Karl“) mit Zentrum bei den Färöer-Inseln führte in Mitteleuropa (nördlich der Alpen) zu einer frischen Westströmung, die immer wieder mal Sturmstärke erreichte – und zwar über Tage hinweg. Auch in der Höhe war diese Westströmung sehr gut ausgeprägt. Das ständige Mäandrieren der Strömung war für Meteorologen nicht leicht zu erklären, weil kein eigentliches Hauptsturmfeld mit einer klaren Charakteristik auszumachen war, sondern ständig neue, kleine Wellen die Windgeschwindigkeit mal hier und mal da verstärkten. Dieses Problem hatten aber nicht nur die „Wetterfrösche“, sondern auch die Wetter-Computer, die immer dann, wenn sich kleinräumige Extremvarianten im Wettergeschehen ausbilden, Schwierigkeiten haben, diese Extreme zu berechnen. Oftmals fallen sie durchs Raster und werden nicht in ihrer endgültigen Vehemenz vorhergesagt.

Alle Menschen – auch meteorologisch nicht interessierte Zeitgenossen – werden sich an einige Extremwetterereignisse erinnern, die sie im Laufe ihres Lebens erlebt haben. In Norddeutschland dürfte vielen der arktische Winter 1978/79 im Gedächtnis geblieben sein, andere haben unter dem Hitzesommer 2003 gelitten – oder kennen alle Details des Tsunamis 2004, selbst wenn sie gar nicht davon betroffen waren.

In Baden-Württemberg, Bayern und der Schweiz fällt der Wintersturm „Lothar“ in diese Kategorie: Katastrophen, die man nie vergessen wird. Er hinterließ 1999 in Mitteleuropa mehr als 110 Tote und Schäden in Höhe von 11,5 Milliarden Euro, mehr als vier Millionen Haushalte waren teils

Das sind die Wetterlagen, bei der Erfahrung und Gespür eines Meteorologen wichtiger werden als die besten Computermodelle. Deshalb ist es gerade bei solchen Wetterlagen extrem wichtig, ständig ein Auge auf die aktuellen Veränderungen zu haben. Am 24. Dezember, zwei Tage vor „Lothar“, bemerkte ein Kollege von mir eine Wellenbildung für den 26. im Bereich nördlich der Alpen. Sie war nur auf einer einzigen Wetterkarte ansatzweise zu sehen – auf den anderen vier Modellen war dieses Randtief nicht auszumachen. Wir waren gewarnt und beobachteten diese kleine Delle von Stund‘ an immer aufmerksamer. Wir wussten: Wenn ein kleiner „Schnellläufer“ nördlich der Alpen vorbeizieht, presst er sozusagen die Luft zwischen sich und die Berge. Dadurch kommt es zu einer Art Düseneffekt – und zu extrem hohen Windgeschwindigkeiten – gerade am Alpenrand. Und genauso sollte es schließlich kommen.

Am Morgen des 26. Dezembers zeigten Satellitenbilder einen Wolkenwirbel, der einem tropischen Wirbelsturm nur wenig nachstand: Dieser Tiefdruckwirbel hatte fast so etwas wie ein „Auge“: „Lothar“ war da und fegte mit einem unglaublichen Tempo über Europa hinweg: Um 00:00 Uhr lag er noch vor der französischen Atlantikküste, um 18:00 Uhr hatte er bereits Polen erreicht. 2.000 Kilometer in nur 18 Stunden! „Normale“ Tiefdruckgebiete schaffen rund 1.000 Kilometer am Tag – wenn sie schnell sind. „Lothar“ zog mit seinem Tiefdruckzentrum von Luxemburg kommend über Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Sachsen hinweg. Der Luftdruck in seinem Zentrum lag während dieser Zeit zwischen 970 und 980 Hektopascal (hPa). Das sind beileibe keine Rekordwerte.

Erst die Kombination der enorm hohen Zuggeschwindigkeit in Verbindung mit dem Düseneffekt am Alpenrand führte zu den katastrophalen Auswirkungen. 272 Kilometer pro Stunde (km/h) waren am Ende der Spitzenwert – gemessen auf dem Hohentwiel bei Singen. Auf dem Wendelstein wurden 259 km/h, auf dem Zürcher Uetliberg 241 km/h registriert. Die schwierigen Vorhersage-Umstände bei „Lothar“ sollten in den deutschen Medien noch ein gewaltiges Nachspiel haben. Dem Deutschen Wetterdienst (DWD) wurde von privaten Wetterdiensten vorgeworfen, „Lothar“ komplett verschlafen oder zumindest Warnungen an die Bevölkerung nicht in adäquatem Maße herausgegeben zu haben. Ein Vorwurf, den der DWD nicht wirklich entkräften konnte. Schließlich wurde am 26. Dezember nachmittags, als das Hauptwindfeld den Schwarzwald bereits passiert hatte, noch immer vom Sturmtief „Karl“ gesprochen. Doch der ruhte sich da nur bräsig auf dem Nordatlantik aus.

Sturmbruch nach „Lothar“ im Bästenhardtwald bei Mössingen.
© Michael Fiegle/GFDL





Die enormen Schneefälle während eines Blizzards blockieren Straßen und Brücken.
© FEMA

Umgestürzte und unterbrochene Telekommunikations- und Stromleitungen sind besonders in ländlichen Gegenden häufige Folgen von Winterstürmen.
© SXC



Blizzards: Stürme mit Schnee und Eis

In Nordamerika werden Winterstürme, sofern sie von Schnee begleitet sind, als Blizzards bezeichnet. Sie sind gekennzeichnet durch starke Winde und Schnee, der die Sichtweite fast auf Null reduzieren kann. Blizzards entstehen beim Zusammentreffen von trockener Kaltluft aus dem Norden oder Nordwesten und feuchter Warmluft aus dem Golf von Mexiko.

Mächtige Schneeverwehungen unterbrechen dann Straßen und Eisenbahnlinien und schneiden ganze Gemeinden von der Außenwelt ab. Dächer werden durch die Schnee- und Eislast eingedrückt. Stromversorgung und Kommunikation sind oft unterbrochen, da die Freileitungen durch den Wind und den Schnee beschädigt werden. Unterkühlte Nebeltröpfchen frieren beim Kontakt mit Gegenständen an und bilden mächtige Eispanzer. Das Gewicht zerreißt Leitungen und bringt Strommasten zum Brechen. Auch Bäume stürzen unter der Last des Eises ein. Autofahrer werden auf den Straßen eingeschneit und erfrieren, wenn das Benzin ausgeht und die Heizung ausfällt. Wird einem Lebewesen der feine Schnee durch den Wind in die Lungen gepresst, kann er sogar zum Erstickern führen. Die Ostküste der USA erlebte im Februar 2003 den schwersten Schneesturm seit 150 Jahren. In kurzer Zeit fiel allein in Washington ein halber Meter Schnee, starker Wind sorgte an manchen Orten für meterhohe Schneeverwehungen. Dieser Sturm kostete mindestens 60 Menschen das Leben.

Machtlos gegen tobende Winde?

Einen Schutz vor ihnen gibt es nicht. Winterstürme lassen sich weder verhindern noch in ihrem Weg beeinflussen. Was bleibt, ist nur die Schadensbegrenzung - eine Maßnahme, an der nicht nur die Betroffenen, sondern vor allem auch die Versicherungen erhebliches Interesse haben. Denn immer, wenn irgendwo Bäume fallen, Dächer fliegen oder der Strom ausfällt, werden sie zur Kasse gebeten. Und dies nicht

selten in Milliardenhöhe. Kein Wunder also, dass Konzerne wie die Münchener Rückversicherungsgesellschaft erhebliche Gelder für die Erforschung von Stürmen und möglichen Gegenmaßnahmen ausgeben. Ihr Schwerpunkt liegt dabei vor allem auf der Entwicklung von Risikokarten: Mithilfe von Computermodellen und Klimasimulationen sollen diese zeigen, welche Regionen, beispielsweise in Deutschland, bei einem Wintersturm besonders gefährdet sind. Wer zukünftig in einer solchen Hochrisikozone baut, wird dann auch damit rechnen müssen, höhere Versicherungsbeiträge aufgebrummt zu bekommen.

Sturmchaos in Mitteleuropa – Orkan „Kyrill“

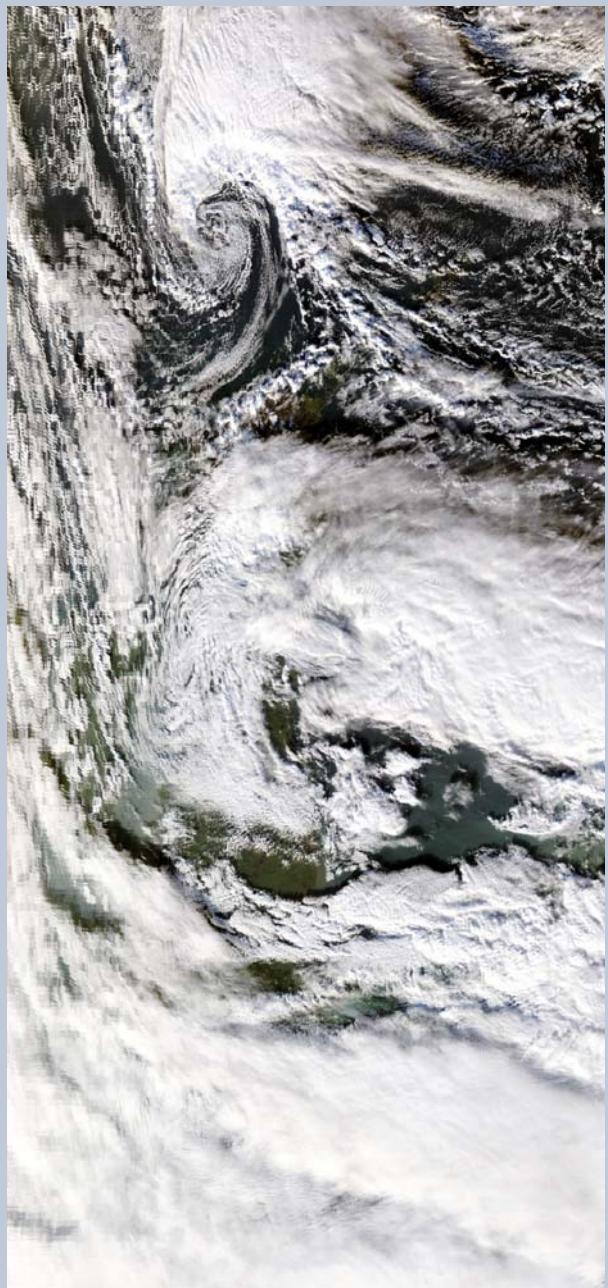
Es war ein Sturm der Superlative. Einer, wie er normalerweise höchstens alle zehn bis zwanzig Jahre vorkommt: In der Nacht vom 18. auf den 19. Januar 2007 zog das Orkantief „Kyrill“ von den britischen Inseln kommend mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 150 Kilometern pro Stunde (km/h) über Deutschland und weite Teile Mitteleuropas hinweg. Die stärkste Windböe hierzulande wurde am Wendelstein mit offiziell 202 km/h gemessen, dicht gefolgt vom Brocken mit 198 km/h. Stellenweise herrschte länger als 24 Stunden am Stück Wind in Sturmstärke.

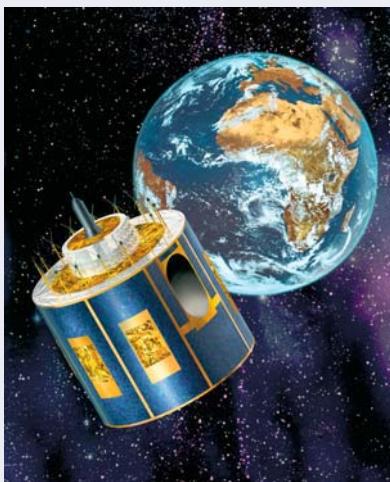
Fliegende Dachziegel, umstürzende Bäume und herumfliegende Schilder sorgten für chaotische Zustände auf den Straßen und Angst und Schrecken bei den Menschen. „Kyrill“ wütete so heftig, dass erstmals in der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland sogar der Zugverkehr nahezu komplett eingestellt werden musste. Tausende Reisende harrten in den Bahnhöfen aus und wurden zum Teil in Notquartieren untergebracht. Auch viele Flüge fielen dem unaufhörlich wehenden Wind zum Opfer. In verschiedenen Regionen waren die Menschen zudem ohne Strom und Telefon.

Erst am nächsten Tag, als das große Aufräumen begann, wurde das ganze Ausmaß der Katastrophe sichtbar: Gewaltige Strommasten waren umgeknickt, Dächer gleich reihenweise abgedeckt, Straßen und Bahnlinien unpassierbar, überall lagen demolierte Gebäudeteile herum. Am schlimmsten betroffen von „Kyrill“ war neben Deutschland vor allem Großbritannien. Aber auch in den Benelux-Staaten, Österreich, Polen, Tschechien, der Schweiz oder Teilen Frankreichs sah es kaum besser aus. Europaweit hatte der Sturm mindestens 49 Menschenleben gekostet, die Sachschäden beliefen sich auf mehr als 13 Milliarden US-Dollar.

Schon mitten in der Sturmnacht waren tausende Rettungskräfte von Feuerwehr und Technischem Hilfswerk im Einsatz gewesen, um die gröbsten Schäden zu beseitigen. Alle Bahnstrecken und Flughäfen wieder einsatzbereit und alle Straßen frei zu machen, dauerte aber Tage. Nur die Schüler konnten sich freuen: In vielen Regionen wurde der Unterricht vorsichtshalber ganz oder teilweise abgesagt.

Orkantief „Kyrill“ über Mitteleuropa. © NASA/GSFC/ MODIS Rapid Response Project





Die Daten von Wettersatelliten wie Meteosat (oben) und Wetterstationen (unten) liefern die Basis für die Sturmvorhersage.
© EUMETSAT; NOAA

Aber auch Universitäten und Forschungseinrichtungen betätigen sich auf diesem Gebiet: So arbeiten Meteorologen der Universität Karlsruhe gemeinsam mit dem Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam ebenfalls an einer Gefährdungskarte für Deutschland. Die mit einer Auflösung von 1 x 1 Kilometern sehr genaue Karte soll zukünftig sogar lokale Veränderungen der Windgeschwindigkeiten durch Hügelkämme oder Täler anzeigen. Damit könnten beispielsweise Förster an besonders gefährdeten Hängen Vorsorge treffen: Wenn sie statt der meist üblichen Nadelbäume Laubbäume anpflanzen, ließe sich der Schaden durch Windwurf verringern. Denn die im Winter kahlen Zweige der Laubbäume bieten dem Wind weniger Angriffsfläche, zudem reichen ihre Wurzeln meist tiefer in den Boden als die der flachwurzelnden Nadelbäume.

Zugutekommen sollen solche Sturmarten neben der Risikoeinschätzung aber auch der Frühwarnung. Denn genau an diesem Punkt hapert es häufig noch: Zwar überwachen Dutzende von Wettersatelliten und tausende Bodenstationen weltweit das Wetter rund um die Uhr, einen absoluten Schutz gegen stürmische Überraschungen bieten aber auch sie nicht. Denn selbst wenn Tiefdruckgebiete gemeinhin als stabil und in ihrem Verhalten gut vorhersagbar gelten, gibt es genügend Ausnahmen, wie auch das Beispiel von „Lothar“ im Dezember 1999 nachdrücklich gezeigt hat: Die Meteorologen übersahen die Vorwarnzeichen und eine Sturmwarnung blieb, bis auf einige Ausnahmen, aus.

Unter anderem deshalb arbeiten Meteorologen und Klimaforscher weltweit daran, immer schnellere, genauere und verlässlichere Überwachungs- und Vorwarnsysteme zu entwickeln. Das „A und O“ bei der Vorhersage mithilfe von Computermodellen bleibt das so genannte „nowcasting“, eine kontinuierliche Beobachtung der augenblicklichen Wetterlage. Mit ihr spüren die Meteorologen kleinste Veränderungen auf, verfolgen ihre Entwicklung und ändern gegebenenfalls ihre Vorhersage entsprechend. Bei kritischen Wetterereignissen ist dies die Voraussetzung für eine möglichst frühzeitige Warnung der Bevölkerung und der Katastrophendienste.



Ist der Schaden einmal da, sorgen die Feuerwehren und das Technische Hilfswerk, aber auch die Polizei und die Bundeswehr für die Beseitigung der schlimmsten Schäden. Der beste persönliche Schutz besteht darin, während eines Sturms auf keinen Fall sichere Wohnungen zu verlassen. Immer wieder werden Menschen durch herabfallende Äste oder Dachpfannen, aber auch durch umstürzende Bäume verletzt oder getötet.



Hurrikan, Taifun und Co. – tropische Wirbelstürme

Ob als Taifun im Pazifik, Zyklon im Indischen Ozean oder Hurrikan in der Karibik – tropische Wirbelstürme gehören zu den gewaltigsten und zerstörerischsten Wetterphänomenen unserer Erde. Ihre gigantischen Wolkenwirbel erreichen Durchmesser von fast 1.000 Kilometern. In ihnen rasen die Winde mit 120 bis 240 Kilometern pro Stunde, in Böen können es sogar über 300 sein. Liegen dicht besiedelte und touristisch genutzte Küstengebiete auf ihrem Weg, ist die Katastrophe vorprogrammiert.

Tropische Wirbelstürme sind im Grunde nichts andereres als riesige atmosphärische Wärmekraftmaschinen. Ihre Geburtsstätte sind die tropischen Regionen der Weltmeere zwischen dem 15. nördlichen und südlichen Breitengrad. Dort, wo die Wassertemperatur die Schwelle von 27 °C überschreitet, können sie die im Ozean und in der Atmosphäre gespeicherte Energie in Wind und Wellen umwandeln. Zum Glück arbeiten sie dabei nicht besonders effizient, denn selbst der stärkste Wirbelsturm setzt nur etwa drei Prozent seiner verfügbaren Energie um. Aber das reicht schon aus, um einen verhängnisvollen Prozess zu starten.

Über den warmen Ozeanen steigen Luftmassen bis in eine Höhe von 20 Kilometern auf. Wolkentürme bilden sich und die bei der Verdunstung des Wassers gespeicherte Energie wird in der Höhe freigesetzt. Durch die ablenkende Kraft der

Nahansicht eines Hurrikans aus der Erdumlaufbahn: Deutlich sind die typische Wirbelform und das Auge zu erkennen. © NASA



Links: Das Auge des Hurrikans „Katrina“, aufgenommen vom Flugzeug eines „Hurrikan-Hunters“ aus. Rechts: Ein Wirbelsturm-Auge aus dem All betrachtet. © NOAA; NASA

Erdrotation (Corioliskraft) beginnt das System zu rotieren und die einströmende Luft wird gezwungen aufzusteigen. Dies ist auch der Grund, warum am Äquator ein etwa zehn Grad breiter Korridor frei von Wirbelstürmen bleibt: In diesen Gebieten fehlt die Corioliskraft, die den Wolkenwirbel erst in seine Drehung versetzt. Der so entstehende Wirbelsturm zieht wie ein Staubsauger immer mehr warme und feuchte Luft aus der Umgebung an. Die Luftsäule wird wärmer, die Luft leichter, sie steigt weiter, gleichzeitig sinkt der Luftdruck im Zentrum stark ab. Der Wirbelsturm wird immer größer und stärker.

Auf Satellitenbildern sind diese Stürme, wenn sie voll entwickelt sind, als riesige weiße Wolkenwirbel zu erkennen. In ihrem Zentrum liegt das typische wolkenfreie und fast windstille Auge, das einen Durchmesser von 20 bis 50 Kilometer haben kann. Mit der vorherrschenden Windrichtung ziehen diese Stürme mit Geschwindigkeiten bis zu 50 Kilometern in der Stunde „vergleichsweise langsam“, auf der Nordhalbkugel hauptsächlich in westliche Richtung, auf der Südhalbkugel in östliche.

In Zukunft könnten sich durch den Klimawandel die Bedingungen für Wirbelstürme weiter verbessern. Denn mit steigender Meerestemperatur dehnt sich auch die Dauer der Hurrikansaison immer weiter aus. Gleichzeitig kann wärmere Luft mehr Feuchtigkeit speichern, sodass auch die sintflutartigen Regenfälle stärker werden. Der Hurrikan „Katrina“, der Ende August 2005 den Südosten der USA verwüstete und New Orleans in Wasser und Schlamm versinken ließ, gibt einen Vorgeschmack dessen, wie solche starken Stürme aussehen könnten.

Die Bahnen der Hurrikans könnten sich im Zukunft auch immer weiter nach Norden verlagern, das jedenfalls prognostizieren amerikanische Forscher. Dann müssten sich nicht nur New Orleans oder Houston auf häufige Hurrikans einstellen, sondern auch Washington und New York City. Bisher wirkten die Jetstreams, „Windautobahnen“ hoch oben in der Atmosphäre der Erde, wie eine Barriere, sie sorgten dafür, dass die Hurrikans nicht über ihre Bahn hinauswandern konnten. Doch im Zusammenhang mit der Verschiebung der Klimazonen haben sich in den letzten Jahrzehnten auch die Jetstreams weiter polwärts verlagert. Um durchschnittlich 19 Kilometer pro Jahrzehnt, das ergaben Auswertungen von Satelliten-daten. Damit erhalten auch die tropischen Wirbelstürme mehr Bewegungsfreiheit und können ihre Zugbahnen weiter nach Norden hin ausdehnen. „Die Jetstreams sind die treibende Kraft für das Wetter der halben Erde“, erklärte Cristina Archer, Geowissenschaftlerin der Carnegie Institution, die die „Windautobahnen“ untersucht hat, im April 2008. „Daher ist klar, dass Veränderungen in diesen Strömen das Potenzial besitzen, ausgedehnte Klimasysteme und damit auch große Teile der Menschheit zu beeinflussen.“

Unberechenbar und tödlich – die Auswirkungen

Erreichen die Wirbelstürme das Festland, richten sie oft große Verwüstungen an. Die „Superstürme“ reißen ganze Küstenabschnitte weg, Häuser werden von ihren Fundamenten geweht und in Einzelteile zerlegt, Bäume entwurzelt und Autos wie Spielzeug durcheinander geworfen. Ein Viertel aller Hurrikans wird zusätz-



Der Supertaifun „Jangmi“ war 2008 der einzige pazifische Wirbelsturm, der die Kategorie 5 erreichte. Da seine Zugbahn jedoch fast ausschließlich über dem Meer verlief, richtete er kaum Schaden an. © Public domain

Hurrikan „Floyd“ zog im Herbst 1999 von der Karibik aus die Ostküste der USA entlang. Er gilt bis heute als einer der teuersten. © NASA



Zugbahnen und Rekord-Wirbelstürme

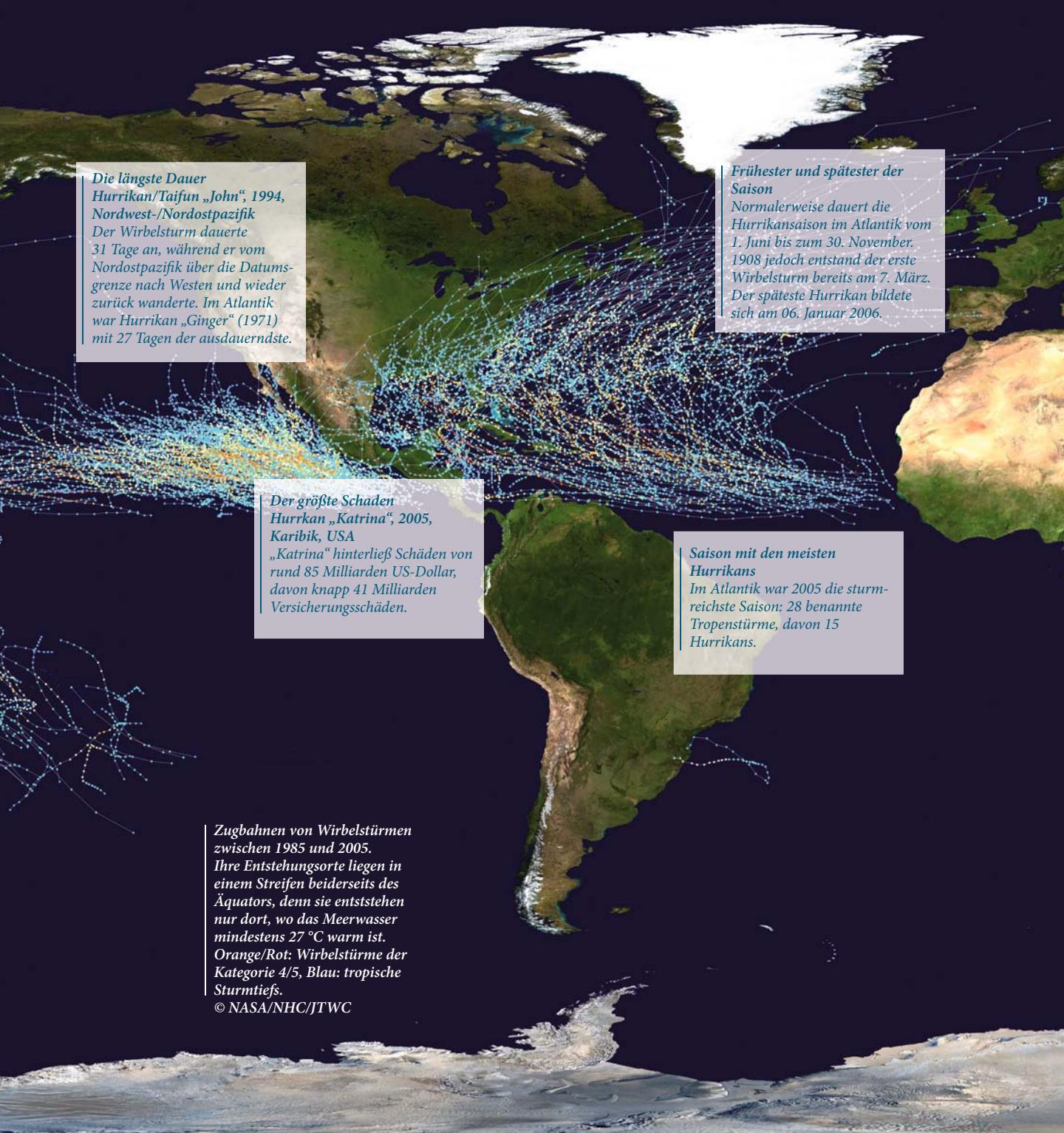
Die meisten Opfer
Zyklon, 1970, Bangladesh
Bis heute gilt dieser Wirbelsturm als der opferreichste, wenngleich es nur Schätzungen gibt. Vermutlich starben mehr als 300.000 Menschen durch Überflutungen der flachen Deltagebiete. Zyklon „Nargis“ forderte 2008 dort rund 138.000 Todesopfer.

Die größte Ausdehnung
Taifun „Tip“, 1979, Nordwestpazifik
Der Wirbelsturm bedeckte eine Fläche, deren Radius bei mehr als 1.100 Kilometern lag.

Die größte Intensität
Taifun „Tip“, 1979, Nordwestpazifik
In seinem Zentrum herrschte ein Luftdruck von nur 870 Hektopascal, die Windgeschwindigkeiten erreichten 306 Kilometer pro Stunde.

Die längste Wegstrecke
Taifun „Ophelia“, 1960, Westpazifik
Wirbelsturm „Ophelia“ wanderte im Laufe seines Lebens 13.500 Kilometer weit, gemessen von seiner Entstehung als tropischer Sturm bis zum Abflauen. Der Durchschnitt liegt bei rund 3.000 Kilometern.

Die stärkste Sturmflut
Zyklon „Mahina“, 1899, Australien
Beim Anlanden des Wirbelsturms in der Bayhurst Bay stieg das Meer über 14 Meter hoch. Die Flut spülte Fische und Delfine bis auf ein 15 Meter hohes Kliff.



lich von Tornados begleitet. Nicht nur die Winde selbst verursachen Zerstörungen, sondern auch die begleitenden extremen Sturmfluten. Ihr Zerstörungspotenzial reicht oft weit landeinwärts. Im Laufe der Jahre sind dadurch mehr Menschen zu Tode gekommen als durch den Wind.

Viele dieser Sturmfluten entstehen, weil sich im Zentrum eines Wirbelsturms durch den Wind, aber auch durch den niedrigen Luftdruck, regelrechte „Hügel“ aus Wasser bilden. Auf freier See kann das Wasser leicht abfließen, nicht aber in flachen Küstengewässern. Dort türmt es sich immer mehr auf, sodass diese Wasserberge durchaus Wellen bis 18 Meter Höhe erzeugen können. Die Wellenhöhe bei extremen Sturmfluten ist abhängig von der Sturmstärke, der Sturmintensität, der Bewegungsrichtung des Sturms, der Unterwassertopografie in Küstennähe sowie der astronomischen Konstellation für Ebbe und Flut.

Saffir-Simpson-Skala der Hurrikanstärke: Entscheidend für die Einstufung ist die Windgeschwindigkeit.

Da viele dicht besiedelte und noch dazu oft touristisch genutzte Küstengebiete in den typischen Landungsgebieten dieser Stürme liegen, ist das Katastrophenpotenzial enorm. So forderte die Taifunsaison 2008 im Pazifik mindestens 1.703 Todesopfer und hinterließ Schäden in Höhe von drei Milliarden US-Dollar.

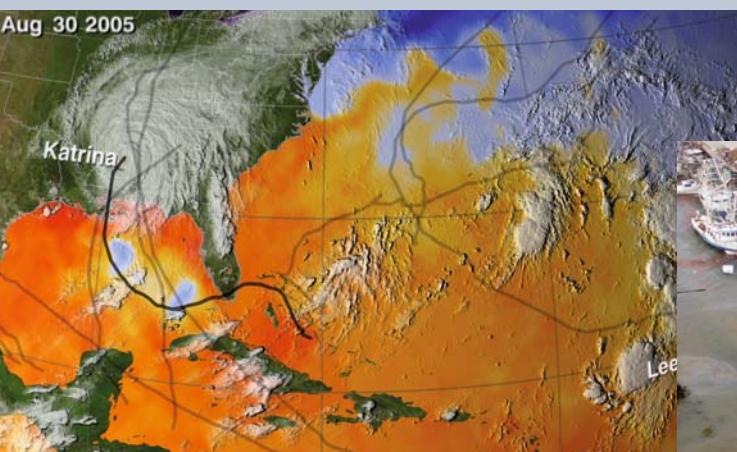
Wert	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit		Schäden	Hurrikan
		m/s	km/h		
1	Schwach	32,7–42,6	118–153	Schäden an nicht verankerten Wohnwagen, Bäumen und Büschen. Teilweise Überflutung von Küstenstraßen und leichte Schäden an Hafenanlagen.	„Hortense“ (Puerto Rico, 1996)
2	Mäßig	42,7–49,5	154–177	Leichte Schäden an Dächern, Türen und Fenstern von Gebäuden. Stärkere Schäden an Hafenanlagen und Wohnmobilen. Bäume werden umgeweht, kleine Schiffe losgerissen. Küstenstraßen sind bereits zwei bis vier Stunden vor Ankunft des Sturmzentrums überschwemmt.	„Marylin“ (Virgin Islands, 1995) „Floyd“ (Karibik, USA, 1999)
3	Stark	49,6–58,5	178–209	Strukturelle Schäden an kleineren Gebäuden. Auch große Bäume werden umgeweht, Laub abgerissen, Wohnmobile und Straßenschilder zerstört. Küstengebiete, die weniger als 1,5 Meter über dem Meeresspiegel liegen, stehen bis zu 13 Kilometer landeinwärts unter Wasser.	„Fran“ (USA, 1996) „Georges“ (USA, 1998)
4	Sehr stark	58,6–69,4	210–249	Starke Schäden an Wänden und Dächern auch größerer Gebäude. Alle Bäume und Sträucher sind umgeweht. Niedrig gelegene Küstenstraßen sind bereits drei bis fünf Stunden vor Ankunft des Sturmzentrums überschwemmt, ebenso Küstengebiete, die niedriger als 3 Meter über dem Meeresspiegel liegen.	„Michelle“ (Karibik, Mittelamerika, 2001) „Lili“ (Karibik, USA, 2002)
5	Verwüstend	> 69,4	> 249	Hausdächer werden komplett abgedeckt, einige kleinere Gebäude um- oder weggeweht. Küstengebiete niedriger als 5 Meter sind bis 16 Kilometer landeinwärts überschwemmt.	„Camille“ (USA, 1965) „Andrew“ (USA, 1992) „Katrina“ (USA, 1999)

Im Laufe der Saison waren 22 tropische Stürme, elf Taifune und der Supertaifun „Jangmi“ mit der Stärke 5 auf der Saffir-Simpson-Skala registriert worden. Im Atlantik bildete Hurrikan „Ike“ den unrhühmlichen Höhepunkt der Saison. Der Wirbelsturm der Kategorie 4 zog Anfang September 2008 über die Karibik hinweg und richtete auf Kuba und Haiti große Zerstörungen an. Am 9. September war „Ike“ auf 1.400 Kilometer Umfang herangewachsen und schob eine bis zu sechs Meter hohe Flutwelle vor sich her, als er auf die Küste von Texas und Louisiana zusteuerte. Die Behörden im texanischen Galveston und in angrenzenden Küstengebieten ordneten eine Zwangsevakuierung an.

Als „Ike“ am 13. September auf Land traf, setzte die von ihm ausgelöste Sturmflut rund 100.000 Häuser entlang eines 160 Kilometer langen Küstenstreifens unter Wasser. Die Stadt Galveston war zu weiten Teilen überflutet. Weil sich tausende von Bewohnern der Evakuierung widersetzt hatten, initiierten die Behörden die größte Rettungsaktion in der amerikanischen Geschichte. Der durch „Ike“ hinterlassene Schaden wird auf rund 31,5 Milliarden US-Dollar geschätzt. Nach „Katrina“ im Jahr 2005 und „Andrew“ im Jahr 1992 rangiert „Ike“ damit auf Platz drei der zerstörerischsten Hurrikans in den USA.

*Sturmfluten und Überschwemmungen als Begleiterscheinungen von Wirbelstürmen richten oft mehr Schäden an als der Sturm selbst. Hier ein Teil von New Orleans nach Hurrikan „Katrina“ im September 2005.
© FEMA/Jocelyn Augustino*





„Katrina“ – die Katastrophe von New Orleans

Der Hurrikan „Katrina“ gilt als eine der verheerendsten Naturkatastrophen in der Geschichte der USA. Der Wirbelsturm, der zeitweise die höchste Kategorie 5 erreichte, hinterließ besonders in den Bundesstaaten Florida, Louisiana, Mississippi, Alabama und Georgia Schäden von umgerechnet mehr als 125 Milliarden Euro. 1.800 Menschen starben als Folge des Hurrikans, fünf Millionen waren tage- bis wochenlang ohne Strom, eine Million Menschen wurde obdachlos.



Besonders schlimm betroffen war die Stadt New Orleans. Zahlreiche Deichbrüche ließen die in weiten Teilen zwei Meter unter dem Meeresspiegel liegende Stadt innerhalb kürzester Zeit in den Fluten versinken. Besonders fatal wirkte sich der Bruch des Dammes aus, der die Wassermassen des Lake Pontchartrain von der Metropole fernhielt. Rund 80 Prozent von New Orleans standen bis zu 7,60 Meter hoch unter Wasser. Fehler bei den Planungen der Rettungsmaßnahmen führten dazu, dass mehr als 15.000 Menschen tagelang ohne Hilfe im „Convention Center“ festsäßen. Einige extra eingerichtete Evakuierungslager waren bereits nach kurzer Zeit überfüllt.



An vielen Orten wurden durch unzureichende Vorbereitung Lebensmittel und Trinkwasser knapp, die Stromversorgung brach vielerorts total zusammen. Rettungskräfte versorgten die betroffenen Gebiete mit Tankwagen oder per Hubschrauber. © NASA; NOAA; FEMA/Andrea Booher



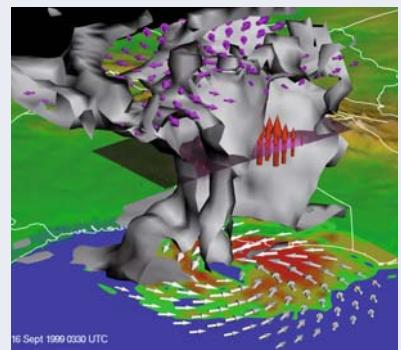
Doch nicht nur die Sturmfluten richten schwere Schäden an, auch der Niederschlag, den Wirbelstürme wie „Katrina“ mit sich bringen und der über Land oft sintflutartig abregnet, sorgt für schwere Überschwemmungen. Mancherorts ergießen sich innerhalb von ein bis zwei Tagen 2.000 Liter Wasser auf den Quadratmeter. Das entspricht etwa der Niederschlagsmenge, die in Mitteleuropa in drei bis vier Jahren fällt. Durch diese Wassermassen können sogar Erdrutsche ausgelöst werden. Am 30. Oktober 1998, dem Tag des stärksten Niederschlags von Hurrikan „Mitch“, löste sich beispielsweise ein ganzer Hang des Vulkans Casitas in Nicaragua und raste zu Tal. Die Schlammströme und Rutschungen verschütteten zwei Städte, mindestens 7.000 Menschen in der Region starben.

Der beste Schutz: Vorhersagen und Evakuieren

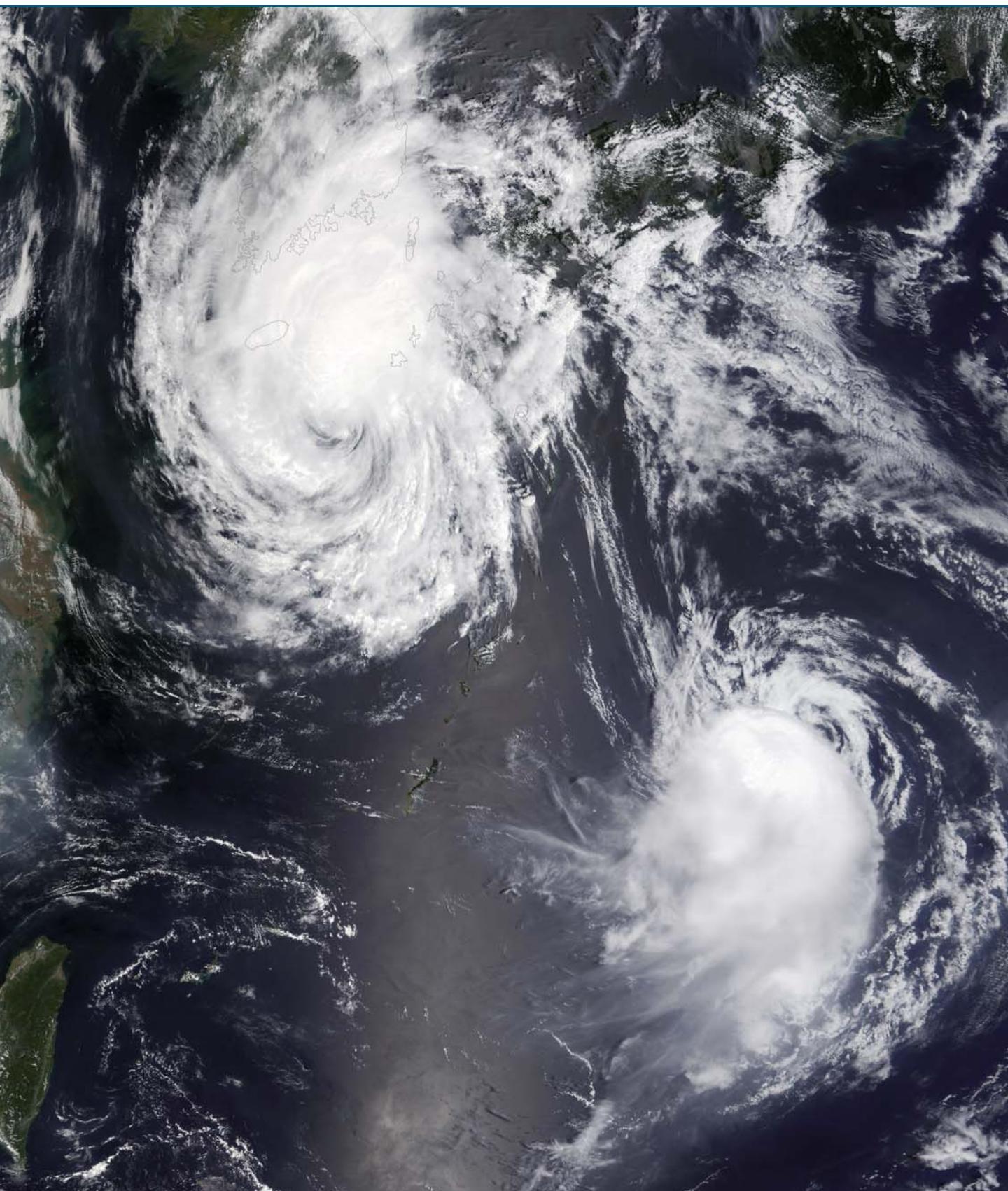
Gegenmaßnahmen gegen Wirbelstürme gibt es so gut wie keine. Der Schutz der Bevölkerung besteht zum größten Teil in einer frühzeitigen Warnung betroffener Gebiete und einer funktionierenden Katastrophenplanung, die eine rechtzeitige Evakuierung zulässt. Bedingung ist daher eine möglichst genaue Vorhersage, um nicht unnötig Panik und enorme Kosten zu verursachen. Während die Hurriankschäden in den letzten Jahren ständig angestiegen sind, konnte insbesondere in den USA, aber mittlerweile auch in anderen Regionen der Erde, die Zahl der Toten durch bessere Prognosen reduziert werden.

Das amerikanische National Hurricane Center (NHC) in Miami, selbst in einer hurrikangefährdeten Region gelegen, überwacht beispielsweise die Wirbelstürme des tropischen Atlantiks, des Ospazifiks und des Golfs von Mexiko mit Satelliten und Flugzeugen. Die „Augen aus dem All“ erkennen einen Wirbelsturm schon in seiner Entstehungsphase. Ist er erst einmal aufgespürt, wird eine Kette von Maßnahmen in Gang gesetzt. Der erste Schritt ist die Erstellung einer Vorhersage – in jedem neuen Fall wieder eine Herausforderung für die Fachleute.

Für die Prognose, beziehungsweise die Warnung für den atlantisch-karibischen Raum, werden am NHC mindestens zehn numerische Modelle zur Berechnung der Zugbahnwahrscheinlichkeiten verwendet. Ein wesentlicher Input für die Modelle sind beispielsweise Messdaten über Wind, Wolken und Luftdruck, die an Bord von Flugzeugen durch so genannte „Hurrikan-Flüge“ gewonnen werden. Satellitendaten sind zwar auch ein wichtiges Hilfsmittel, reichen allein aber nicht aus. Eine Warnung an die Bevölkerung wird veröffentlicht, wenn eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein Hurrikan in den folgenden 36 Stunden ihren Wohnort erreichen könnte. Die Warnmeldung signalisiert akute Gefahr für diesen Bereich der Küste oder des Landes, eine Evakuierung kann unmittelbar bevorstehen. Die durch Computermodelle berechneten wahrscheinlichsten Zielregionen des Wirbelsturms werden drei Tage vor Eintreffen in den Alarmzustand versetzt. Mit jeder weiteren Messung werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten und -orte bis zuletzt präzisiert. Spätestens eineinhalb Tage vor dem Durchzug des Wirbelsturms laufen die Schutz- und Evakuierungsmaßnahmen dann in vollem Umfang an. In den meisten gefährdeten Gebieten existieren detaillierte Evakuie-



*Erforschen und simulieren, aus dem All beobachten und im Ernstfall evakuiieren – die klassischen Maßnahmen bei Wirbelstürmen.
© NOAA/GFDL; NASA; FEMA*



Hurrikansaison 2005: Rekorde in Serie

Meteorologe Karsten Schwanke erzählt

In meiner Erinnerung sind nur wenige Naturkatastrophen hängen geblieben, die sich derart ins Gehirn gebrannt haben, wie die Hurrikansaison 2005. Wahrscheinlich liegt es daran, dass bis auf „Katrina“ und vielleicht „Wilma“ jeder einzelne Hurrikan für sich genommen kaum eine Erwähnung in einem Buch wie diesem – zumal Jahre später – wert gewesen wäre. Aber alle zusammen gaben einem das Gefühl, von einer Katastrophe in die nächste zu rasen, es war eine atemlose Hetzjagd mit noch nie da gewesenen Rekorden.

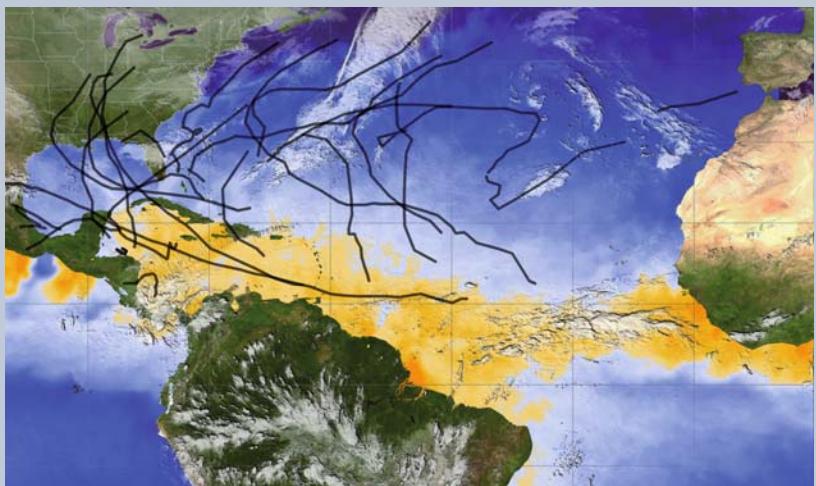
Offiziell dauert eine Hurrikansaison im Atlantik vom 1. Juni bis zum 30. November. In dieser Zeitspanne erreichen die Wassertemperaturen der tropischen Meeresgebiete gewöhnlich mehr als 27 °C – eine notwendige Voraussetzung zur Bildung tropischer Wirbelstürme. Denn nur bei genügend warmem Wasser verdunstet so viel davon, dass sich die berüchtigten Wolkentürme bilden, die sich im Laufe ihrer Entwicklung zu einem Wirbelsturm formieren können. Bis zu diesem Jahr war die Zeitspanne für gewöhnlich recht großzügig gewählt. Oft bildeten sich die ersten Stürme erst im Juli oder August und die letzten Ende Oktober/Anfang November.

2005 jedoch erschien der erste tropische Sturm schon am 8. Juni auf den Wetterkarten der Karibik und der letzte löste sich erst am 6. Januar 2006 über der Mitte des Atlantiks in Wohlgefallen auf. (so spät war noch keiner: Rekord Nr.1). Zwischen dem ersten und dem letzten Hurrikan tobten sich weitere 26 Stürme auf dem Atlantik aus. (nie gab es mehr – Rekord Nr. 2). Diese enorme Anzahl führte dazu, dass den Meteorologen des National Hurricane Center in Miami erstmals – und zwar schon Ende Oktober – die Jahres-Namensliste für Stürme ausging (Rekord Nr. 3). Nach „Wilma“ griffen sie zum griechischen Alphabet, um die weiteren Stürme zu benennen. Sie schafften es bis zum sechsten griechischen Buchstaben „Zeta“.

Von den insgesamt 28 tropischen Stürmen wurden 15 zu einem Hurrikan (Rekord Nr. 4). Und es war die einzige Saison, in der sich gleich drei Hurrikans zur höchsten Kategorie 5 der Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala entwickelten (Rekord Nr. 5). Hurrikan „Wilma“ erreichte zudem den tiefsten Luftdruck, der jemals in einem Hurrikan gemessen wurde: 882 Hektopascal (Rekord Nr. 6). Zum Vergleich: Der verheerende Orkan „Lothar“ vom 26. Dezember 1999 brachte es auf „nur“ 961 Hektopascal. Am 8. Oktober bekam der 20. Sturm der Saison seinen Namen: „Vince“. So weit nichts Ungewöhnliches. Bemerkenswert daran war aber, dass er nicht in der Karibik oder im tropischen Atlantik entstand, sondern in der Nähe von Madeira. Es ist äußerst selten, dass sich tropische Wirbelstürme im östlichen Atlantik entwickeln. Im Verlauf des Folgetages erreichte er kurzzeitig Hurrikanstärke und zog weiter Richtung Iberische Halbinsel, die er am 11. Oktober in der Nähe der spanischen Stadt Huelva erreichte. Er war der am weitesten nördlich und östlich registrierte Hurrikan seit Beginn der Messungen – und damit Rekord Nr. 7.

Die Jagd nach Rekorden könnte so noch weiter fortgesetzt werden – schlussendlich schaffte es die Hurrikansaison 2005 auf 16 neue Rekorde.

Hurrikan-Zugbahnen der Saison 2005, aufgetragen über der Meerestemperatur vom Dezember 2005. © NASA/GSFC/SVS



Häuser auf Stelzen, befestigte Dächer und Fensterläden sowie höher gelagerte elektrische Geräte gehören zu den Standardvorkehrungen in den von Hurrikans gefährdeten Gebieten der USA. Unten rechts: Evakuierungszonen im texanischen Galveston, einem mehrfach von schweren Hurrikans zerstörten Ort.

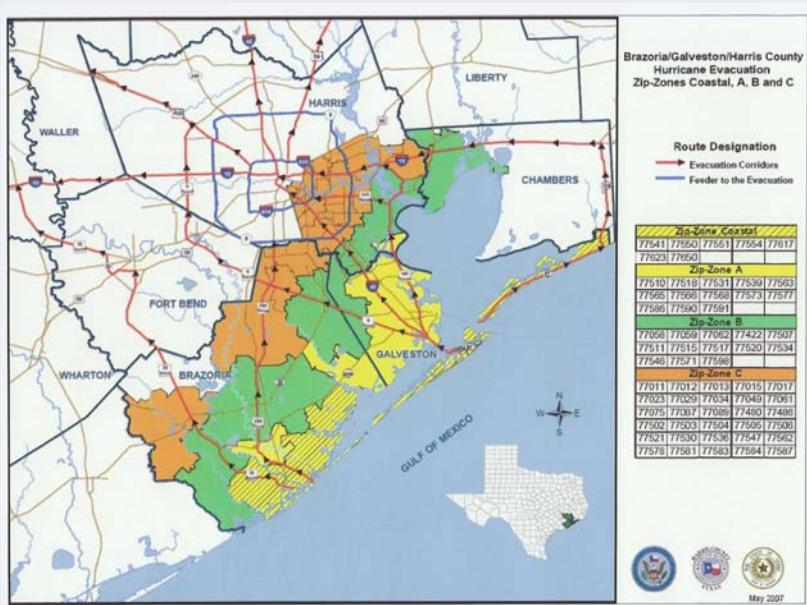
© FEMA; US Government



rungspläne, die regeln, wann und wohin die Bewohner im Falle eines herannahenden Sturms flüchten sollen. Viele regionale Behörden bieten inzwischen interaktive Tools im Internet an, mit denen Einwohner das Hurrikanrisiko für ihren Wohnort erfragen können. Informationen darüber, was in ein „Hurricane-Evacuation-Kit“ – das Überlebenspaket für den Fall einer Evakuierung – gehört, sind ebenfalls in allen örtlichen Katastrophenschutzzentren und im Internet erhältlich.

Einen begrenzten Schutz kann auch das hurrikansichere Bauen bieten – es macht zwar eine Evakuierung nicht überflüssig, kann aber dazu beitragen, die Schäden zu minimieren. In einigen Regionen, wie beispielsweise in Florida, berücksichtigen die Bauvorschriften dies. Gebäude müssen hier so angelegt werden, dass sie den zusätzlichen Belastungen durch den Winddruck bei einem Wirbelsturm standhalten. So können beispielsweise spezielle Sicherungskrampen verhindern, dass das Hausdach vom Sturm abgehoben wird. Sie werden zwischen Dachbasis und Wänden eingeschraubt und verankern so das Dach zusätzlich. In Küstennähe oder an Flüssen werden die Häuser oft wie auf Stelzen gebaut, damit die vom Hurrikan erzeugte Flutwelle darunter hinwegfließen kann. Elektrogeräte, Boiler oder Heizungen liegen zudem nicht im Keller, wo sie überflutet werden könnten, sondern werden erhöht angebracht.

Wenn ein Haus direkt von einem Wirbelsturm der Kategorie 5 getroffen wird, können diese Maßnahmen das Haus auch nicht mehr retten. Doch bei schwächeren Stürmen oder wenn das Gebäude im Randbereich des Hurrikans liegt, kann dies die Schäden zumindest reduzieren helfen.





Tornados – klein, aber zerstörerisch

Tornados gelten als die „kleinen Brüder“ der Hurrikans. Doch trotz schmälerer Wirbel und kürzerer Dauer können auch diese Windhosen enorme Schäden anrichten. So gilt der so genannte „Tornado Outbreak“ im Mai 1999 bis heute als eine der schlimmsten Naturkatastrophen der USA. Innerhalb von nur elf Stunden rasten mehr als 70 Tornados über Texas, Oklahoma und Kansas hinweg und zerstörten mehr als 10.000 Gebäude, töteten 48 Menschen und hinterließen 1,5 Milliarden US-Dollar Schaden.

Im Gegensatz zu den tropischen Wirbelstürmen bilden sich Tornados über dem Land und nicht über dem Ozean. Sie entstehen immer dann, wenn feucht-heiße Luftmassen und polare Kaltluft aufeinandertreffen und sich übereinander-schieben. Irgendwann durchbricht die Kaltluft die Luftmassengrenze und stürzt dann mitunter mehrere Kilometer strudelförmig nach unten. Die herabsinkende Kaltluft wird am Rande des Strudels durch emporgerissene Warmluft ersetzt. Die so angesaugte Luft konzentriert sich auf einen immer enger werdenden Raum, wodurch sich die Drehgeschwindigkeit enorm erhöht. Die Feuchtigkeit in der aufsteigenden Warmluft kondensiert und es bildet sich der für den Tornado typische trichterförmige Wolkenschlauch. Der Trichter wächst so lange nach unten, bis er den Erdboden erreicht hat. Der Tornado dreht sich jetzt mit sehr hoher Geschwindigkeit um seine senkrechte Achse. Durch die Drehbewegung beginnt

*Tornados sind Wirbelwinde, die enorme Zerstörungen anrichten können – und die keineswegs nur in den USA vorkommen. Hier ein Tornado vor Mallorca.
© Th. Walther/GFDL*

er mit einer Geschwindigkeit von 40–50 Kilometern pro Stunde zu wandern, er kann aber sogar Spitzenwerte von bis zu 90 Kilometern pro Stunde erreichen. Seine eigentliche Zerstörungskraft erhält der Tornado allerdings erst durch seine rotierenden Winde und den extrem niedrigen Luftdruck im Wolkenschlauch, der etwa 80 bis 100 Hektopascal unter dem Umgebungsluftdruck liegt. Die Winde in einem Tornado sind so stark, dass regelmäßig Messgeräte zu Bruch gehen, sie können aber vermutlich mehr als 500 Kilometer pro Stunde schnell werden. Der Durchmesser von Tornados kann am Boden von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern reichen; in Einzelfällen wurden sogar ein bis zwei Kilometer beobachtet. Bei solchen „Riesentornados“ können mehrere Wirbel auftreten, die um ein gemeinsames Zentrum kreisen (Multivortex-Tornado).

Die Fujita-Skala gibt die Intensität eines Tornados an. Stufe 4 und 5 sind extrem selten, aber für mehr als zwei Drittel aller Tornadoschäden und Todesopfer verantwortlich.

Im Unterschied zu Hurrikans haben Tornados eine deutlich kürzere Lebensdauer – sie reicht von wenigen Minuten bis zu maximal einer Stunde. Aber auch hier gibt es Ausnahmen, die zeigen, wie unberechenbar die Atmosphäre sein kann. Am 3. Mai 1999 wüteten im Bundesstaat Oklahoma Tornados sechs Stunden lang. Am Ende lagen 8.000 Häuser in Trümmern, die Spur der Verwüstung war rund 250

Wert	Intensität	Windgeschwindigkeiten		Schäden/Merkmale
		m/s	km/h	
F0	Leicht	17,2–32,6	62–117	Beschädigt Schornsteine. Wirft flachwurzelnde Bäume um, beschädigt Verkehrschilder.
F1	Mäßig	32,7–50,1	118–180	Hebt die Oberfläche von Dächern ab, schiebt Wohnmobile von ihren Fundamenten und stürzt sie um. Schiebt Autos von den Straßen, kann Garagenanbauten zerstören.
F2	Stark	50,2–70,2	181–253	Starke Zerstörungen, Totalschaden an Wohnmobilen. Zerbriicht oder entwurzelt große Bäume, leichtere Gegenstände fliegen durch die Luft.
F3	Verwüstend	70,3–92,1	254–332	Reißt Dächer und einige Wände ab, stürzt Züge um. Fast alle Bäume sind entwurzelt.
F4	Vernichtend	92,2–116,2	333–418	Legt auch stabile Häuser in Trümmer. Strukturen mit schwachen Fundamenten werden über kurze Strecken verfrachtet, Autos und große Gegenstände fliegen durch die Luft.
F5	Katastrophal	116,3–136,9	419–493	Hebt auch stabile Gebäude von ihren Fundamenten und verfrachtet sie über beträchtliche Entfernungen. Starke Schäden an Stahlbetonstrukturen.
F6	Unvorstellbar	> 136,9	> 493	Selten erreichtes Niveau, sehr unwahrscheinlich. Könnte kaum von F4- und F5-Schäden unterschieden werden.

Kilometer lang und reichte vom Südwesten Oklahomas fast bis nach Wichita (Kansas). Für Tornados gibt es eine eigene Skala der Windgeschwindigkeiten, da die „normale“ Beaufort-Skala mit ihrer maximalen Windstärke 12 (117 km in der Stunde und mehr) längst nicht ausreicht. Die von Theodore Fujita entwickelte und nach ihm benannte Skala (F) beginnt in der niedrigsten Stufe bei etwa 116 Kilometern in der Stunde, die höchste Stufe (F5) beginnt bei 420 Kilometern pro Stunde. Um das Zentrum eines Tornados wurden in Einzelfällen sogar schon Windgeschwindigkeiten bis zu 700 Kilometern gemessen.

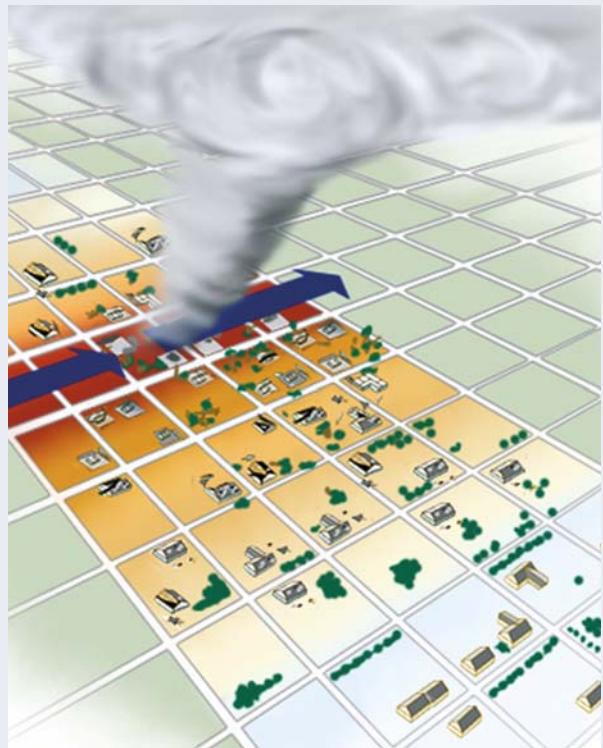
Tornados können das ganze Jahr über auftreten, sind aber im Frühling häufig. In der Hauptaison von März bis Mai ist im Mittleren Westen der USA – und dort besonders in Oklahoma – durchaus mit bis zu 800 solcher Wirbel zu rechnen. Mehrere Faktoren begünstigen die gerade dort oft katastrophalen Ausmaße der Tornadoefolgen. Zum einen bietet diese Region den Stürmen ideale Entstehungsbedingungen, zum anderen liefert die typische Bauweise der Häuser dem Wind optimale Ansatzpunkte. Die dort weit verbreiteten Holzhäuser können einem Tornado nicht standhalten.

Sturmschutzkeller, wie sie beispielsweise Oklahoma in den Bauvorschriften verankert hat, sind längst nicht überall in den potenziellen Gefährdungsgebieten vorgeschrieben. Als extrem gefährdet gelten vor allem so genannte „trailer homes“, größere Wohnwagen, die vielen Menschen in den USA als Dauerbehausung dienen. Der Kraft eines Tornados haben solche Bauten nichts entgegenzusetzen. Im Auge des Sturms fällt der Luftdruck so stark, dass in den relativ luftdicht abgeschlossenen Gebäuden ein gewaltiger Überdruck entsteht. Mit einer Tonne pro Quadratmeter drückt dieser von innen gegen Wände und Fenster.

Im schlimmsten Fall können die Häuser dadurch regelrecht explodieren. Umherliegende Bruchstücke werden dann zu tödlichen Geschossen, aber auch vermeintlich ungefährliche Gegenstände wie beispielsweise Getreidehalme oder Blätter können regelrecht zu Speerspitzen werden und Menschen schwer verletzen. Die größten Schäden entstehen jedoch durch die enorme Kraft des Windes. Meist hebt er die Hausdächer ab und dadurch fallen auch die Wände der Häuser um.



Oben: Die Schneise eines Tornados ist so klar abgegrenzt, dass Gebäude in nur 100 Metern Entfernung oft unbeschädigt bleiben.
Unten: Diesen Pfad der Verwüstung hinterließ ein Tornado der Stärke F4 in La Plata, Maryland, am 28. April 2002.
© MMCD NEW MEDIA; NASA/GSFC





Wie aus heiterem Himmel

Obwohl zerstörerische Tornados vor allem aus Nordamerika bekannt sind, gibt es sie auch in Mitteleuropa. Hier werden sie oft als Trombe oder Windhose bezeichnet. Meteorologen verwenden diese Begriffe aber seit einigen Jahren nicht mehr im offiziellen Sprachgebrauch, weil sie die wirkliche Tornadogefahr, die es definitiv auch bei uns gibt, verharmlosen. Denn zwischen den Tornados in Nordamerika, Europa oder anderen Regionen der Welt besteht weder im Hinblick auf ihre physikalische Natur noch auf ihre Stärke ein Unterschied – sie treten nur unterschiedlich häufig auf. Während es in Deutschland pro Jahr etwa 30 Tornados gibt, sind es in den USA über 1.000 – davon allein rund die Hälfte entlang der berüchtigten „Tornado Alley“, die sich von Texas nach Oklahoma, Kansas und Nebraska erstreckt.

In Europa melden „Tornadojäger“ heute rund 170 solcher Stürme pro Jahr, hinzu kommen etwa 160 Wasserhosen – Tornados, die sich über Wasserflächen bilden und nicht auf das Festland übergehen. Wissenschaftler vermuten allerdings eine „Dunkelziffer“ von jährlich rund 300 unentdeckten Tornados und 400 Wasserhosen. Die meisten dieser Ereignisse sind von geringer bis mittlerer Intensität. Aber auch Tornados der hohen Intensitätsstufen F4 und F5 hat es in Deutschland schon gegeben. So raste im Sommer 1968 ein Tornado der Stufe F4 durch Pforzheim und hinterließ zwei Tote, 200 Verletzte und einen Sachschaden von über 70 Millionen Euro.

Weil Tornados oft sehr kleinräumig sind und auch extrem schnell entstehen können, lassen sie sich nur schwer vorhersagen oder erfassen. Erst seit den 1980- und 1990er Jahren ist das Wetterradarnetz in Europa überhaupt engmaschig genug, um sie registrieren zu können. Oft sind die Meteorologen anhand der Wetterlage durchaus in der Lage vorherzusagen, dass „Tornadowetter“ herrscht. Wo und wann genau sich einer dieser Wirbelstürme bildet, wie stark er sein wird und welchen Weg er einschlägt, merken jedoch auch sie meist erst, wenn er bereits unterwegs ist.

Die Tornadowarnungen laufen in drei Stufen ab. Stufe eins bedeutet „geringe Unwettergefahr“, sie ist die schwächste und am häufigsten ausgerufene Warnstufe. Bei der zweiten Warnstufe wird von einem „mäßigen“ Unwetterrisiko ausgegangen. Bei der dritten Warnstufe schließlich besteht hohes Unwetterrisiko. Zum besseren Schutz der Bevölkerung und zur Begleitung von Warnungen hat die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der USA ein Wetterradio entwickelt, das sich automatisch anschaltet und die Menschen alarmiert, sobald eine Warnung ausgegeben wird.

Zur Beobachtung und Erkennung einer „Tornado-Lage“ ist ein Dopplerradar das beste Hilfsmittel. Mit ihm können Windbewegungen zum Radar hin oder vom Radar weg erkannt und frühzeitig stärker rotierende Luftbewegungen identifiziert werden. Darüber hinaus sind diese Geräte so programmiert, dass sie bei

Links: Helfer und Überlebende suchen im Mai 1999 in den Trümmern der verheerenden Tornadoserie von Oklahoma (oben). Das Sofa war alles, was von diesem Haus übrig blieb (unten). © FEMA/Andrea Booher; Bob McMillan



Dieses Radarbild zeigt den „Supercellstorm“, der die Tornadoserie vom Mai 1999 in Oklahoma verursachte.

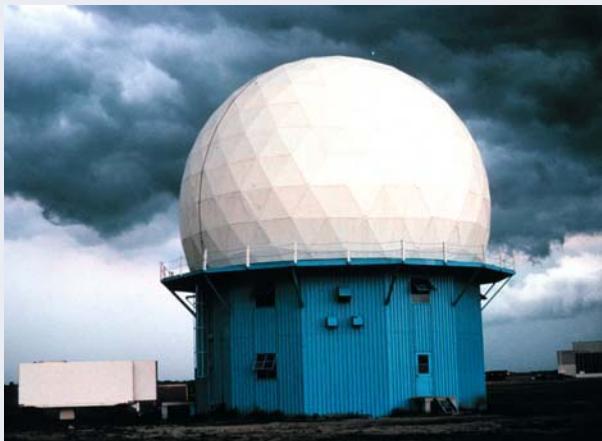
© NOAA

gefährlichen Wetterentwicklungen selbstständig Alarm geben. Wie ein Netz über die gefährdeten Gebiete verteilten Radarstationen senden Wellen aus, die in Abhängigkeit von der Zugrichtung des Niederschlags mit unterschiedlichen Frequenzen wieder reflektiert werden. Das Dopplerradar kann diese Frequenzunterschiede erkennen und dadurch Windrichtung und Stärke von Windfeldern darstellen. Zusätzlich werden auch mobile Messwagen mit modernsten Messinstrumenten eingesetzt. Die so genannten „Stormchaser“ fahren, sobald die Radarstationen einen Tornado ausgemacht haben, so dicht wie möglich an den Wirbelsturm heran und sammeln genauere Informationen über die rapide wechselnden Druck- und Windverhältnisse. Alle Daten laufen in einem Vorhersagezentrum ein. Dort wird auch entschieden, wann für welches Gebiet eine offizielle Tornadowarnung ausgesprochen wird.

Zahlreiche Wissenschaftler arbeiten heute fieberhaft an der Verbesserung von Mess-, Erkennungs- und Vorhersagemethoden für Tornados. Aufgrund ihrer schnellen Entwicklung gibt es jedoch so gut wie keinen absoluten Schutz vor diesen Naturereignissen. Jedes Jahr gibt es daher immer einige Tornados, die buchstäblich „aus heiterem Himmel“ auftauchen und Meteorologen und Bewohner der betroffenen Gegend gleichermaßen überraschen. Vermeintlich sichere, selbst gebaute Bunker oder Keller halten oft einem Tornado nicht stand. Zentrale, sichere Schutträume können oft aus Zeitgründen nicht aufgesucht werden. Zu kaufen gibt es so genannte „Minischutzbunker“, die auch noch nachträglich in ein Haus eingebaut werden können.

Konstante Überwachung der Wetterbedingungen, auch per Dopplerradar (links), ist die wichtigste Voraussetzung für die Tornadovorhersage. Ist der Tornado schon da, können Schutzkeller Leben retten.
© NOAA; FEMA

Wie schon in den USA hat sich inzwischen auch in Europa die Tornadobebachtung durch Freiwillige ausgebreitet. Dadurch – und vor allem durch die zunehmende Verbreitung des Internets sowie der digitalen Fotografie – wurden in den letzten zehn Jahren vor allem schwache Tornados häufiger gemeldet als früher. Inwieweit auch die Tornadohaufigkeit vom Klimawandel beeinflusst wird, ist bisher nicht geklärt.





Eine Gruppe von Superzellstürmen über Kanada. Stürme wie diese entstehen an der Grenze von Warm- und Kaltluftmassen und erzeugen oft auch Tornados. © NASA/GSFC



Sturmflut – Küsten in Gefahr

Eine Spur der Verwüstung:
Sturmfluten gehören zu den
teuersten und gefährlichsten
Naturkatastrophen. © FEMA/
Jocelyn Augustino

Der Sturm brüllt, meterhohe Wellen türmen sich auf – die Flut kommt. Schon seit Menschengedenken sorgen Sturmfluten bei den Küstenbewohnern weltweit für Angst und Schrecken. Immer wieder haben die aufgewirbelten Wassermassen der Ozeane und Binnenmeere hunderttausende von Todesopfern gefordert und Sachschäden in Milliardenhöhe verursacht.

So wie im November 1970, als ein Zyklon Bangladesch – damals noch Ostpakistan – und Indien eine der größten Sturmflutkatastrophen aller Zeiten bescherte. Bis zu zehn Meter hohe Wellen überrollten damals die flachen Küsten neben den Ländern und setzten riesige Flächen unter Wasser. 300.000 in Bangladesch und 500.000 Menschen in Indien – so genau weiß das niemand – sollen in dem tosenden Inferno gestorben sein. Und nur gut 20 Jahre später, im Jahr 1991, schlug in Bangladesch erneut eine Sturmflut zu. Und wieder war es eine verhängnisvolle Kombination aus Zyklon und riesigen Wellen, die fast 140.000 Einheimischen das Leben kostete. Die Gesamtschäden lagen bei rund drei Milliarden US-Dollar. Während die Menschen dort und in vielen anderen Entwicklungsländern solchen Launen der Natur auch heute noch weitgehend schutzlos ausgeliefert sind, überzieht in zahlreichen anderen Staaten der Erde mittlerweile ein ausgeklügeltes Schutz- und Warnsystem die sturmflutbedrohten Regionen. Doch trotz aller Deiche, Sperrwerke oder Barrieren ist auch hier die Gefahr durch Sturm-

fluten noch längst nicht endgültig gebannt. Denn wenn Hurrikans, Taifune oder andere Stürme die Wassermassen des Meeres gegen die Küsten drücken, bieten selbst modernste Hightechbauwerke keine endgültige Sicherheit gegen das tobende Meer.

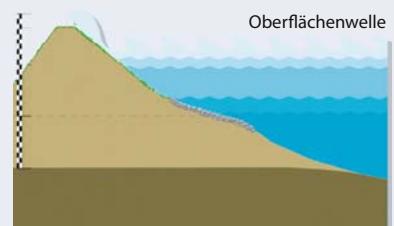
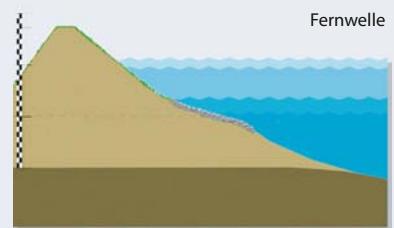
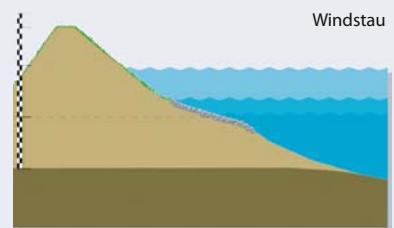
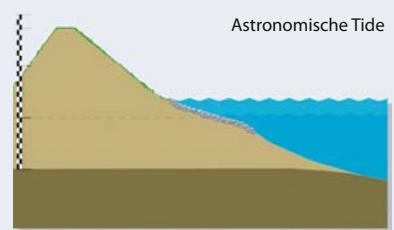
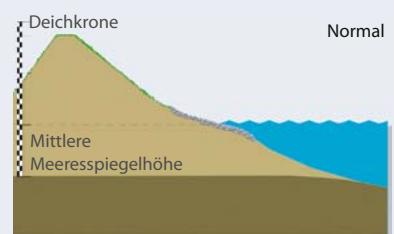
Und auch ein Blick in die Zukunft verheißt nichts Gutes. Denn durch den drohenden Klimawandel wird das Risiko für starke Stürme und damit auch für Sturmfluten in Zukunft noch weiter steigen. Doch damit nicht genug: Denn der von der globalen Erwärmung ausgelöste Meeresspiegelanstieg könnte die Situation in den nächsten Jahrzehnten vermutlich zusätzlich verschärfen. Gerade Länder mit flachen Küsten wie die Niederlande oder eben auch Bangladesch wären dann erheblich stärker gefährdet als ohnehin schon. Während Industrieländer auf diese neue Situation mit besserem Küstenschutz reagieren könnten, wären die ärmeren Staaten der Erde wie so oft die Leidtragenden. Denn dort fehlen die finanziellen Mittel, um neue, höhere Deiche oder andere Schutzbauten gegen die Wasserfluten zu bauen.

Und noch ein Aspekt macht den Sturmflutexperten und großen Versicherungen wie der Münchener Rück Sorgen: die Bevölkerungsexplosion in den Küstenregionen – vor allem in den Entwicklungsländern. Schon heute leben 40 Prozent aller Menschen auf der Erde in diesen meist fruchtbaren Gebieten, im Jahr 2030 werden es sogar zwei Drittel der Weltbevölkerung sein. Einige Wissenschaftler rechnen deshalb künftig bei Sturmfluten mit viel größeren Sachschäden – und mit noch mehr Todesopfern.

Flut ist nicht gleich Flut

Eine Flut ist eigentlich die normalste Sache der Welt. Zumindest an der Nordsee, aber auch am Atlantik und in vielen anderen Regionen der Welt. Etwa alle zwölf Stunden melden hier die Pegel der Messstationen die höchsten Stände beim Gezeitenhochwasser. Anschließend läuft das Wasser wieder ab, bis schließlich Ebbe herrscht. Bei diesem ewigen Wechselspiel schwankt der Wasserspiegel an der Nordsee um rund zwei bis vier Meter, an der kanadischen Bay of Fundy kann der so genannte Tidenhub jedoch auch schon mal unglaubliche 16 Meter betragen. Wann jedoch kommt dieser Routinebetrieb, der maßgeblich durch die Anziehungskräfte von Sonne und Mond gesteuert wird, aus dem Rhythmus? Warum verwandelt sich die Nordsee zum tobenden Meer, das Deiche und Menschen, ja ganze Küstenregionen verschlingt?

Meist ist ein Sammelsurium an „Mitspielern“ nötig, um aus einer normalen Flut eine Sturmflut werden zu lassen. Dazu gehören neben den Gezeiten unter anderem der Luftdruck oder auch die Küstenform. Trotzdem lässt sich die Suche nach den Ursachen eines solchen Naturereignisses auf eine ebenso einfache wie allgemeingültige Formel bringen: ohne Wind keine Sturmflut. Er muss nur stark genug sein und aus der „richtigen“ Richtung wehen, damit die Wassermassen auf das Festland oder die Inseln zurollen. An der Nordsee sind es vor allem die Nord-,



Die Höhe des Wasserstaus hängt vor allem von Dauer und Intensität des Winds ab. Fern- und Oberflächenwellen können sie verstärken. © MMCD NEW MEDIA

Nordwest- und Westwinde, die zur Gefahr werden können, weil sie mitunter einen enormen Wasserberg vor sich auftürmen. Wie hoch dieser so genannte Windstau schließlich wird, hängt entscheidend von der Dauer eines Sturmes ab und von der Meeresstrecke, über die er weht. Immer wenn sich ein mächtiger Windstau und die normale Gezeitenflut zusammentun und zeitgleich auf die Küste treffen, steigt der Wasserspiegel viel höher als sonst – eine Sturmflut droht.

Ein „Wörtchen mitreden“ können bei einer solchen Naturkatastrophe darüberhinaus auch Stürme und Tiefdruckgebiete weit draußen auf dem offenen Ozean. Denn sie erzeugen zusätzliche Wasserberge, die als so genannte Fernwellen die Küsten erreichen und die Wasserstände am Deich um bis zu 80 Zentimeter weiter in die Höhe treiben. Die vom Wind erzeugten Oberflächenwellen tun dann ein Übriges, dass die aufgewühlte Nordsee, der „Blanke Hans“, die Deiche auf die Probe stellt. Treffen Windstau, Fernwelle und Oberflächenwellen dann noch mit einer besonders hohen Gezeitenflut, einer Springflut, zusammen, sind sogar alle Voraussetzungen für eine Rekordflut gegeben.

*Überflutete Straße in Hamburg-Wilhelmsburg nach der Sturmflut am 16. Februar 1962.
© Gerhard Pietsch/Public domain*



An der schleswig-holsteinischen Nordseeküste spricht man von einer schweren Sturmflut, wenn das Wasser um zwei Meter höher steigt als beim normalen Tidehochwasser. Melden die Pegel sogar drei Meter über normal, handelt es sich sogar um eine sehr schwere Sturmflut.

„Land unter“ in Hamburg

16. Februar 1962. Über der Nordsee tobt seit Stunden ein heftiger Sturm mit Orkanböen, in immer mehr Orten entlang der schleswig-Holsteinischen Küste wird Katastrophenalarm ausgelöst. Doch Hamburg, die Metropole an der Elbe, wähnt sich in Sicherheit – noch. Die Stadt liegt immerhin 80 Kilometer von der Elbmündung entfernt landeinwärts. Was soll hier passieren? Die letzte große Sturmflut liegt schließlich mehr als 130 Jahre zurück und damals war auch nur ein Außenbezirk der Stadt betroffen. Und Wasserstände von mehr als fünf Metern über Normalnull hat es seit Mitte des 19. Jahrhunderts nicht mehr gegeben.

Doch dieses Mal ist alles anders: Unerbittlich drückt der Sturm die Wassermassen der Nordsee in die Elbe hinein. Mit anschwellender Flut verschärft sich die Lage dramatisch. In Cuxhaven, an der Elbmündung, fällt der Pegel aus, der Wasserstand kann nur noch geschätzt werden. Eines ist klar: Auch Hamburg gerät jetzt in Gefahr. Das Wasser steigt weiter mit rasender Geschwindigkeit: Um 22:30 Uhr erreicht der Pegel der Elbe 2,60 Meter über Normalnull, nur 15 Minuten später zeigen die Messungen schon 2,85. Um 23:00 Uhr ist

es dann so weit: Der Ausnahmezustand wird verhängt. Verzweifelt versuchen Hilfskräfte, sich mit Sandsäcken gegen die Fluten zu stemmen. Meist allerdings genau an den falschen Stellen. Schuld daran sind Fehlinformationen oder schlicht mangelnde Anweisungen.

Doch es ist ohnehin längst zu spät. Alle Anstrengungen und Maßnahmen nutzen nichts mehr: Jetzt rächt sich, dass der Hochwasserschutz in Hamburg jahrelang vernachlässigt worden ist und man auf die trügerische Sicherheit vertraut hat. Es dauert nicht lange, bis die Deiche dem Ansturm der Wassermassen nicht mehr standhalten können und nachgeben. Um 00:40 Uhr bricht schließlich das Bollwerk an der alten Süderelbe bei Neuenfelde – das Wasser flutet in die ersten Vororte. Im zuständigen Katastrophenstab jagt jetzt eine Horrormeldung die andere. Moorfleet, Stillhorn, Wilhelmsburg: Immer mehr Deiche kollabieren.

Die meisten Hamburger werden von der Flut im Schlaf überrascht. Viele haben die Sturmflutwarnungen zwar mitbekommen, aber nicht ernst genommen. Schließlich war ja immer von der Nordseeküste die Rede und nicht von Hamburg. Um 02:00 Uhr nachts erwischte es schließlich den nördlichen Deich des Stadtteils Wilhelmsburg. In rasender Geschwindigkeit strömen die Wassermassen durch die neu entstandene Lücke im Schutzwall und die Elbinsel versinkt im tosenden

1953 lässt eine Sturmflut in den Niederlanden zahlreiche Deiche brechen und überflutet weite Bereiche des Landes. Sie gibt den Anstoß für den Ausbau des Sturmflutschutzes. © Technisches Hilfswerk



Wenn die Nordsee zum Killer wird – schwere Sturmflutkatastrophen an der Nordseeküste

17. Februar 1164

Die Julianenflut, die erste historisch belegte Sturmflut im Bereich der Nordseeküste, sorgt nicht nur in Niedersachsen, sondern auch in vielen anderen Regionen für gewaltige Schäden. Mindestens 20.000 Menschen kommen vermutlich in den Wassermassen um. Zwischen Wilhelmshaven und der Jademündung leitet die Naturkatastrophe auch die Entstehung des Jadebusens ein.

16. Januar 1219

In Westfriesland auf dem Staatsgebiet der heutigen Niederlande wütet die Erste Marcellusflut besonders schlimm. Dort und in anderen Regionen der Nordseeküste sind nach zeitgenössischen Schätzungen mindestens 36.000 Todesopfer zu beklagen.

14. Dezember 1287

Rund 70 Jahre später schlägt der Blanke Hans erneut zu. Die Luciaflut verwüstet große Teile der deutschen Nordseeküste. Mindestens 50.000 Tote und riesige Landverluste sind die Folge. Deshalb flüchten viele Überlebende der Katastrophe anschließend aus den extrem gefährdeten Marschen ins sichere Hinterland.

15. bis 17. Januar 1362

Drei Tage lang sorgt die Zweite Marcellusflut oder Erste Grote Mandränke für Angst und Schrecken an der Nordseeküste. Bei der schweren Sturmflut verschwinden an den nur unzureichend geschützten Küsten des heutigen Bundeslandes Schleswig-Holstein ganze Dörfer und Städte wie Rungholt von der Landkarte. Als Folge von zahlreichen Deichbrüchen kommen rund 100.000 Menschen ums Leben und vielerorts erobert das Meer riesige Marschflächen.

1. November 1436

Die Allerheiligenflut im Jahr 1436 führt im gesamten Bereich der Deutschen Bucht zu schweren Schäden und auch auf Inseln wie Sylt werden ganze Orte von den Wassermassen dem Erdboden gleich gemacht. Als Reaktion darauf gründen die Überlebenden der Katastrophe neue Siedlungen wie beispielsweise Westerland.

1. November 1570

Zahlreiche zerstörte Deiche von den Niederlanden bis Dänemark und mindestens 10.000 Tote allein in Ostfriesland sind die Bilanz der nächsten schweren Allerheiligenflut im Jahr 1570.

11. Oktober 1634

Die Zweite Grote Mandränke sorgt im ganzen deutschen Nordseeraum für zahlreiche Todesopfer und gewaltige Schäden. Besonders schlimm betroffen von der auch Burchardiflut genannten Naturkatastrophe ist Nordfriesland, wo allein fast 10.000 Menschen in den Wassermassen ums Leben kommen.



24. und 25. Dezember 1717

Ein schwerer Nordweststurm ist die Ursache für die Weihnachtsflut im Jahr 1717, die alle Küsten zwischen Dänemark und den Niederlanden heimsucht. Neben katastrophalen

© Adrian Pingstone/Public domain; Technisches Hilfswerk

Landverlusten in den Küstenmarschen sind auch mindestens 12.000 Tote zu beklagen. Tausende von Menschen werden obdachlos und fast 20.000 Tiere sterben allein in Ostfriesland in den Fluten.

3. und 4. Februar 1825

Bei der so genannten Halligflut im Jahr 1825 melden die Pegel fast überall an der deutschen Nordseeküste die höchsten bis dahin jemals gemessenen Wasserstände. Da die Deiche durch die vorhergehenden Winterstürme arg in Mitleidenschaft gezogen sind, können sie der Kraft der Wassermassen nicht standhalten und brechen vielerorts. Rund 800 Küstenbewohner kommen dabei ums Leben. Besonders schlimm betroffen von der Sturmflut sind die Halligen, wo allein 74 Menschen sterben.

13. März 1906

Alle bis dahin gültigen Rekordwasserstände übertrifft diese Sturmflut in Friesland. In Dangast beispielsweise steigen die Pegel auf weit über fünf Meter über Normalnull.



1. Februar 1953

Die Sturmflut von 1953, die erstaunlicherweise die deutsche Nordseeküste fast völlig verschont, sorgt in den Niederlanden für mehr als 1.800 Todesopfer. Der Grund: Ein großer Teil des Staatsgebiets liegt unterhalb des Meeresspiegels und ist damals durch Deiche und andere Maßnahmen nur halbherzig geschützt.

16. und 17. Februar 1962

200 Millionen Kubikmeter Wasser strömen bei der schweren Hamburger Sturmflut in die Marschen des Alten Landes oder Hamburg-Veddels und in das Stadtgebiet selbst. Mehr als 15 Prozent von Hamburg melden am Ende „Land unter“. Dabei sind 317 Toten beklagen.

3. Januar 1976

Der Orkan Capella ist es, der am 3. Januar 1976 in vielen Regionen der Nordseeküste für eine „Jahrhundertflut“ sorgt. Die Pegel erreichen neue Rekordstände. Obwohl fast alle Deiche der Wucht der Wellen standhalten, werden allein in Deutschland tausende Hektar Land überschwemmt. Auch Dänemark hat unter dem Orkan und der Flut zu leiden. So müssen beispielsweise die Städte Tondern und Ribe evakuiert werden.

8. und 9. November 2007

Die schwerste Sturmflut seit knapp 20 Jahren setzt in Hamburg Teile der Speicherstadt und von Altona unter Wasser. Auch auf den Ostfriesischen Inseln reißt der Blanke Hans Dünien ein und auf Helgoland gehen zehntausende Kubikmeter Strand verloren. In den Niederlanden müssen zum ersten Mal alle großen Sturmflutwehre geschlossen werden. Und in Großbritannien macht das Thames Barrier die Schotten dicht.



Inferno. Die Bewohner haben kaum eine Chance, zu entkommen. Innerhalb kürzester Zeit sterben allein hier 200 Menschen. Aber auch andere Stadtteile, darunter Georgswerder, Stillhorn, Waltershof und die Marschlande melden Land unter. Weite Teile der Stadt sind von der Außenwelt abgeschnitten, Straßen, Bahnstrecken sind überspült, Strom- und Telefonleitungen tot.

Um 03:30 Uhr ist endlich der Höhepunkt der Flut erreicht. Danach beginnt das Wasser langsam wieder zu fallen – doch für Hamburg und seine Bewohner ist die Katastrophe längst perfekt. Die Bilanz der Sturmflut ist ernüchternd: 60 Deiche sind von den Fluten weggerissen oder überströmt worden, ein Sechstel des Stadtgebiets steht unter Wasser. Mehr als 30.000 Hamburger haben ihre Wohnung verloren und müssen in Turnhallen und anderen Notunterkünften Zuflucht suchen. 100.000 weitere Bewohner der Großstadt sind vom Wasser eingeschlossen und harren mit durchnässten Kleidern bei eisiger Kälte auf Dächern, Anhöhen oder in den oberen Stockwerken ihrer Häuser aus – ohne Trinkwasser, Nahrung oder wärmende Decken. Für 317 Menschen jedoch kommt jede Hilfe zu spät – ihnen wird die Sturmflut zum Verhängnis.

Hurrikan „Ike“ überflutet Galveston

Doch längst nicht immer sind es Küsten mit Gezeiten, an denen sich solche dramatischen Naturereignisse abspielen. Anfällig für Sturmflutkatastrophen sind auch golfartige Meere, trichterartige Flussmündungen oder lang gestreckte Seen, wo das vom Wind aufgeschobene Wasser nicht zur Seite oder nach unten ausweichen kann. Im flachen Wasser des Golfs von Bengalien beispielsweise staut sich das Wasser bei einem Sturm besonders hoch auf und überschwemmt leicht die niedrigen Küstengebiete. Und auch die US-amerikanische Golfküste gehört – vor allem bei heftigen tropischen Wirbeltürmen – zu den besonders sturmflutgefährdeten Regionen der Erde. Das hat sich zuletzt am 12. September 2008 gezeigt.

Die Stadt Galveston im US-Bundesstaat Texas. Nur noch Stunden sind es, bis der Hurrikan „Ike“ mit Windgeschwindigkeiten von über 200 Kilometer pro Stunde auf das Festland treffen wird. Doch schon jetzt hält ein anderes Naturereignis die Region in ihrem Bann. Denn die gewaltigen Wassermassen, die „Ike“ vor sich hertreibt, lauern bereits vor der Küste und drohen weite Regionen zu überschwemmen. Betroffen von der drohenden Sturmflut ist ein rund 500 Kilometer breiter Küstenabschnitt von Louisiana bis Texas. Doch in der Bucht von Galve-

Rungholt – Atlantis der Nordsee

Ob Atlantis oder Vineta – Legenden von Orten, die im Meer versanken, haben bis heute nichts von ihrer Faszination verloren. Eine davon, die Geschichte von Rungholt, spielte sich – vermutlich im 14. Jahrhundert – direkt vor unserer Haustür ab, in der Nordsee.

Der Sage nach wurde die reiche, aber sündige Stadt von einer gewaltigen Flut als „Gottesgericht“ in den Untergang gerissen. Bis heute ist allerdings weder klar, wo Rungholt genau lag, noch ob es tatsächlich eine wohlhabende Stadt oder gar ein bedeutender Handelshafen war. Der Dichter Detlev von Liliencron griff dennoch 1882 die Geschichte auf und

machte daraus das bis heute berühmte Gedicht „Trutz, Blanke Hans“. In ihm heißt es unter anderem:

„Ein einziger Schrei – die Stadt ist versunken,
und Hunderttausende sind ertrunken.
Wo gestern noch Lärm und lustiger Tisch,
schwamm anderen Tags der stumme Fisch.

Heut bin ich über Rungholt gefahren,
Die Stadt ging unter vor fünfhundert Jahren.

Trutz, Blanke Hans“

Überschwemmung auf der Bolivar-Halbinsel in der Nähe von Galveston, Texas, nach Hurrikan „Ike“. © U.S. Air Force/Wally Bacio





Land unter in Galveston/Texas nach Hurrikan „Ike“ 2008.
© U.S. Navy/Gina Wollman

ston und auf der nahe gelegenen Bolivar-Halbinsel wütet das Meer am heftigsten. Hier erreichen die Pegel Werte von bis zu sechs Metern über normal. Trotz aller Warnungen von Meteorologen und Politikern, die den Bewohnern Galvestons bei einem Bleiben den sicheren Tod ankündigen, haben sich viele Menschen aus Sorge um ihr Hab und Gut der Evakuierung widersetzt. Sie warten in ihren Häusern auf die Sturmflut.

Um 16:00 Uhr Ortszeit ist es schließlich so weit: Die Wellen überspülen das wichtigste Bollwerk der Stadt, den mehr als fünf Meter hohen Galveston Seawall, und bahnen sich ihren Weg in die Straßen und Häuser. Am Ende stehen unter anderem das Courthouse und die Universität von Texas zum Teil Meter hoch unter Wasser. Per Heliokopter werden unzählige Menschen noch in letzter Sekunde aus der Gefahrenzone in Sicherheit gebracht. Das ganze Ausmaß der Katastrophe – hier und in anderen Regionen der Golfküste – wird erst sichtbar, nachdem sich auch „Ike“ ausgetobt hat. Riesige Gebiete sind überschwemmt, tausende Gebäude zerstört oder stark beschädigt, hundertausende Bewohner der Region müssen ohne Strom und fließendes Wasser auskommen. Mobile Einsatzkommandos der Armee durchkämmen die Trümmer, um nach Überlebenden und Opfern zu suchen. Am Ende sind durch den Hurrikan und die Sturmflut 86 Menschen ums Leben gekommen, die Gesamtschäden liegen bei 15 Milliarden US-Dollar. Damit wird „Ike“ nach Angaben der Münchener Rück zur teuersten Naturkatastrophe für die Versicherungswirtschaft im Jahr 2008.

Rechts: Ein Fallschirmspringer der U.S. Air Force tröstet eine Bewohnerin nach der Sturmflut in Galveston 2008 (oben). Die Flut überschwemmte weite Teile der Stadt (unten). © U.S. Air Force/James L. Harper Jr.





Durch Sturmfluten entstanden: Satellitenaufnahme des Jadebusens und der Wesermündung mit Bremerhaven (oben rechts) und Wilhelmshaven (oben links). © NASA/Worldwind

Wie Jadebusen und Dollart entstanden

Sturmfluten versetzen aber nicht nur – wie an der Golfküste – Menschen in Angst und Schrecken, oft hinterlassen sie auch bleibende Spuren an den betroffenen Küsten. Die Wucht der Wellen und Wassermassen trägt Strände ab, zerschlägt Dünens oder Steinklippen und verändert dadurch die Form der Küstenlinie. So leitete beispielsweise die Julianenflut vom 17. Februar 1164 die Entstehung des Jadebusens zwischen der Wesermündung und Ostfriesland ein. Gut 100 Jahre später führte die schwere Sturmflut von 1287 dann dazu, dass an der Nordseeküste südlich von Emden eine riesige Bucht entstand, der Dollart.

Heute sind solche gravierenden Veränderungen der Küsten zumindest in Europa eher die Ausnahme. Mehr als 600 Jahre intensiver Küstenschutz haben dazu geführt, dass das Festland und auch Großstädte wie Hamburg mittlerweile fast überall gut befestigt sind. Dafür kämpfen die vorgelagerten Inseln in Nord- und Ostsee bei Sturmfluten umso mehr ums Überleben.

Helgoland und die Halligen haben beispielsweise im Laufe der Zeit deutlich an Größe eingebüßt. Kritisch ist die Lage auch auf der Nordseeinsel Sylt. Sie verliert immer wieder einen Teil ihrer westlichen Strände. Das Wasser frisst sich inzwischen manchmal sogar bis zu den ersten Küstenorten vor. Jährlich müssen die Sylter Behörden daher rund drei bis vier Millionen Euro für Sandvorspülungen ausgeben, um die Schäden durch Sturmfluten oder Wind wieder zu beseitigen.

Dass das beliebte Urlaubsziel Sylt besonders gefährdet ist, hat auch mit den geologischen Bedingungen vor Ort zu tun. Denn im Gegensatz zu den meisten anderen Nordfriesischen Inseln ist Sylt nicht von schützenden Sandbänken umgeben, die verhindern, dass die Wellen ungebremst gegen die Westküste prallen. Auch in dieser Hinsicht versuchen Küstenplaner bereits seit Anfang der 1980er Jahre, Abhilfe zu schaffen. Sie leiten Sand in die tieferen Rinnen vor der Küste ein, um das Relief auszugleichen und die Brandungsenergie zu verringern. Ohne das Anlegen künstlicher Sandbänke vor der Westküste wird Sylt aber vermutlich auf Dauer den Kampf gegen das Meer und die Sturmfluten verlieren. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Insel ohne zusätzlichen Schutz zunächst im Laufe der Zeit immer schmäler wird und schließlich in mehrere Teile zerbricht.

Bollwerke gegen die Flut

Doch Maßnahmen wie auf Sylt sind eher die Ausnahme als die Regel beim Küstenschutz. Das wichtigste Bollwerk gegen Sturmfluten sind noch immer Deiche. Schon vor mehr als 1.000 Jahren gab es die ersten dieser „Klassiker“ unter den Schutzbauten. Bei den so genannten Wurten oder Warften handelte es sich um künstliche, vier bis fünf Meter hohe Erdhügel, auf denen Siedlungen angelegt wurden. Sie entstanden beispielsweise auf den Halligen.

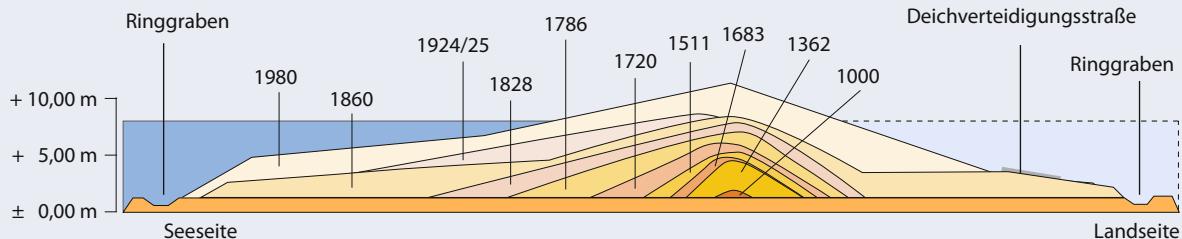
Erst im Spätmittelalter wurden dann die ersten richtigen Deiche gebaut. Sie waren zunächst jedoch noch viel zu niedrig, um die Sturmfluten aufzuhalten. So kamen in der ‚Groten Mandränke‘ von 1362 und bei der „Burchardiflut“ von 1634 trotz der Deiche tausende von Menschen um; weite Küstenbereiche und ganze Inseln verschwanden im Meer. Deshalb wurden die Deiche seitdem immer wieder verstärkt und erhöht, um den Schutz der dahinterliegenden Küstengebiete zu verbessern.

Die modernen Hightechdeiche sind mittlerweile 80 bis 100 Meter breit und acht oder mehr Meter hoch und erinnern nur noch entfernt an die ersten Versuche der Menschen, Sturmfluten in Schach zu halten. Als Planungsgrundlage für die neuen Bauwerke gelten die Höchstwasserstände, die durch die astronomische Tide, den Windstau sowie Fern- und Oberflächenwellen verursacht werden. Auch der vorhergesagte Meeresspiegelanstieg fließt längst in die Planungen mit ein. Der Deich besteht aus einem Sandkern, auf den eine meterdicke Schicht aus Klei, einem schweren, tonigen Boden, aufgetragen wird. Als Abschluss des Bauwerkes dient eine dichte Grasdecke, die verhindert, dass Wind und Wasser den Boden abtragen. Wenn der Deich fertig ist, sorgen schließlich lebende „Rasenmäher“ in



Nicht immer können Deiche den Wassermassen einer Sturmflut standhalten, wie hier auf Haiti nach Hurrikan „Ike“ im September 2008. © U.S. Navy/Gina Wollman

Entwicklung des Deichbaus bis heute. Moderne Deiche sind Bauwerke aus mehreren Schichten und mit unterschiedlich steilen Seiten.
© MMCD NEW MEDIA



Könige des Küstenschutzes – die Niederlande und das Deltaplan-Projekt

Weltweiter Vorreiter in Sachen Sturmflutschutz sind seit einiger Zeit die Niederlande. Rund ein Fünftel ihres Staatsgebiets liegt unter dem mittleren Meeresspiegel und insgesamt 60 Prozent haben weniger als einen Meter über Normalnull. Selbst ein moderater Meeresspiegelanstieg in den nächsten 100 Jahren könnte ohne ausreichendes Schutzsystem das Bestehen des ganzen Landes gefährden. Im Rahmen des Deltaplan-Projektes, das nach der verheerenden Sturmflut von 1953 ins Leben gerufen wurde, ließ die niederländische Regierung daher den gesamten Mündungsbereich von Rhein, Maas und Schelde durch Sperrwerke und Dämme von der Nordsee abriegeln. Alle Schutzbauten innerhalb des Deltaplan-Projektes sind so bemessen, dass sie selbst einer Jahrtausendflut oder einem deutlichen Meeresspiegelanstieg problemlos standhalten können. 4,5 Milliarden Euro haben sich die Niederländer diese Sicherung ihres Landes im Laufe von knapp 50 Jahren kosten lassen.

Berühmt geworden ist vor allem das Abschlusswehr an der Oosterschelde, das im Jahr 1986 fertiggestellt wurde. Dieses Sturmflutwehr besteht aus mehr als 60 gewaltigen Betonpfeilern, zwischen die bewegliche Stahlschütze befestigt wurden, die je nach Bedarf geöffnet oder geschlossen werden können. Um die notwendige Stabilität zu gewährleisten, ist das ganze System in einer Wassertiefe von zum Teil weit mehr als 40 Metern fest verankert.

Eines der letzten Mosaiksteinchen, das in das Hightech-Netzwerk eingefügt wurde, ist das Sturmflutwehr im Nieuwe Waterweg. Es sichert seit 1997 die Stadt Rotterdam und seinen Hafen vor Überschwemmungen. So hoch wie der Eifelturm und 15.000 Tonnen schwer: Jeder der beiden Arme ist ein Riese aus Stahl. Bei einer Sturmflutwarnung werden die beiden riesigen Tore in kürzester Zeit geschlossen und verhindern ein Eindringen der Wassermassen.





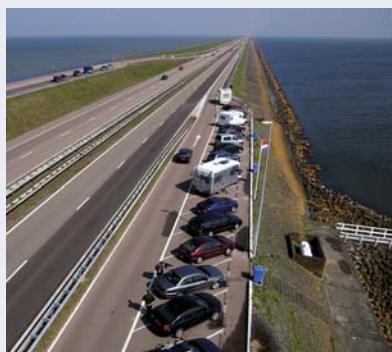
Form von Schafen dafür, dass die Grasnarbe nicht zu lang wird und sich der Boden verfestigt. Auf der Seeseite sind die meisten Deiche zudem extrem flach, um den Wellen viel von ihrer überschäumenden Wucht und Energie zu nehmen. Die Deichbasis wird dort zusätzlich mit Steinen oder Beton geschützt. Auch die Böschungen auf der Landseite steigen meist nur relativ sanft an, damit überschwappendes Wasser keine größeren Erosionsschäden anrichten kann. Die Deiche sind jedoch keineswegs so homogen, wie man vermuten könnte. Fast überall gibt es zahlreiche Öffnungen, die so genannten Siele, die einen Wasseraustausch zwischen Land und Meer ermöglichen. Bei Hochwasser oder Sturmfluten bleiben sie fest verschlossen, damit das Meerwasser nicht eindringen kann. Bei Ebbe jedoch wird das Land hinter dem Deich über die nun offenen Siele entwässert.

Wenn nun irgendwo eine neue Deichanlage entsteht, muss dieser „Deichprototyp“ an die Bedingungen vor Ort angepasst werden. Küstenverlauf und -aussehen berücksichtigen die Planer genauso wie die lokal unterschiedlichen Höchstwasserstände. Das Bollwerk wird dem zu schützenden Küstenabschnitt dabei quasi „auf den Leib“ geschneidert.

Gefährlich wird es selbst für die modernen Deiche – egal ob an Nord- oder Ostsee – noch immer, wenn eine schwere Sturmflut überströmt oder wenn Wellen über sie hinwegschwappen. Fast alle Deichbrüche entstehen dadurch, dass das eingedrungene Meerwasser den Boden von der Rückseite her aufweicht und abträgt. Ist der Deich bei einer Sturmflut erst einmal marode geworden, ist das totale Versagen, ein Deichbruch, oft nur noch eine Frage der Zeit.

Der Schutz von Mensch und Natur durch Deiche ist in Deutschland ein notwendiger, aber extrem teurer „Luxus“. Allein von 1962 bis zum Jahr 2006 haben Bund und Länder in Deutschland viele Milliarden Euro für die Erneuerung und Verbesserung des Deichsystems und anderer Maßnahmen ausgegeben. Kein Wunder,

*Oben: Sperrbauwerke der Superlativ: Der „Nieuwe Waterweg“ schützt Rotterdam vor der Sturmflut. Links: Der Abschlussdamm an der Oosterschelde gehört zum Deltaplan-Projekt, das große Teile der niederländischen Nordseeküste gegen Sturmfluten abriegelt.
© Ulrich Sauerland; Mannesmann Rexroth AG*



Abschlussdeich zwischen IJsselmeer und Nordsee. © Johann H. Addicks / GFDL

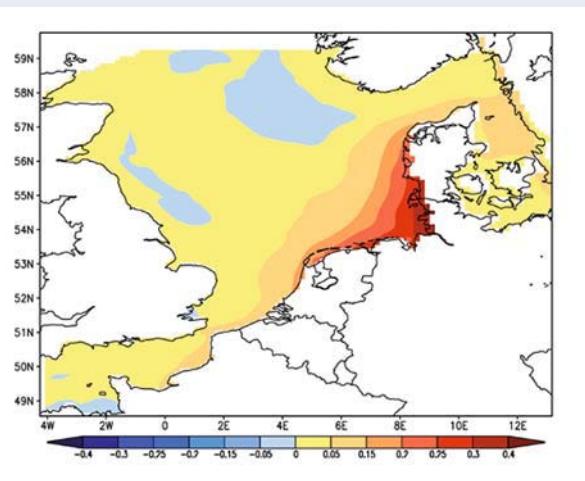
wenn man bedenkt, dass der Bau von zehn Meter neuem Deich in heimischen Gefilden 30.000 oder 40.000 Euro kostet – mindestens. Und auch jetzt fließen in Deutschland noch jährlich mindestens hundert Millionen Euro in diese Form des Küstenschutzes an Nord- und Ostsee. Doch längst nicht alle Regionen dort sind heute auch wirklich durch Deiche vor Sturmfluten abgeriegelt. In Schleswig-Holstein ist es gerade einmal ein Viertel der Küstenlinie. Anderswo übernehmen in Deutschland und anderen Ländern Dünens, Buhnen und Wellenbrecher, aber auch Sperrwerke wie an Eider oder Themse diese Aufgabe. Je nach Situation vor Ort setzen Küstenschützer diese Maßnahmen auch kombiniert ein, um einen optimalen Schutz gegen die Unbillen des Meeres zu erreichen. Für die industrialisierten Staaten wie Deutschland oder die Niederlande sind solche Maßnahmen finanziell, technisch und organisatorisch kein Problem, Länder wie Bangladesch oder die Inselstaaten des Pazifiks jedoch können sich solch einen Aufwand in der Regel nicht leisten.

Hinzu kommt: Nach Einschätzung des International Panel of Climate Change (IPCC) müssten weltweit mehr als 1.000 Milliarden US-Dollar aufgewendet werden, um sich gegen den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg von rund einem Meter bis 2100 und gegen die zunehmende Häufung von Stürmen ausreichend zu schützen. Allein für Deutschland rechnen Experten mit Kosten von immerhin noch einer Milliarde Euro. „Bis 2030 aber wird der derzeitige und jetzt geplante Küstenschutz ausreichend sein; danach muss die Situation von den Küstingenieuren neu bewertet werden; langfristig kann sich dabei auch die Notwendigkeit neuer Schutzstrategien ergeben“, wirft Professor Hans von Storch vom Institut für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrum Geesthacht einen Blick in die Zukunft.

Simulationen des Küstenklimas zeigen, dass sich der Klimawandel in Zukunft auch im Sturmflutgeschehen bemerkbar machen wird. So werden beispielsweise die Stürme über der Nordsee bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich heftiger.

Dies gilt insbesondere für den Wind aus West und Nord – also genau aus den Richtungen, aus denen Stürme die Wassermassen an die deutsche Nordseeküste drücken. Laut den Modellrechnungen könnten Sturmfluten deshalb in einigen Jahrzehnten etwa zehn bis 30 Zentimeter höher auflaufen, als dies gegenwärtig der Fall ist. Die Wissenschaftler vom GKSS gehen zudem davon aus, dass der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee bis zum Ende dieses Jahrhunderts um rund 50 Zentimeter zulegt. Sind die Simulationen der Klimaforscher korrekt, werden Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste deshalb voraussichtlich insgesamt rund 60 bis 80 Zentimeter höher ausfallen als heute. Doch das ist noch nicht alles: „Wir erwarten darüber hinaus, dass solche hohen Wasserstände in Zukunft auch häufiger auftreten und länger andauern als bisher“, so der GKSS-Forscher weiter.

Erwartete Änderung der jährlichen maximalen windbedingten Wasserstände zwischen 2071 und 2100 bei relativ starkem Treibhausgasanstieg. Einheit: Meter. © Woth, 2005



Sturmflutwarnung – wie geht das?

Im Gegensatz zu vielen anderen Katastrophen kommen Sturmfluten nicht „aus heiterem Himmel“. Sie sind sogar in den meisten Fällen sehr gut vorhersagbar. Dass dies rechtzeitig geschieht, dafür sorgen unter anderem die Wissenschaftler des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Sturmflutwarndienst am Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg. Vier Mal am Tag bespricht der diensthabende Wissenschaftler des BSH die Lage mit seinen DWD-Kollegen. Im Gepäck hat er hoch aufgelöste Windvorhersagen für die Zeiten von Hoch- und Niedrigwasser, die mit den aktuellen Pegelständen in die Berechnungen der Wasserstände einbezogen werden. Parallel dazu werden die Computermodelle ständig mit aktuellen Wetterdaten gefüttert.

Deuten alle Daten auf eine drohende Sturmflut hin, sind es die Wissenschaftler der Sturmwarnzentrale, die die offiziellen Warnungen verfassen und an die Medien weitergeben. Gewarnt wird ab einer vorhergesagten Wasserhöhe von 1,5 bis 2,5 Metern über dem mittleren Hochwasser. Die Sturmflutwarnung klingt dann zum Beispiel so: „Sturmflutwarnung des BSH. Für die deutsche Nordseeküste besteht die Gefahr einer schweren Sturmflut. In der Nacht von Freitag zu Sonnabend wird das Hochwasser an der deutschen Nordseeküste, in Emden, Bremen und Hamburg 2,5 bis drei Meter über mittlerem Hochwasser eintreten.“

Wird eine offizielle Sturmflutwarnung herausgegeben, sind die Mitarbeiter der regionalen Ämter entlang der Küste auf ihren Posten. Die örtlichen Sturmflutbereitschaftsdienste kontrollieren die Wasserstandsmeldungen der umliegenden Küstenabschnitte. Ab einer bestimmten Höhe werden Sperrwerke geschlossen und besonders gefährdete Stellen der Deiche durch Freiwillige, aber auch die Feuerwehr, gezielt beobachtet. Entdecken die Beobachter Löcher, Risse oder sogar großflächige Abrutschungen, werden die verantwortlichen Behörden, meist die Landräte, benachrichtigt, die dann sofort alle verfügbaren Hilfskräfte mobilisieren: Feuerwehr, das Technische Hilfswerk, Baufirmen, die Bundeswehr und auch freiwillige Helfer setzen dann alles daran, gefährdete Deichabschnitte zu verstärken. Droht ihre Mühe vergebens zu sein, müssen Mensch und Tier in den bedrohten Gegenden evakuiert werden.



Sturmflut auf dem Meer und an der Küste. Eine Warnung ermöglicht es Schiffen und Menschen, sich in Sicherheit zu bringen. © NOAA



Hochwasser – immer häufiger „Land unter“?

Die Elbeflut im Jahr 2002 verwandelte diese Elbschleife bei Dessau in einen See. © Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ/André Künzelmann

Überschwemmungskatastrophen sind in Deutschland nichts Ungewöhnliches – brechende Deiche, reißende Fluten und vollgelaufene Keller inklusive. 1993 und 1995 war es der Rhein, 1997 die Oder, 2002 und 2006 traf es das Elbeeinzugsgebiet, dazwischen, im Jahr 2005, meldeten sogar zahlreiche Orte in den Voralpen „Land unter“.

Doch nicht nur hierzulande treten solche Naturkatastrophen immer wieder auf, auch in vielen anderen Regionen der Erde sind sie längst eher die Regel als die Ausnahme. So entwickeln sich beispielsweise viele Flüsse in Indien, Bangladesch oder Nepal alljährlich während der Monsunzeit in gefährliche Ströme, die häufig genug über die Ufer treten und wichtiges Weide- oder Ackerland in riesige Seenlandschaften verwandeln. Von solchen Hochwasserkatastrophen sind dort schnell Millionen von Menschen betroffen.

Und auch der Mississippi in den USA bringt seinen Anwohnern nicht nur Trinkwasser und Handelsmöglichkeiten, sondern auch jede Menge Gefahren. Als „gesetzlosen Strom“, der nicht zu zähmen oder zu besiegen ist, hat ihn der Schriftsteller Mark Twain einst bezeichnet – offenbar zu Recht. Denn seit mehr als 200 Jahren versuchen Wissenschaftler und Techniker, seine Fluten in den Griff zu bekommen – trotz aller Anstrengungen bis heute vergeblich.

Ein mindestens ebenso wichtiges Krisengebiet in Sachen Hochwasser ist China. Im Jahr 1887 ertranken dort 900.000 Menschen in den Fluten, als am Huang Ho die Dämme brachen. Bei einer ähnlich dramatischen Überschwemmungskatastrophe am Yangtse rund 100 Jahre später war sogar ein Fünftel aller Chinesen – 240 Millionen Menschen – betroffen. Weit mehr als 3.000 Tote wurden 1998 gemeldet, 21,2 Millionen Hektar Ackerland verschwanden unter den Wassermassen. Die direkten Schäden beliefen sich damals auf circa 50 Milliarden Euro.

Zu verheerenden Überschwemmungen kommt es dort und anderswo aber auch, wenn Stürme wie Hurrikans, Taifune oder Winterstürme gewaltige Mengen Meerwasser Richtung Küste schieben, die die Flussmündungen blockieren. Im Hinterland steigen dann die Wasserspiegel dramatisch an und es kommt manchmal sogar zu verheerenden Deichbrüchen.

Wann ein Hochwasser zur Katastrophe wird

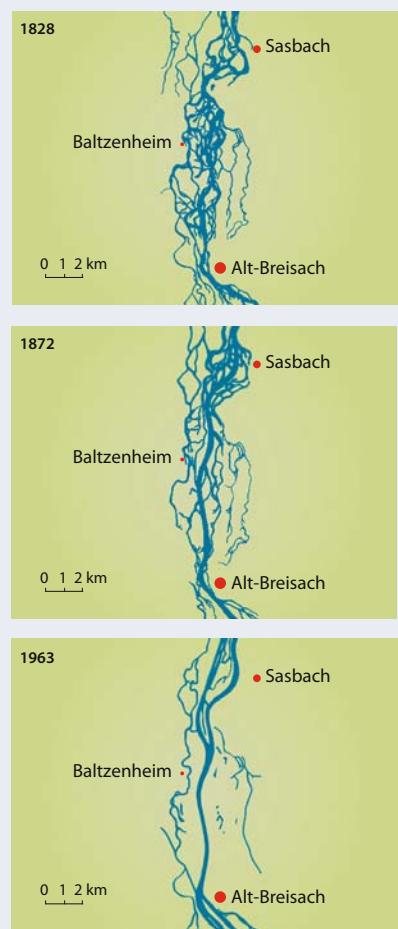
Doch längst nicht immer bedeuten Hochwasser auch gleich eine Katastrophe. Manchmal sind sie sogar ein Segen. So entstanden nahezu alle alten Hochkulturen an großen Flussläufen, deren Auen regelmäßig mit dem fruchtbaren Schlamm der Überschwemmungen gedüngt wurden. Zur todbringenden Gefahr wie in China werden die Fluten erst dann, wenn der Mensch Gebiete besiedelt, die eigentlich als viel zu gefährlich gelten. Oder wenn er natürlichen Strukturen, die das Ausmaß eines Hochwassers abmildern oder seine Entstehung sogar ganz verhindern können, buchstäblich das Wasser abgräbt.

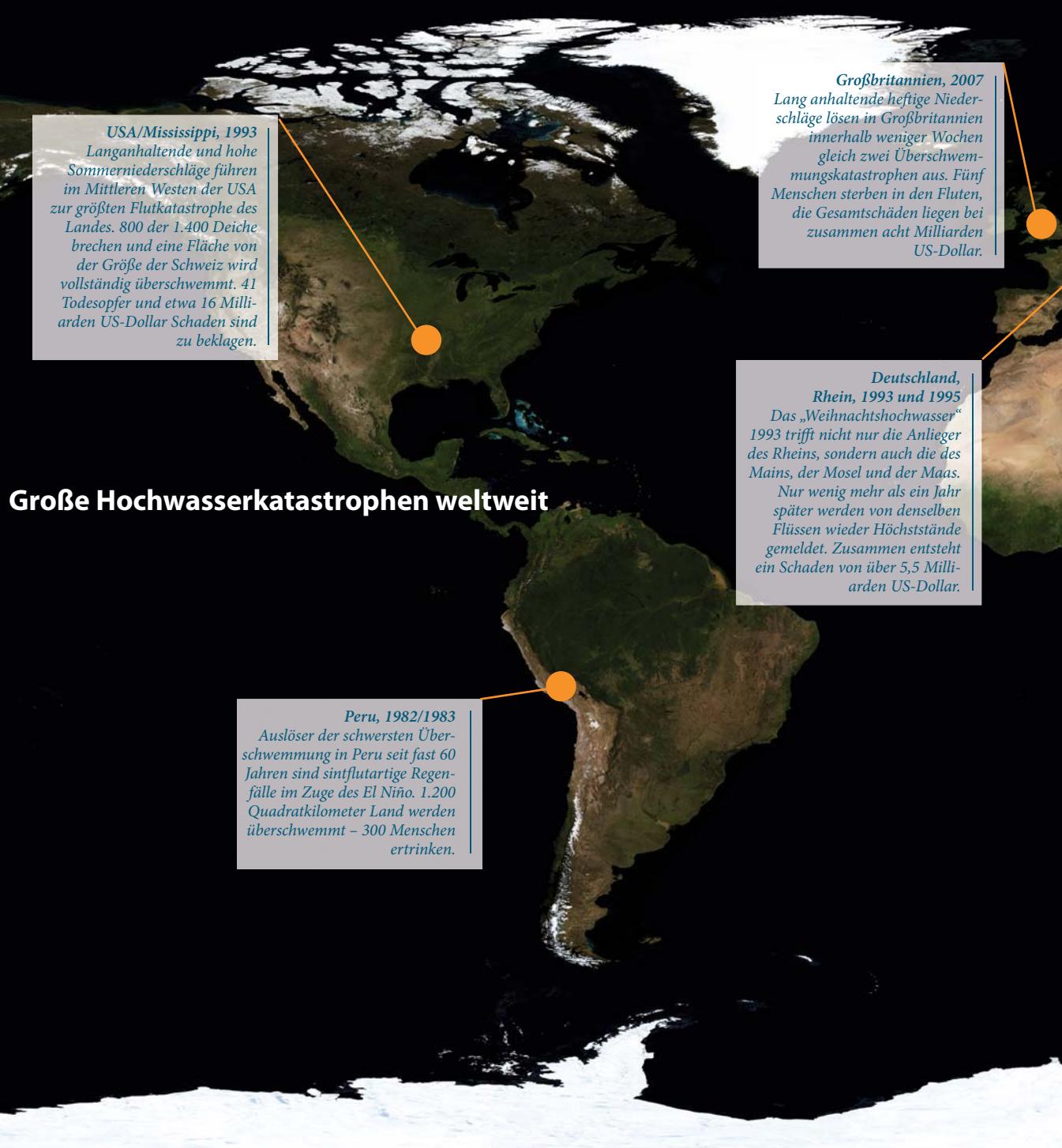
So sind viele uralte Überschwemmungsflächen wie Auen durch eine zu intensive Eindeichung und Regulierung von den Flüssen abgetrennt worden. Daher können sie nicht mehr wie früher bei Hochwasser einen großen Teil der Fluten „zwischenlagern“ und erst dann abgeben, wenn sich die Lage einigermaßen entspannt hat. „Zähmungsmaßnahmen“ wie Verkürzungen und Begradigungen haben viele Flüsse zudem zu schnurgeraden, schnell fließenden Wasserautobahnen gemacht, die pro Zeiteinheit viel mehr Wasser transportieren.

Ein gutes Beispiel ist der Rhein. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts haben Flussbegradigungen hier dafür gesorgt, dass der Oberrhein um 82 Kilometer und der Niederrhein um 23 Kilometer kürzer geworden sind. Entsprechend größer sind das Gefälle und die Fließgeschwindigkeit. Kein Wunder, dass eine Hochwasserwelle von Basel nach Karlsruhe heute nur noch 25 Stunden braucht, fast 40 Stunden weniger als vor 50 oder 60 Jahren.

Wichtige biologische Hochwasserpuffer sind darüber hinaus Böden und Wälder. Sie können ebenfalls einen großen Teil der Niederschläge speichern. Doch auch in diese Systeme hat der Mensch längst eingegriffen. So fallen immer mehr Wälder, Wiesen und Äcker dem Straßen- oder Städtebau zum Opfer. Allein auf dem Gebiet der alten Bundesländer hat sich innerhalb der letzten 50 Jahre der Anteil der Siedlungsflächen von sechs auf weit über 13 Prozent erhöht. Tendenz

Begradigung und Kanalisierung verengen und verkürzen den Lauf eines Flusses, wie hier am Oberrhein, sodass Hochwasser schneller und höher auflaufen.
© MMCD NEW MEDIA







steigend. Bei starken Regenfällen fehlen diese natürlichen Senken und die Niederschläge gelangen ohne größere Verzögerungen in die Flussläufe. Verstärkt wird das Ganze noch durch die moderne Landwirtschaft. Immer größere Betriebe verlangen immer schwerere Landmaschinen. Durch das häufige Befahren der landwirtschaftlichen Nutzflächen, seien es Äcker oder Wiesen oder Weiden, wird der Boden stark verdichtet. Selbst heute noch nicht versiegelte Böden können deshalb vielfach deutlich weniger Wasser aufnehmen und speichern als noch vor einigen Jahrzehnten.

Brenzlig wird es entlang vieler Flüsse deshalb immer dann, wenn mächtige Tiefdruckgebiete ungewöhnlich heftige Regenfälle mitbringen. Egal ob die Niederschläge kurz und intensiv sind oder sehr lange andauern: Oft sind sie die Keimzelle für steigende Flusspegel und damit auch für Hochwasser. Manchmal ist es aber auch ein Wärmeeinbruch im Winter, der in Gebirgen wie den Alpen zu einer starken Schneeschmelze führt. Diese macht sich dann später – oft erst mehrere hundert Kilometer weiter Richtung Meer – als Flutwelle bemerkbar. Der Mechanismus, der dazu führt, ist simpel und effektiv zugleich. Denn wenn der über Monate angesammelte Schnee in relativ kurzer Zeit wegtaut, kann das Wasser in den noch gefrorenen Böden kaum versickern und fließt daher schnell in die Flüsse ab.

*Überflutetes Ackerland und überschwemmte Häuser am Mississippi im Juni 2008.
© FEMA/Jocelyn Augustino*



Besonders gefährlich wird es jedoch, wenn Rekordniederschläge und eine Schneeschmelze zusammen auftreten. Dann sind selbst breite Ströme schnell überfordert. Wie auf einer überfüllten Autobahn kommt es zum Stau: Die Fluten werden nicht schnell genug abtransportiert und die Wasserstände steigen bedrohlich. Ob es aber schließlich tatsächlich zu einem gefährlichen Hochwasser und möglicherweise sogar zu großflächigen Überschwemmungen kommt, hängt auch dann noch von mindestens zwei „Mitspielern“ ab: dem Zustand des Flussbettes und – ganz wichtig – den Wassermengen in den Nebenflüssen. Denn treffen die Hochwasserspitzen von Haupt- und Nebenarmen der Flüsse zusammen, verstärken sie sich gegenseitig und die Pegel melden schnell steigende Werte. Als Faustregel für den Rhein gilt daher: Regnet es extrem, steigen die Temperaturen rasch, hat es im Winter stark geschneit und trifft das alles auch noch auf das gesamte Einzugsgebiet des Flusses zu, dann droht eine Jahrhundertflut.

Mehr Wetterextreme, mehr Jahrhundertfluten?

Wenn ein Fluss aus seinem Bett ausbricht und die umliegenden Städte und Gemeinden überschwemmt, hat das meist viele Gründe. Ein weiterer könnte in Zukunft hinzu kommen – zumindest in Mitteleuropa. Denn der Klimawandel wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts vermutlich nicht nur trockenere und heißere Sommer, sondern auch deutlich feuchtere Winter bringen. Dies zeigen

*Ungewöhnlich heftige Niederschläge in Kombination mit der Schneeschmelze lösten die Elbeflut im April 2006 aus. Die Kleinstadt Hitzacker wurde großflächig überschwemmt.
© Harald Frater*



Was ist ein „Jahrhunderthochwasser“?

Der Begriff „Jahrhundertflut“ ist keine Erfindung der Medien. Stattdessen handelt es sich um einen fest definierten Typ von Katastrophe.

Gemeint ist mit einem Jahrhunderthochwasser „der Abfluss an einer bestimmten Stelle eines Flusses, der im langjährigen Mittel einmal in 100 Jahren (Wiederkehrperiode) erreicht wird“. So zumindest die Definition der Münchener Rückversicherungsgesellschaft, die sich intensiv mit Naturkatastrophen auseinandersetzt und andere Versicherungen gegen solche Schadensfälle rückversichert.

Die 100-Jahres-Wahrscheinlichkeit sagt allerdings nichts über den konkreten Zeitpunkt und Ort des Auftretens eines solchen Hochwassers aus. Hier geht es zunächst nur um eine rein statistische Häufigkeit.

Deshalb können zwei „Jahrhunderthochwasser“ wie an der Elbe durchaus mit nur wenigen Jahren Abstand auftreten. Wie groß das Risiko für das Auftreten einer solchen Extremflut tatsächlich ist, lässt sich letztlich nur auf der Basis von genauen, ortsspezifischen Überschwemmungsmodellen prognostizieren – und das auch nur in Teilen.

neue Modellrechnungen von Klimaforschern. „Wir müssen mit 20 bis 30 Prozent mehr Niederschlägen im Winter rechnen, ein Großteil davon als Regen“, sagt Daniela Jacob vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg, die im Auftrag des Umweltbundesamtes die Simulationen durchgeführt hat. Viele dieser Niederschläge werden den Prognosen zufolge zudem als Starkregen fallen und damit das Hochwasserrisiko noch zusätzlich erhöhen. Liegen die Klimawissenschaftler mit ihren Modellrechnungen richtig, könnten deshalb Jahrhundertfluten wie 2006 in Zukunft viel häufiger auftreten.

Damals sorgten ungewöhnlich heftige Niederschläge im Einzugsgebiet von Elbe und Oder zunächst für ein starkes Ansteigen der beiden Flüsse. Irgendwann jedoch konnten viele Deiche den immer weiter nachströmenden Wassermassen nicht mehr standhalten und brachen. Folge: Vor allem in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern, aber auch in Tschechien wurden große Gebiete überflutet. Besonders unter dem Hochwasser zu leiden hatte unter anderem das niedersächsische Städtchen Hitzacker. Dort stand nicht nur die malerische Altstadt komplett unter Wasser, die Pegelstände der Elbe erreichten auch neue Rekordwerte. Schließlich wurde sogar die bisherige Höchstmarke der „Jahrhundertflut“ von 2002 deutlich übertroffen.

Die „sächsische Sintflut“

Trotz zum Teil geringerer Wasserstände gilt aber die „sächsische Sintflut“, die im August 2002 in Ostdeutschland wütete, noch immer als bisher teuerste Überschwemmungskatastrophe in Europa. Auslöser waren damals ebenfalls Rekordregenmengen innerhalb kürzester Zeit, verursacht von der berühmt-berüchtigten „Vb“-Wetterlage. „Fünf-b“-Tiefdruckwirbel sind dafür bekannt, dass sie viel Regen vom Mittelmeer nach Mitteleuropa schaufeln. Sie entstehen meist im Golf von Genua, ziehen an den Alpen vorbei nach Österreich und dann weiter in Richtung Mitteleuropa. Diese „Vb“-Tiefs sind alte Bekannte – allerdings nur im Winter. Doch 2002 war alles anders: Insgesamt fünf solcher Tiefs tauchten auf, mitten im Hochsommer, und überzogen große Teile Europas mit sintflutartigen Niederschlägen. Das letzte Tief – „Ilse“ – hatte es dann besonders in sich. Schon auf den Balearen und Korsika sorgte es für heftige Überschwemmungen. Auch in Italien, Österreich und Bayern tobte sich „Ilse“ mit Rekordniederschlägen richtig aus. In Balderchwang fielen innerhalb von 24 Stunden 128 Liter pro Quadratmeter, in Sonthofen waren es immerhin noch 106 Liter.

Zugbahn des Tiefs bei einer „Vb“-Wetterlage, wie im August 2002. © MMCD NEW MEDIA



Land unter in Großbritannien

2007 war ein Jahr der Wetterextreme und ein Jahr, das Europa teilte. Während im Süden des Kontinents – in Griechenland, Italien oder Spanien – die Menschen im Sommer wochenlang mit heftigen Waldbränden zu kämpfen hatten, meldeten viele Regionen in Mitteleuropa nahezu zur gleichen Zeit „Land unter“.

Ganz besonders unter Hochwasser und großflächigen Überschwemmungen zu leiden hatte dabei Großbritannien. Und das auch noch in mehreren Etappen. Zunächst suchten im Juni massive und umfangreiche Überschwemmungen den Norden von Englands und Wales heim. Keine vier Wochen später waren dann Mittel- und Südengland an der Reihe. Dort überschwemmten die Themse und ihre Nebenflüsse wie der Severn große Bereiche. Von dieser zweiten „Jahrhundertflut“ innerhalb kürzester Zeit waren unter anderem die Regionen Gloucestershire, Herefordshire, Lincolnshire, Oxfordshire und Berkshire besonders schlimm betroffen. Einige Orte in diesen Grafschaften waren komplett von der Außenwelt abgeschnitten.

Am Ende drangen die Fluten sogar bis in den historischen Stadtkern der alten Universitätsstadt Oxford vor. Die letzte Rettung kam häufig aus der Luft: Mithilfe von Hubschraubern wurden viele Bewohner in letzter Sekunde aus ihren überfluteten Häusern in Sicherheit gebracht.

Die Ursache für die beiden Hochwasserkatastrophen war von den Meteorologen schnell identifiziert: Lang anhaltende, ungewöhnlich ergiebige Niederschläge, die viele Flüsse anschwellen und über die Ufer treten ließen. So fiel in großen Teilen Großbritanniens von Mai bis Juli 2007 mehr Regen als jemals

zuvor seit Beginn der Wetteraufzeichnungen vor rund 250 Jahren. Entsprechend groß waren die Sachschäden in den Überschwemmungsgebieten.

Nach Berechnungen der britischen Regierung und der Münchener Rück beliefen sich die Kosten für die beiden Hochwasserkatastrophen – unter anderem versanken über 37.000 Häuser in den Fluten – auf jeweils rund vier Milliarden US-Dollar – mindestens. In den Gebieten rund um Tewkesbury und Gloucester legte zudem ein Hochwasserbedingter Ausfall eines Wasserwerks die Trinkwasserversorgung für hunderttausende von Menschen lahm. Und noch viel schlimmer: Fünf Briten starben in den Wassermassen.

*Eine kleine Stadt in Not:
Überschwemmungen im Jahr
2007 in Thatcham in der Region
Berkshire (Süd England).
© GFDL*





Im Erzgebirge schließlich blieb „Ilse“ hängen. Hier regnete es am 12. und 13. August 2002 Bindfäden. An der Station Zinnwald-Georgenfeld wurden innerhalb von 24 Stunden sagenhafte 312 Millimeter Niederschlag gemessen, der höchste Tageswert in Deutschland, der je gefallen ist. Nach fünf Tagen unaufhörlichen Regens hatten sich die Elbe und viele ihrer Nebenflüsse in reißende Ströme verwandelt, die vielerorts für Chaos und Zerstörung sorgten. In Dresden meldete die Innenstadt „Land unter“, viele Straßen und Häuser wurden schwer beschädigt oder völlig zerstört: Sogar der Hauptbahnhof stand dort völlig unter Wasser. In vielen anderen Regionen des Elbe-Einzugsbereiches, wie in Grimma, sah es ähnlich dramatisch aus. Am 16. August war in Dresden endlich der Höhepunkt der Flut erreicht. 9,40 Meter wurden dort gemessen – Rekord. Der bisherige stammte aus dem Jahr 1845 und lag rund einen Meter niedriger. Doch bis sich die Lage hier und am Unterlauf der Elbe endgültig beruhigte, dauerte es noch Tage. Die Bilanz der Naturkatastrophe fiel ernüchternd aus: 39 Tote und Gesamtschäden in Höhe von 15,5 Milliarden US-Dollar.

„Wie groß eine Hochwasserkatastrophe auch sein mag, es wird immer noch größere geben.“ Diese Weisheit des amerikanischen Präsidenten Truman aus dem Jahre 1950 gilt allerdings nicht nur für Europa, sondern vor allem auch für Südostasien. Hier sorgen Überflutungen an Flüssen wie Yangtse und Brahmaputra oder Ganges immer öfter für Milliardenschäden und tausende von Toten. Ein Grund dafür: In den fruchtbaren Ebenen und Flussdeltas Chinas, Indiens oder Bangladeschs nimmt die Bevölkerungsdichte ständig zu. Vielerorts sind in den letzten Jahren riesige Ballungsräume und Megastädte entstanden. Durch diese starke Besiedlung der flussnahen Gebiete sind zwangsläufig auch immer mehr Menschen von einer Hochwasser- oder Überschwemmungskatastrophe betroffen. Wissenschaftler rechnen daher damit, dass vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern die Opferzahlen und Sachschäden durch Hochwasser künftig noch weiter steigen werden.

Auen, Deiche, Polder und noch viel mehr ...

Hochwasser hat es zu allen Zeiten gegeben und wird es immer geben. Was aber kann man tun, um das Schlimmste zu verhindern? Zumaldest in vielen Ländern Europas hat man aus den Fehlern der Vergangenheit gelernt und beginnt über neue Strategien im Hochwasserschutz nachzudenken. So gibt es in Deutschland seit Mai 2005 ein neues Hochwasserschutzgesetz, das vorsieht, den Flüssen mehr Raum zu geben und die Nutzung von durch Überflutung bedrohten Flächen stärker einzuschränken. So dürfen in Überschwemmungsgebieten normalerweise keine neuen Bau- und Gewerbegebiete mehr ausgewiesen werden und auch die landwirtschaftliche Bodennutzung hat sich seitdem an den Gefahren des Hochwassers zu orientieren.



*Hochwasser im sächsischen Schlottwitz am 13. August 2002.
© Harald Weber/GFDL*

Links: Der Deich bricht! Beim großen Elbehochwasser 2002 entstehen Schäden von 9,8 Milliarden Euro. © André Künzelmann/Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Maßnahmen gegen Hochwasser

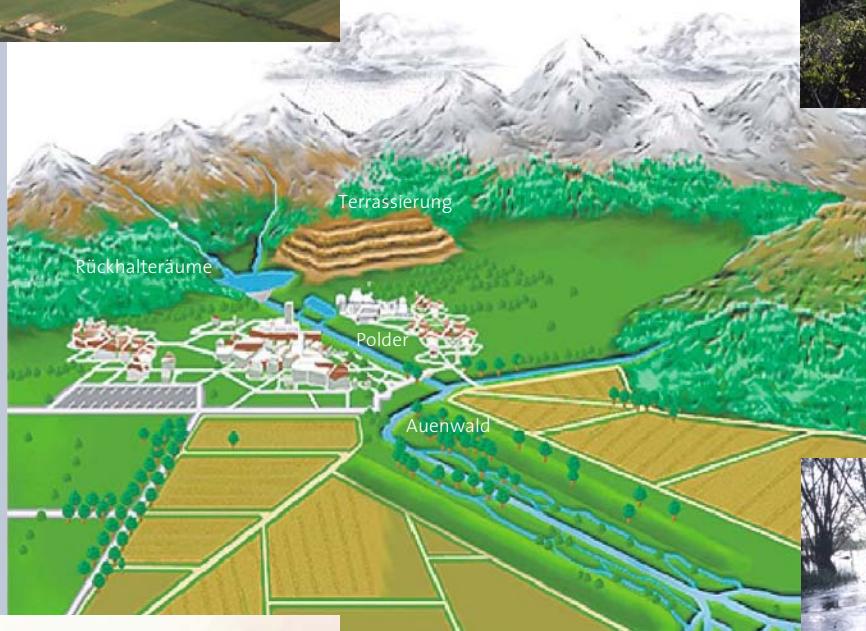
Gezielte Hochwasserschutzmaßnahmen können die negativen Auswirkungen der menschlichen Eingriffe teilweise wieder ausgleichen. Die verloren gegangenen natürlichen Wasserspeicher- und Überflutungsflächen werden dabei entweder durch künstlich angelegte ersetzt oder durch Renaturierung wiedergewonnen.



Polder:
Polder sind vom Menschen geschaffene Überflutungsflächen. Die Pflanzen dieser Feuchtgebiete können Wasser wie ein Schwamm speichern.
© Harald Frater



Terrassen:
In steilen Hanglagen können diese künstlich angelegten Bauwerke das Abfließen des Wassers verlangsamen.
© Aztech



Rückhalteräume:
Künstlich angelegte oder natürliche Becken oder Ebenen, die im Hochwasserfall geflutet werden und so einen Teil des Wassers aufnehmen.
© Harald Frater

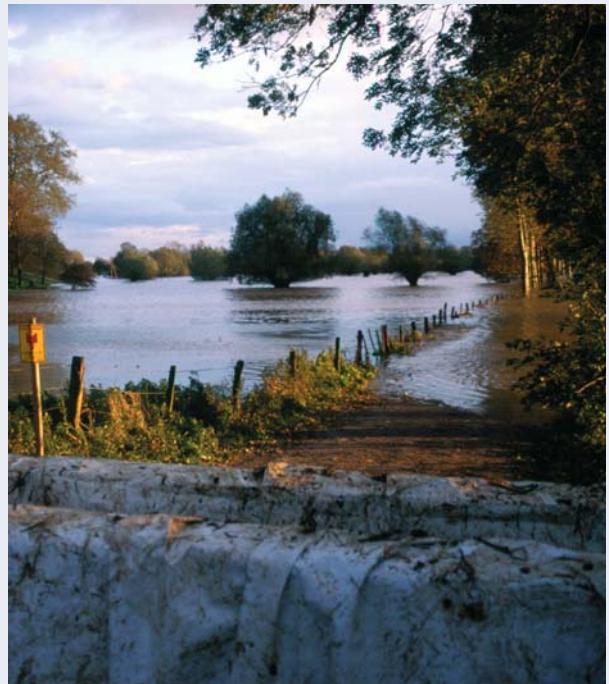
Auenwälder:
Wenn die Auenwälder wiederhergestellt werden, können sie als natürliche Pufferzonen des Flusses einen Teil des Hochwassers auffangen und es dadurch abschwächen und verlangsamen.
© Harald Frater

„Die verheerende Flutkatastrophe an der Elbe im Sommer 2002 hat allen deutlich vor Augen geführt: Es ist besser, Hochwasserschäden wirksam vorzubeugen, als extrem hohe Schäden zu beseitigen. Wenn wir Hochwasser nicht verhindern können, dann müssen wir die Schäden mindern“, sagte der damalige Bundesumweltminister Jürgen Trittin anlässlich der Verabschiedung der neuen Regelung durch den Bundestag. „Die Hochwasserkatastrophen der letzten Jahre machen deutlich, dass wegen des besonders hohen Schadenspotenzials in Überschwemmungsgebieten nicht mehr oder nur hochwassersicher gebaut werden darf. Wohnsiedlungen und Gewerbeparks in Flussauen sind die Flutopfer von morgen.“

Trotz allem bleiben auch in Zukunft Deiche das „A und O“ beim Kampf gegen das Hochwasser. Durch den Einsatz modernster Technik beim Neubau und bei der Instandsetzung bestehender Anlagen können viele Risiken für die Bevölkerung vermieden werden. Manche der Deiche am Niederrhein sind längst dreizehn Meter hoch. Der mächtigste Flussdeich Deutschlands steht jedoch an der Lippe in Hamm-Herringen und ragt 17 Meter aus der Landschaft heraus. Um die Wasserstände der Flüsse bei extremen Wetterbedingungen möglichst niedrig zu halten, setzen Experten heute aber auch auf natürliche Flussauen. Doch viele davon sind durch Deiche isoliert und müssen erst wieder an das fließende Wasser angeschlossen werden. Aber das ist häufig leichter gesagt als getan. Denn oft fehlt für Deichrückverlegungen das Geld, in anderen Regionen sind schon begangene Bausünden aus technischen Gründen nicht ohne Weiteres rückgängig zu machen.

Künstliche Flutpolder entstehen ebenfalls bei der Rückverlegung von Deichen ins Hinterland und ahmen den wasserspeichernden Effekt natürlicher Auen nach. Die Vorteile liegen auch hier auf der Hand: Die gesteuerte Überflutung großer Flächen zapft einiges Wasser aus den Hochwasserführenden Flüssen ab. Wie in einer großen Badewanne wird es „geparkt“ und erst wieder entlassen, wenn keine Gefahr mehr besteht. Dies hilft, ungewollte Überschwemmungen flussabwärts zu verhindern. Derzeit wird am Oberrhein in der Nähe von Straßburg ein solches Überflutungsbecken getestet. Sechshundert Hektar ist es groß und kann fast acht Millionen Kubikmeter Wasser aufnehmen. Was sich viel anhört, ist bei einer großen Flut allerdings nicht mehr als ein Tropfen auf den heißen Stein. Ob sich diese Entlastung am Mittel- und Niederrhein noch auswirkt, ist daher fraglich. Denn erst im Verbund mit weiteren Poldern und der Renaturierung von Auen lässt sich die Fluthöhe merkbar senken. Nach dem Willen der IKRS – einer länder-übergreifenden Kommission zum Schutz des Rheins – sollen daher bis 2020 insgesamt 1.000 Quadratkilometer Überflutungsflächen geschaffen werden. Im Vergleich zu heute würde

*Großflächig ausgewiesene Retentionsflächen in den natürlichen Auenbereichen wie hier am Rhein bei Düsseldorf können Hochwasserfolgen mildern.
© Harald Frater*





Wenn die Warnung zu spät kommt: Helfer im Katastrophenereinsatz in Hitzacker bei der Elbeflut 2006. © Harald Frater

Rechts: Mit Sandsäcken Flusndeiche sichern: Bundeswehrangehörige im Katastrophenereinsatz bei der Elbeflut 2006.
© Harald Frater

dadurch der Pegel von Extremhochwassern bis zu siebzig Zentimeter gesenkt. Ein ehrgeiziges Ziel, das hohe Investitionen erfordert. Allein der Bau des Polders am Oberrhein hat 25 Millionen Euro gekostet. Und obwohl die Anlage auf französischer Seite steht, hat Deutschland gezahlt. Hochwasserschutz kennt halt keine Grenzen.

Die Flut kommt – Frühwarnsysteme als letzte Rettung

Da man Jahrhundertfluten trotz aller Maßnahmen nicht immer verhindern kann, muss man die davon betroffenen Menschen im Ernstfall zumindest rechtzeitig alarmieren. Eine wichtige Rolle im Hochwasserschutz spielen daher auch Frühwarnsysteme und Hochwasserwarnzentralen. Vorreiter in dieser Hinsicht waren wieder einmal die USA, wo es schon seit geraumer Zeit üblich ist, die Pegelstände der Riesenströme mithilfe modernster Radar- und Satellitentechnik zu überwachen und Beobachtungs- und Warnberichte beispielsweise für Sturzfluten oder andere Hochwassereignisse herauszugeben.

Längst hat aber auch Deutschland in diesem Bereich nachgezogen. ELWIS, das „Elektronische Wasserstraßen Informationssystem“, ist für Rheinschiffer, Anlieger und Katastrophenschutz gleich wichtig. Es hilft, die Pegelstände von Rhein und seinen Nebenflüssen zu überwachen. Bei steigenden Fluten schlägt es rechtzeitig Alarm und gibt den Rettungskräften die nötige Zeit, Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Denn die größte Gefahr beim Hochwasser ist nach wie vor der Faktor „Überraschung“. Umso länger die Vorwarnzeit, desto geringer fallen zumeist die Schäden in den überfluteten Gebieten aus. Und im Extremfall bleibt mehr Zeit für eine notwendig erscheinende Evakuierung.

Die Vorhersagen bei Hochwasser sind wesentlich genauer als die Frühwarnungen bei anderen Naturkatastrophen wie Tornados oder Vulkanausbrüchen, da hierzu bloß die Messung der Pegelstände, eine halbwegs genaue Wettervorhersage und Kenntnisse um die jeweilige Fließdynamik der Gewässer nötig sind. Am Rhein ist dieses Vorhersagenetz nahezu lückenlos verfügbar. In einer länderübergreifenden Kooperation werden zwischen der Schweiz, den Niederlanden und den deutschen Bundesländern ständig Messdaten und Prognosen ausgetauscht. Die Fäden laufen dabei in den Hochwasserschuzzentralen von Bern, Karlsruhe und Mainz zusammen. Von hier aus werden bei Bedarf weitere Warnungen an die regionalen Katastrophendienste ausgesprochen.

Die wichtigste Berechnung betrifft dabei nicht die Entwicklung des Rheinpegels, sondern vor allem die seiner großen Nebenflüsse. Denn zumeist lösen erst diese zusätzlichen Wassermassen die Katastrophe aus. Zusätzlich wird das Wettergeschehen mit in die Vorhersagen einbezogen: Regnet es bereits, schmilzt der Schnee in den Alpen oder droht gar ein Sturmtief mit lang anhaltenden Niederschlägen? Alles Warnzeichen, die auf ein baldiges Hochwasser hindeuten könnten. Allein in Nordrhein-Westfalen werden an über 500 Messstationen die Pegelstände und Abflussmengen automatisch kontrolliert – ein Großteil davon am





Rhein und an seinen Nebenflüssen. Minutengenau können die aktuellen Wasserstände von jedermann über Internet oder per Videotext abgerufen werden. Und in den Meldezentralen fließen diese Daten in die Modellberechnungen zur Hochwassergefährdung ein. Durch diesen lückenlosen Informationsfluss haben sich entlang des Rheins die Vorhersagezeiten in den letzten Jahren mehr als verdoppelt. Am Mittel- und Niederrhein beträgt dadurch die Zeit zwischen Warnung und Eintreffen der Hochwasserwelle inzwischen über sechsunddreißig Stunden. Am Rheindelta sind es sogar drei Tage. Und mit der ständigen Verbesserung der hydrologischen Modellberechnungen und der Zulieferung noch genauerer, meteorologischer Daten werden auch diese Prognosen in Zukunft immer präziser.

Mit Hightech gegen die Flut

Und sollte das Hochwasser trotz allem doch einmal in die Städte vordringen, haben Ingenieure und Wissenschaftler mittlerweile auch dafür eine Lösung parat. In Zukunft sollen nicht mehr nur Sandsäcke vor steigenden Fluten schützen, vielmehr ist Hightech angesagt: mobile Dämme, höhenverstellbare Brücken und wasserdichte Häuser – einiges davon ist längst Realität. Und auch das Sprichwort „Da werden doch abends die Bürgersteige hochgeklappt“ könnte schon bald eine völlig neue Bedeutung bekommen. Denn Forscher der Universität Karlsruhe haben Bürgersteige entwickelt, die sich bei Hochwassergefahr zum Schutz gegen die Fluten aufrichten lassen.

Das Prinzip ist einfach: Die ein oder zwei Meter breiten Gehwege aus Stahl werden per Handkurbel oder elektrisch in die Senkrechte gebracht. Innerhalb weniger Minuten verwandelt sich so ein alltäglicher Fußgängerweg in eine effektive Hochwasserbarriere. Der Vorteil gegenüber der herkömmlichen Sand-sackabdichtung liegt auf der Hand: Der Hochwasserschutz ist ständig einsatzbereit, braucht kaum Wartung und lässt sich innerhalb kürzester Zeit installieren. Doch bei allen Vorteilen bleibt der Klapptechnik bislang der große Durchbruch verwehrt: Sie ist einfach zu teuer. Eine sechzig Meter lange Anlage in Sinsheim zum Schutz eines kleinen Flughafens kostete mindestens eine halbe Million Euro – für viele Gemeinden unerschwinglich.

Dies gilt erst recht für die meisten Entwicklungsländer, die aus Kostengründen im Hochwasserschutz nicht auf diese oder andere Hightech-Strategien setzen können. Die ärmsten und häufig am stärksten von solchen Katastrophen betroffenen Gebiete der Erde haben zudem noch mit ganz anderen Problemen zu kämpfen. Sie müssen häufig erst einmal grundlegende Konzepte für den Schutz der eigenen Bevölkerung entwickeln. Das einfache Importieren von Methoden und Plänen aus Europa oder den USA ist dabei meist wenig hilfreich. Denn entscheidend für sinnvolle Strategien ist die Lage vor Ort, die Situation an jedem einzelnen Fluss und an jeder bedrohten Küste. Aus eigener Kraft können die Staaten vor allem in Asien und Afrika die anstehenden Aufgaben kaum meistern. Da müssen schon die internationale Staatengemeinschaft und die Weltbank helfen – mit Know-how und mit Geld.

Links: Möglichkeiten, den Wasserablauf zu kontrollieren, erforschen Wissenschaftler am Institut für Wasserbau in Karlsruhe an Modellen (oben). Rückhalteflächen werden an diesem Modell der Universität Karlsruhe getestet (unten). © Harald Frater



Die Atmosphäre der Erde
ist immer in Bewegung. Ihre
Turbulenzen bescheren uns
einiges an Katastrophen. ©
NASA/JSC

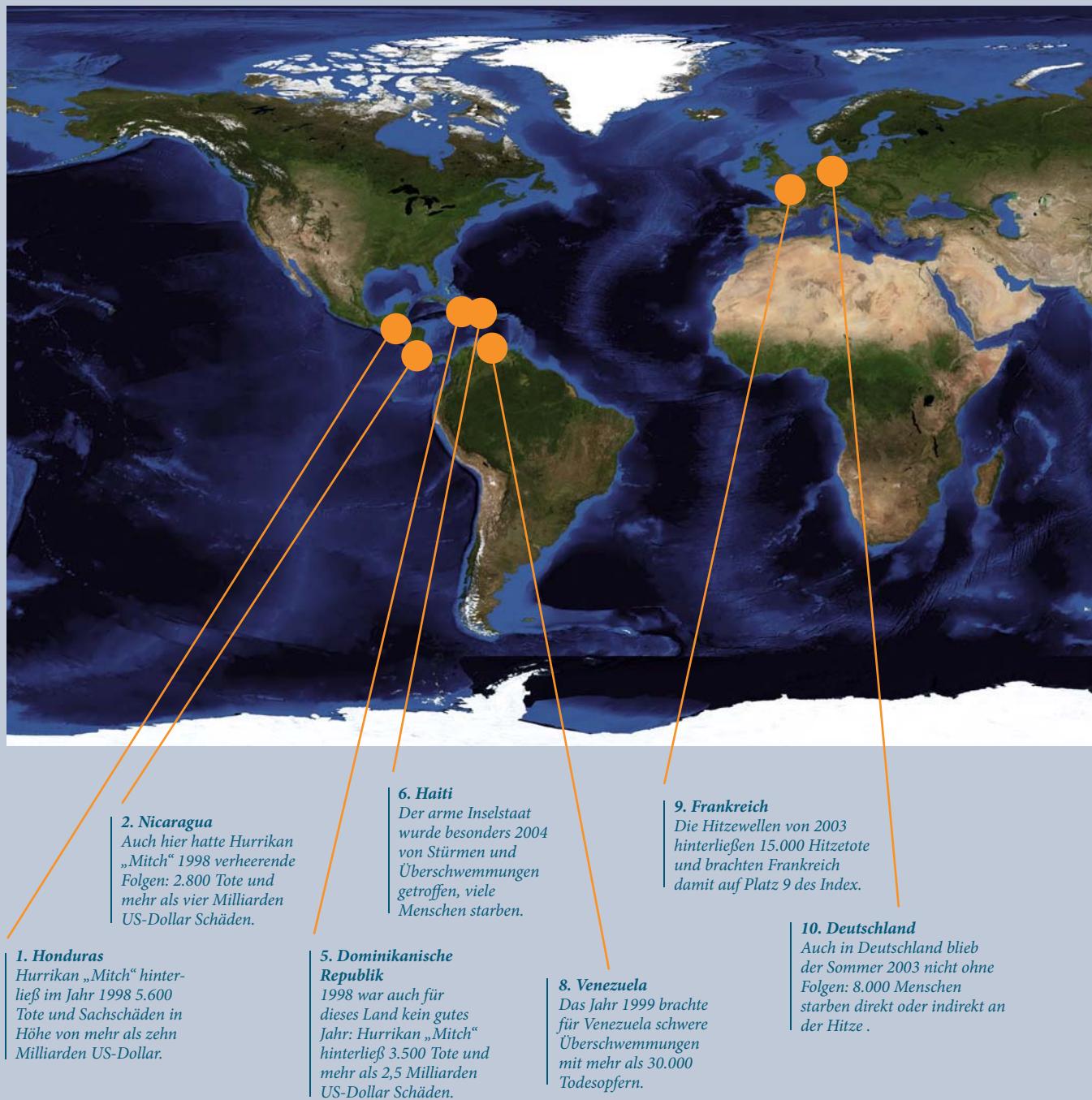
A vertical strip on the left side of the page shows an aerial view of white, fluffy clouds scattered across a dark, textured landscape, likely water or land seen from above.

Klimakatastrophen Klimawandel, Monsun und Co.

Klimakapriolen wie El Niño oder der Monsun sind keine neuen „Erfin-dung“. Gleichermaßen gilt für Dürren, Hitze-wellen oder Waldbrände, die schon zu biblischen Zeiten Angst und Schrecken auf der Erde verbreitet haben. Dennoch scheint es so, dass solche Naturereignisse in letzter Zeit immer schlimmere Folgen nach sich ziehen. Und auch ein Blick in die Zukunft verheißt nichts Gutes. Denn Wissenschaftler gehen davon aus, dass bestimmte Naturkata-

strophen im Laufe des 21. Jahrhunderts viel häufiger auftreten und viel heftiger ausfallen werden als bisher. Mitschuld daran hat der Klimawandel. Sollte es in den nächsten 100 Jahren wirklich um bis zu 6,4 °C wärmer werden, wie vom Intergovernmental Panel on Climate Change prognostiziert, könnten Jahr-hundertsommer und andere extreme Wetterereignisse schon bald zur Regel werden – auch bei uns.

Der Klima-Risiko-Index: die schlimmsten Klimakatastrophen der letzten zehn Jahre





7. Indien
Auf dem Subkontinent wechseln sich Hitzewellen mit Stürmen und Überschwemmungen ab.

3. Bangladesch
Immer wieder wird das Land von katastrophalen Wirbelstürmen, Sturmfluten und Überschwemmungen heimgesucht.

4. Vietnam
Auch dieses Land gehört zu den immer wieder von schweren Stürmen und Fluten betroffenen Gebieten.

In welchem Land ereignen sich die schwersten Wetter- und Klimakatastrophen? Genau das zeigt der Klima-Risiko-Index, eine Übersicht, die die Umwelt- und Entwicklungsorganisation Germanwatch gemeinsam mit der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft entwickeln. Der jährlich aktualisierte Index zeigt auf, welche Länder im vergangenen Jahr und dem vergangenen Jahrzehnt am stärksten von klimabedingten Katastrophen betroffen waren. Das Ausmaß bewerten die Wissenschaftler dabei anhand von vier Kriterien: der absoluten Anzahl der Todesopfer, der Anzahl der Toten pro 100.000 Einwohner, der Kaufkraftverluste in Millionen US-Dollar und der Einbußen im Bruttoinlandsprodukt. Als Basis für die Erfassung der Katastrophen diente die weltweit anerkannte Naturkatastrophendatenbank der Münchener Rück.

Das Ergebnis: Weniger entwickelte Länder leiden unter Stürmen, Überschwemmungen und Wetterextremen sehr viel stärker als die Industrieländer. Im Jahr 2006 sind beispielsweise auf den Philippinen und in Indonesien jeweils fast 1.300 Menschen durch Stürme und Überschwemmungen ums Leben gekommen und Schäden in Milliardenhöhe entstanden. Zwar sind die absoluten Auswirkungen von Wetterkatastrophen in diesen Regionen deutlich geringer als beispielsweise jene in den USA oder in China. Doch da die Forscher auch das Verhältnis der Verluste und Schäden zur Gesamtbevölkerung und Wirtschaftsleistung berücksichtigten, führen beide Länder gemeinsam mit Nordkorea den Index an. Die USA lagen auf dem neunten Platz, Deutschland auf Rang 17.

Im Zehn-Jahres-Index hingegen lagen Honduras und Nicaragua vorne, bedingt durch mehrere Hurrikankatastrophen in der Karibik. Bangladesh und Vietnam, Platz drei und vier, waren von wiederkehrenden Sturmkatastrophen und Überschwemmungen betroffen. Deutschland rückte auf Platz zehn vor, verursacht vor allem durch den Extrem Sommer 2003 mit mehr als 8.000 Todesopfern. „Aus den Ereignissen eines Jahres kann nicht direkt auf einen Zusammenhang mit dem Klimawandel geschlossen werden“, erklärt Peter Höpke, Leiter der GeoRisikoForschung bei der Münchener Rück. „Dennoch, seit 1980 hat sich die Häufigkeit von Naturkatastrophen aufgrund von Überflutungen um das Vierfache, durch Windstürme um das Zweifache und durch weitere Wetterextreme wie Hitzewellen oder Dürren um das Vierfache erhöht, was deutlich eine Erhöhung der Gefährdungssituation anzeigen.“



Klimawandel – die schleichende Gefahr

*Die Erde hat Fieber: Der Mensch
heizt die Atmosphäre durch seine
Emissionen weiter auf. © SXC*

Das Klima der Erde ist keine kontinuierliche oder gar gleichbleibende Größe. Ganz im Gegenteil: Die gesamte Erdgeschichte ist durch vielfache Klimumschwünge und -schwankungen gekennzeichnet. Für den Menschen und viele Tiere können solche Klima-„Kapriolen“ zur Katastrophe werden – dann, wenn Lebensraum und Nahrungsgrundlagen sich so schnell verändern, dass sich die Lebewesen nicht rechtzeitig anpassen können. Hinzu kommt, dass der Klimawandel auch jetzt schon extreme Wetterereignisse und klimabedingte Naturkatastrophen fördert.

Während das Wetter von einem Tag auf den anderen, ja sogar von Minute zu Minute umschlagen kann, scheint das Klima der Erde stabil, fast unveränderlich zu sein. Doch der Eindruck täuscht. Auch das Klima ändert sich, wenngleich nur sehr langsam. Im Laufe von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder sogar Jahrmilliarden lassen Klimaschwankungen ganze Kontinente unter einem Eispanzer versinken oder verwandeln fruchtbare Land in Wüste.

Allein in den vergangenen 600 Millionen Jahren wechselten sich beispielsweise viermal Eiszeiten und Warmzeiten miteinander ab. Klimahistorisch betrachtet, leben wir auch heute noch in einem Eiszeitalter, das vor 55 Millionen Jahren begann. Eines der Indizien dafür ist die vor 30 Millionen Jahren begon-

nene Vereisung des Südpols, die die früher einmal fruchtbare Antarktis zu dem lebensfeindlichen und unbewohnten Kontinent machte, den wir heute kennen. Seit etwa 800.000 Jahren treten in einem schnelleren Rhythmus von ungefähr 100.000 Jahren Klimaschwankungen auf. Kaltzeiten mit einer durchschnittlichen Dauer von 80.000 Jahren und die meist nur 15.000–20.000 Jahre dauernden Wärmeperioden wechseln sich in rascher Folge ab. Die letzte Vereisung hatte ihr Maximum vor 21.000 Jahren. Seither wird es vor allem auf der Nordhalbkugel wärmer. Noch vor 10.000 Jahren lagen die globalen Temperaturen um 5–7°C unter den heutigen. Große Teile des Erdballs, darunter auch Mitteleuropa, waren von einem dicken Eispanzer bedeckt. Durch die seitdem eingetretene Erwärmung ist das Eis geschmolzen, als Folge stieg auch der Meeresspiegel bis heute um 110 Meter. Ehemals unter dem Eispanzer verschwundene Gebiete – wie beispielsweise Skandinavien – sind wieder weitgehend eisfrei.

Doch selbst innerhalb dieser seit 11.600 Jahren andauernden Warmphase sind noch kürzere Klimaschwankungen festzustellen. So war es zum Beispiel im 5. Jahrtausend v. Chr. deutlich wärmer als heute, in der Zwischenzeit kühlte sich das Klima aber auch kurzfristig wieder ab. Ein gutes Beispiel dafür ist die so genannte „Kleine Eiszeit“ zwischen 1520 und 1860. Während dieser Zeit sanken die Durchschnittstemperaturen in Europa um 1 bis 1,5 °C, es gab Ernteausfälle und Hungersnöte. Der Weinanbau, der bis dahin auch in Nordeuropa möglich war, zog sich nach Süden auf die heute bekannten Regionen zurück.

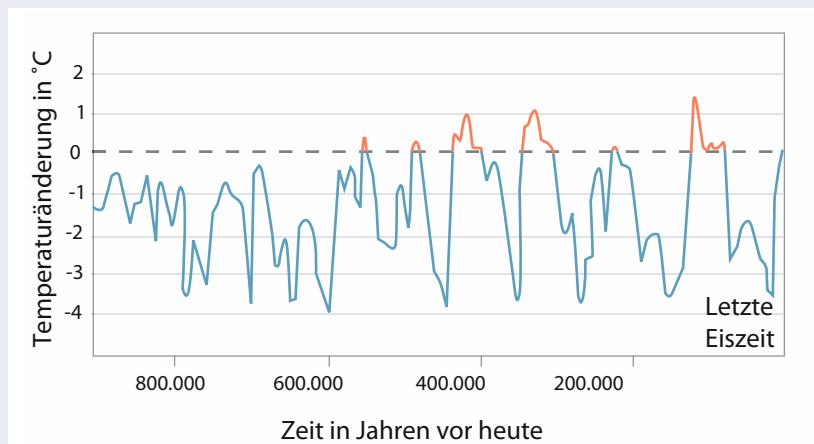
Klimaschwankungen wie diese können unterschiedliche, miteinander wechselwirkende Ursachen haben. Beteiligt sind daran nicht nur die Atmosphäre, sondern alle Sphären des Systems Erde: Erdkruste, Boden, Wasser und Eis und die Biosphäre sind wichtige „Mitspieler“ im Klimageschehen. Ebenso können auch weitere Faktoren das Klima beeinflussen: die Wanderung und geografische Verschiebung der Kontinente durch die Plattentektonik sowie tektonische und geologische Veränderungen wie die Entstehung von Gebirgen oder Vulkanausbrüche. Auch Änderungen der astronomischen Parameter wie Schwankungen der Erdumlaufbahn oder das leichte Pendeln der Erdachse und schließlich die Zyklen in der Sonnenaktivität gehören dazu.

Alle diese Komponenten des Klimasystems verändern sich in unterschiedlichen Rhythmen oder Zeitskalen. Zu den schnelllebigsten Variationen gehören die der Atmosphäre, zu den längsten die astronomischen Parameter. So beträgt der Zyklus der Eiszeiten beispielsweise etwa 100.000 Jahre, Temperaturschwankungen



Eiszeiten haben die Geschichte der Erde geprägt. © Harald Frater

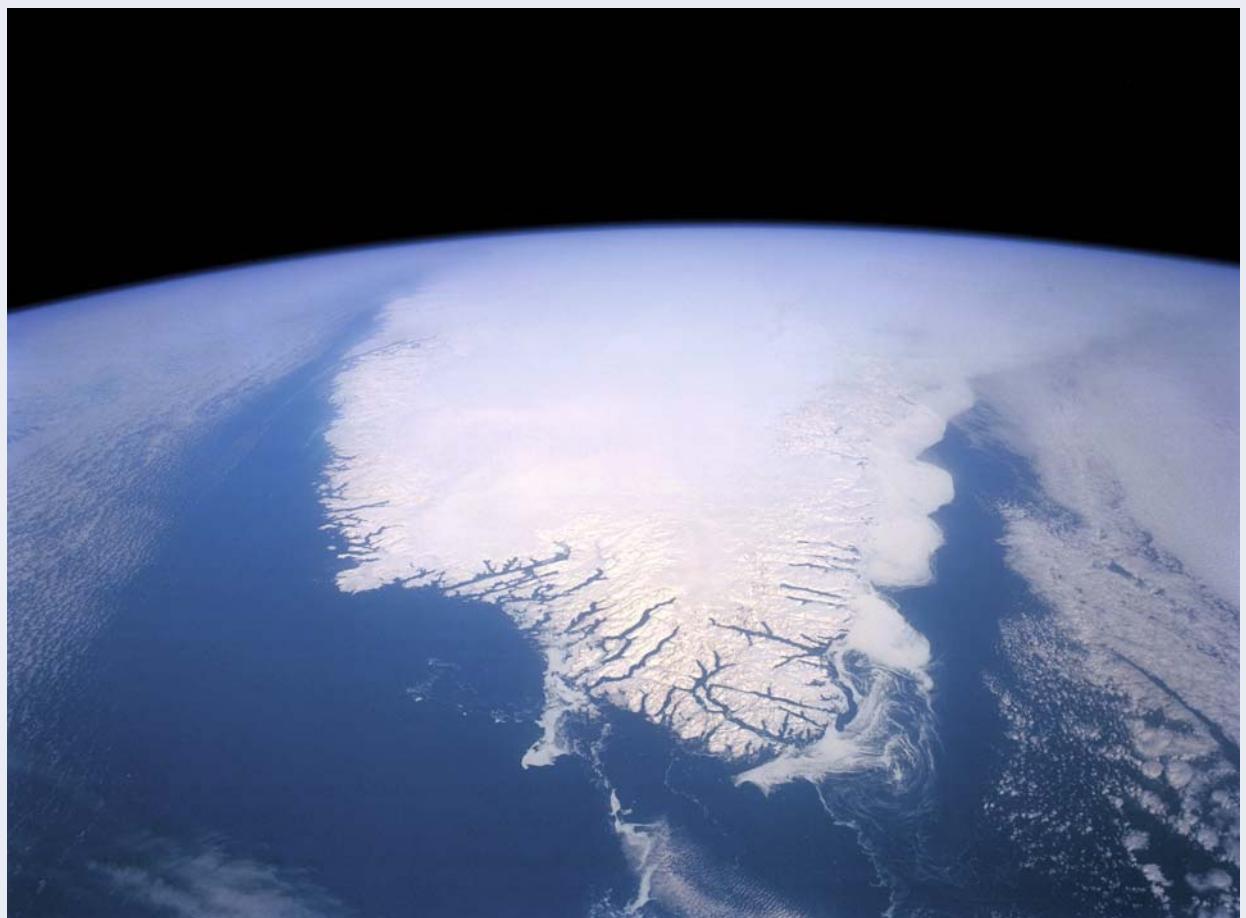
Das Klima der Erde schwankte im Laufe der Erdgeschichte. Hier die Temperaturrentwicklung der letzten eine Million Jahre. © MMCD

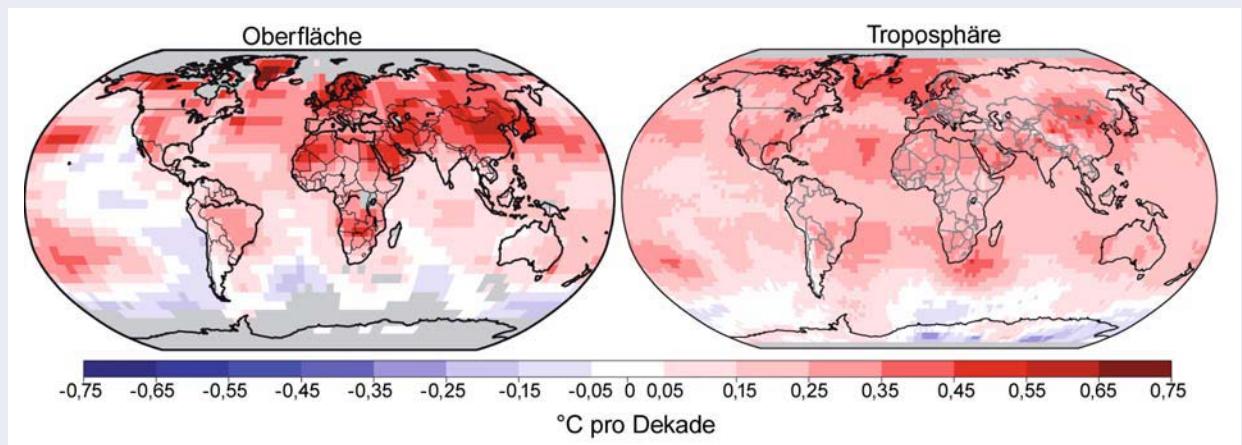


kungen, hervorgerufen durch Änderungen in der Neigung und dem Pendeln der Erdachse, treten in Perioden von 19.000 bis 41.000 Jahren auf. Zu den kürzeren natürlichen Schwankungen zählen zum Beispiel Vulkanausbrüche, deren Gas- und Ascheemissionen etwa nur zwei bis drei Jahre auf das Klima einwirken, oder die Sonnenaktivität, die in Zyklen von elf, 22 und bis zu 80 Jahren schwanken kann. Ein Nachlassen der Sonnenfleckenaktivität wird zum Beispiel mit dem Auftreten der gut 300 Jahre andauernden „kleinen Eiszeit“ in Mitteleuropa in Verbindung gebracht.

Alle diese Schwankungen und Sprünge der Klimageschichte haben auf der Erde ihre Spuren hinterlassen. Untersuchungen von Fossilien, Gesteinen, Meeressedimenten oder Bohrkernen aus den großen Eispanzern der Erde ermöglichen es Wissenschaftlern heute, das Klima der Vorzeit weitgehend zu rekonstruieren. Erst für die jüngste Vergangenheit können sie dazu auf Messergebnisse für bestimmte Klimaparameter zurückgreifen, da diese erst seit rund 300 Jahren mit Instrumenten erfasst und dokumentiert werden.

Eispanzer, so dick wie über dem heutigen Grönland, bedeckten während der Kaltzeiten auch weite Teile Europas.
© NASA/GSFC





Die Erde hat Fieber: der menschengemachte Klimawandel

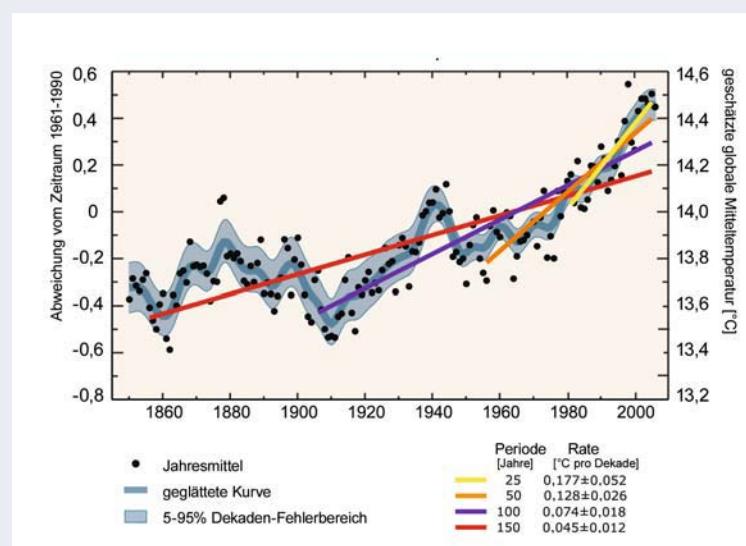
Hurrikans und Überschwemmungen, ungewöhnlich heiße und trockene Sommer, Winter ohne Schnee. Eine Ausnahme? Oder müssen wir uns darauf einstellen, dass solche Wetterextreme in Zukunft zur Regel werden? Der Klimawandel ist bereits in vollem Gange, die globalen Temperaturen steigen. Die Folgen dieser Veränderungen im gesamten Klimasystem bekommen wir bereits jetzt zu spüren: Katastrophale Wetterereignisse häufen sich, Extreme wie Dürren oder Starkregen breiten sich aus. Und in Zukunft könnte dies noch deutlich mehr werden.

Die Fieberkurve der Erde steigt: Messungen zeigen, dass sich die Oberfläche unseres Planeten in den letzten 100 Jahren im globalen Durchschnitt um 0,74 °C erwärmt hat. Der im Jahr 2007 veröffentlichte vierte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) belegt nachdrücklich, dass sich dieses „Aufheizen“ der Erde zudem immer weiter beschleunigt.

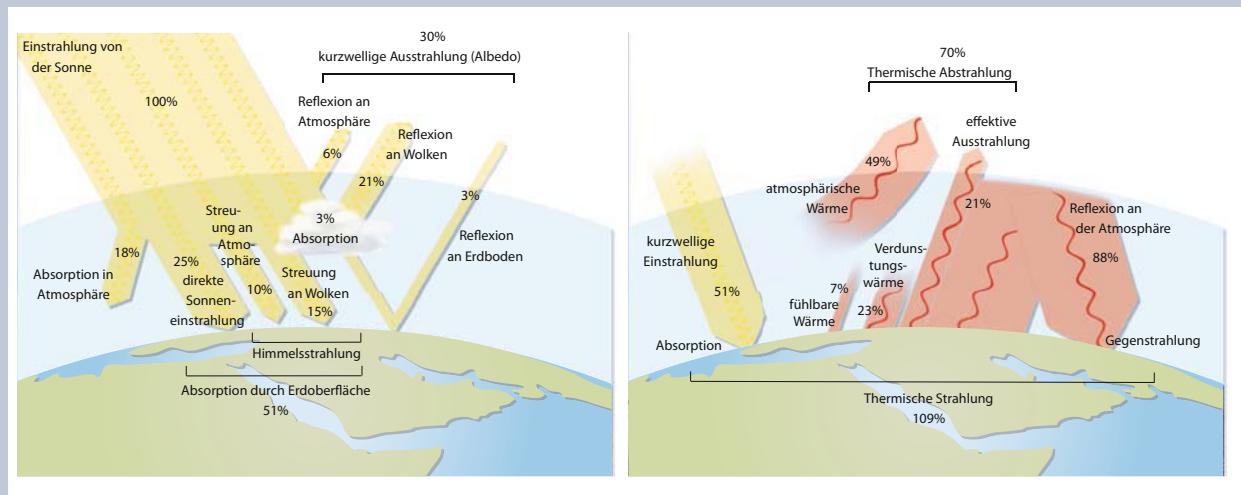
So gehörten von den letzten zwölf Jahren elf zu den wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1850. Spitzentreiter weltweit sind dabei die Jahre 1998 und 2005. Während jedoch 1998 die extreme Wärme noch durch die aufheizende Wirkung eines starken El-Niño-Effekts über dem Pazifik erklärt werden kann, kommen die darauf folgenden warmen Jahre allesamt ohne solche regionalen „Heizfaktoren“ aus. Was aber löst diesen „Fieberschub“ der Erde aus? Der Hauptkandidat dafür ist geruchslos

Globale Veränderungen der Oberflächentemperaturen (links) und der Troposphäre (rechts) im Zeitraum 1979 bis 2005.
© IPCC 2007, AR4 WG-1

Die Temperaturen steigen – und die Erwärmung beschleunigt sich, wie die farbigen Linien zeigen: Je kürzer die Bezugsperiode, desto steiler der Anstieg.
© IPCC 2007, AR4 WG-1



Treibhaus Erde - warum unsere Atmosphäre wie ein Gewächshaus wirkt



Die Atmosphäre wirkt ähnlich wie die Glasscheiben eines Gewächshauses: Sie lässt Strahlung von außen durch und hält Wärme im Inneren fest. Kurzwellige Strahlung von der Sonne (gelb) dringt durch die Lufthülle. Ein Teil wird reflektiert, der Rest gelangt zur Erdoberfläche.

Die Sonnenstrahlen erwärmen die Erdoberfläche und werden von dort als langwellige Wärmestrahlung (rot) abgegeben. Einige Gase in der Atmosphäre, vor allem Kohlendioxid und Wasserdampf, können diese Strahlung absorbieren und dadurch die Wärme in der Atmosphäre halten.

© MMCD; SXC; NASA



und unsichtbar: das Kohlendioxid. Das Gas ist ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre. Ohne seine Treibhauswirkung lägen die Temperaturen unserer Erde nur bei lebensfeindlichen minus 15 °C. Gemeinsam mit dem Wasserdampf und anderen Treibhausgasen sorgt das CO₂ dafür, dass die energiereiche Strahlung von der Sonne den Erdboden erreicht, aber die von diesem reflektierte Wärmestrahlung in der Atmosphäre zurückgehalten wird. Wie eine Wärmedecke oder die Glasscheibe eines Gewächshauses verhindern die Treibhausgase damit ein komplettes Entweichen der Sonnenwärme in das Weltall.

Die sensible Balance unseres irdischen „Gewächshauses“ ist jedoch gestört, es wird immer wärmer. Der Grund: Die Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid liegt heute um 28 Prozent höher als jemals zuvor in den letzten 800.000 Jahren. Sein Anteil hatte im Jahr 2007 knapp vier Promille oder 383 parts per million (ppm) erreicht. Innerhalb dieses Jahres erhöhte sich der Wert noch einmal um 2,2 ppm – wir können demnach fast schon zuschauen, wie die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ansteigt.

Woher aber kommt das ganze CO₂? Die Hauptquelle ist der Verbrauch fossiler Brennstoffe: Das Verfeuern von Öl, Erdgas und Kohle setzt den seit Jahrtausenden oder sogar Jahrmillionen in diesen Energieträgern gebundenen Kohlenstoff frei und gibt ihn als CO₂ an die Atmosphäre ab. Durch den zunehmenden Verkehr, Prozesse in der Industrie, aber vor allem die Energieerzeugung in Kraftwerken für Strom und Wärme wird immer mehr Treibhausgas freigesetzt. Und der Energiehunger der menschlichen Gesellschaften wächst stetig. Im Jahr 2007 stieg der weltweite Primärenergieverbrauch um 2,4 Prozent und markierte damit das fünfte Jahr in Folge mit einem überdurchschnittlichen Wachstum.

Aber das CO₂ ist keineswegs das einzige Gas in der Atmosphäre, das den Klimaforschern Sorgen bereitet. Wissenschaftler kennen noch mindestens 38 weitere Gase, die die Treibhauswirkung weiter verstärken. Dazu zählt auch der Wasserdampf – als Luftfeuchtigkeit jedem beispielsweise aus dem Wetterbericht bekannt. Er ist ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre, dessen Konzentration primär durch den ständigen Austausch mit Meeresoberflächen, Gewässern, der Vegetation und anderen Komponenten des Wasserkreislaufs beeinflusst wird. Obwohl der Wasserdampf zu rund 60 Prozent zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt, spielt er für die gegenwärtige globale Erwärmung eher eine verstärkende als eine auslösende Rolle.

Weitaus potenter ist dagegen beispielsweise das Methan, ein Kohlenwasserstoff, das den Hauptbestandteil von Erdgas, Sumpfgas, aber auch Biogasen bildet. Es hat eine mehr als 20-fach höhere Treibhauswirkung als Kohlendioxid und auch sein Anteil in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung dramatisch angestiegen. Eine der wichtigsten Methanquellen ist die Landwirtschaft. Ein ausgewachsenes Rind kann es zum Beispiel auf einen Methan-Ausstoß von bis zu 300 Litern pro Tag bringen. Lachgas, ein weiteres Treibhausgas, wird eben-



Abgase von Industrie und Verkehr sind eine der Hauptquellen von anthropogenem Kohlendioxid. © SXC



falls durch die Landwirtschaft, besonders aus überdüngten Böden, sowie durch Meeresorganismen abgegeben.

CO₂ und Co. werden aber nicht nur durch direkte Emissionen, sondern auch durch menschengemachte Veränderungen der Natur freigesetzt. So trägt allein schon das Schrumpfen der tropischen Regenwälder entscheidend zum Klimawandel bei. Auch Feuchtgebiete speichern normalerweise CO₂ und Methan, geben es aber wieder ab, wenn sie durch den Menschen trockengelegt werden. Das Ozon gehört, wenn es in den unteren Schichten der Atmosphäre vorkommt, ebenfalls zu den Treibhausgasen. Während es in der oberen Luftsicht, der Stratosphäre, die schädliche UV-Strahlung der Sonne abfängt, ist es in der tiefer gelegenen Troposphäre eher unerwünscht. Hier trägt es nach den Erkenntnissen der Klimaforscher zur atmosphärischen Erwärmung bei.

Aber ist wirklich der Mensch am jetzigen Klimawandel schuld? Könnten nicht auch natürliche Faktoren die Ursache sein? Angesichts der Vielzahl von Einflussfaktoren und komplexen Rückkopplungen im Klimasystem erscheint die Bestimmung der Gründe für die gegenwärtige Entwicklung tatsächlich alles andere als einfach. Trotzdem gelten der Mensch und die von ihm emittierten Treibhausgase als „Sündenbock“ und damit als Verursacher der Klimaerwärmung. Aber ist dies wirklich so eindeutig zu belegen? Nach Ansicht der allermeisten Klimaforscher lautet die

Antwort hier ganz klar „Ja“. Auch das IPCC, das in dieser Frage im Jahr 2001 noch deutlich zurückhaltender agierte, äußerte sich in seinem Bericht von 2007 sehr unmissverständlich dazu: „Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich durch den Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen verursacht“, so der Wortlaut des Berichts. Und im Jargon des IPCC heißt „sehr wahrscheinlich“ immerhin mit einer mehr als 90-prozentigen Sicherheit.

Um dies zu belegen, verglichen die Experten unter anderem die gemessenen Werte des Temperaturanstiegs der letzten 100 Jahre mit Klimamodellen, die allein natürliche Ursachen berücksichtigen, sowie mit Modellen, die sowohl menschliche als auch natürliche Triebkräfte beinhalten. Und das Ergebnis ist eindeutig: Ohne menschlichen Einfluss klaffen Modelle und Beobachtungsdaten weit auseinander. Unter Berücksichtigung der menschlichen Einflussfaktoren hingegen sind die Ergebnisse beider nahezu deckungsgleich.

Rechts: Landwirtschaft und Landnutzung tragen zur Emission von Treibhausgasen bei: Reisfelder, Torfabbau und Viehhaltung setzen Methan frei, die Rodung von Wäldern dezimiert natürliche Puffer für das CO₂. © SXC; GFDL

Gas	Anteil*	Treibhauspotenzial**	Wirkungs-dauer in J.	Beschreibung
Kohlendioxid (CO ₂)	50 %	1	100	Kohlendioxid wird unter anderem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas oder Kohle freigesetzt. Verkehr, Industrie und Kraftwerke sind dabei die Hauptverursacher. Aber auch bei der Brandrodung von Wäldern werden große Mengen CO ₂ frei.
Methan (CH ₄)	19 %	32	10	Eine der wichtigsten Methanquellen ist die Nahrungsproduktion. Ein einzelnes Rind kann bis zu 300 Liter Methan pro Tag abgeben. Methan wird aber auch bei Brandrodungen, aus Mülldeponien, Lecks in Erdgasleitungen und Sümpfen freigesetzt.
Halogenierte Kohlenwasserstoffe (FCKW)	17 %	0	85	Während Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid auch ohne menschliche Aktivitäten in der Natur freigesetzt werden, sind die Fluorchlor-kohlenwasserstoffe (FCKW) reine „Zivilisationsgase“. Sie stammen vor allem aus Spraydosen, Kältemitteln und Schaumstoffen.
Ozon (O ₃)	8 %	2.000	0	Auch Ozon gehört – in den unteren Schichten der Atmosphäre – zu den Treibhausgasen. Ozon entsteht überall dort, wo Industrie und Autoverkehr besonders viel Stickoxide und Kohlenwasserstoffe produzieren. Aus ihnen entsteht der Sommersmog.
Lachgas (N ₂ O)	4 %	150	150	Distickstoffoxid (Lachgas) entsteht bei Verbrennungen unter hohen Temperaturen wie in Düsentreibwerken oder bei Brandrodungen. Aber auch die Landwirtschaft trägt zur Emission von Lachgas bei: Bodenbakterien setzen Distickstoffoxid aus überdüngten Böden frei.

* Anteil am zusätzlichen Treibhauseffekt.

** Relatives Treibhauspotenzial im Vergleich zu CO₂.



Globale Erwärmung: Schon wenige Grad mehr bedeuten eine große Gefahr. © SXC

Prognosen: Was bringt die Zukunft?

Wie wird das Klima der Zukunft? Das ist heute eine der Schlüsselfragen schlechthin. Denn für viele Menschen könnte es dabei um nichts weniger als ihre Existenz gehen. Von der Geschwindigkeit und Stärke der zukünftigen Erwärmung hängt es unter anderem ab, ob sich beispielsweise gefährdete Regionen oder Wirtschaftsbranchen anpassen können oder ob sie die Folgen un gepuffert erleiden müssen. Schon wenige Grad können hier einen entscheidenden Unterschied machen.

Dass die klimaschädlichen Treibhausgas-Emissionen auch in den nächsten Jahren und sogar bis zum Ende dieses Jahrhunderts weiter ansteigen werden, bezweifelt inzwischen kaum noch jemand. Eine starke Reduktion und selbst ein Einfrieren der Emissionen wäre wirtschaftlich und technologisch für viele Länder momentan kaum machbar. Die Prognosen der Klimaforscher gehen daher von weiteren Emissionssteigerungen zwischen gut 20 Gigatonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr im besten und knapp 140 Gigatonnen pro Jahr bis 2100 im ungünstigsten Szenario aus. Allein für die Energieerzeugung wird der CO₂-Ausstoß bis 2030 um 40 bis 110 Prozent wachsen, so die Prognosen.

In Bezug auf die Temperaturentwicklung sind sich alle Modelle und Vorhersagen ziemlich einig: Die Erwärmung geht weiter. Das IPCC prognostizierte in seinem Bericht von 2007 eine Erwärmungsrate von mindestens 0,2 °C pro Jahrzehnt – und zwar für alle sechs zugrundeliegenden Szenarien. Für die globalen Temperaturen am Ende dieses Jahrhunderts bedeutet dies selbst für das günstigste IPCC-Szenario, eine Welt mit schnellem Wandel zu nachhaltigeren Technologien und Wirtschaftsformen, eine Erwärmung um 1,8 °C. Für das schlechteste Szenario, eine weiterhin durch fossile Brennstoffe dominierte Welt, liegen die Prognosen bei vier Grad mit einer Spannbreite von 2,4 bis sogar 6,4 °C.

Der Meeresspiegel weltweit wird zukünftig ebenfalls weiter ansteigen, da die Ausdehnung des Meerwassers direkt mit seiner Temperatur verknüpft ist. Das IPCC prognostiziert im günstigsten Fall einen Anstieg von 18 bis 38 Zentimetern bis zum Ende des Jahrhunderts, im ungünstigsten Fall von 26 bis 59 Zentimetern. Doch selbst diese Werte könnten deutlich zu niedrig liegen. Denn wie die Klimaexperten ausdrücklich konstatieren, haben sie in diesen Modellen noch nicht berücksichtigt, dass sich das Abtauen der polaren Eismassen Grönlands und der

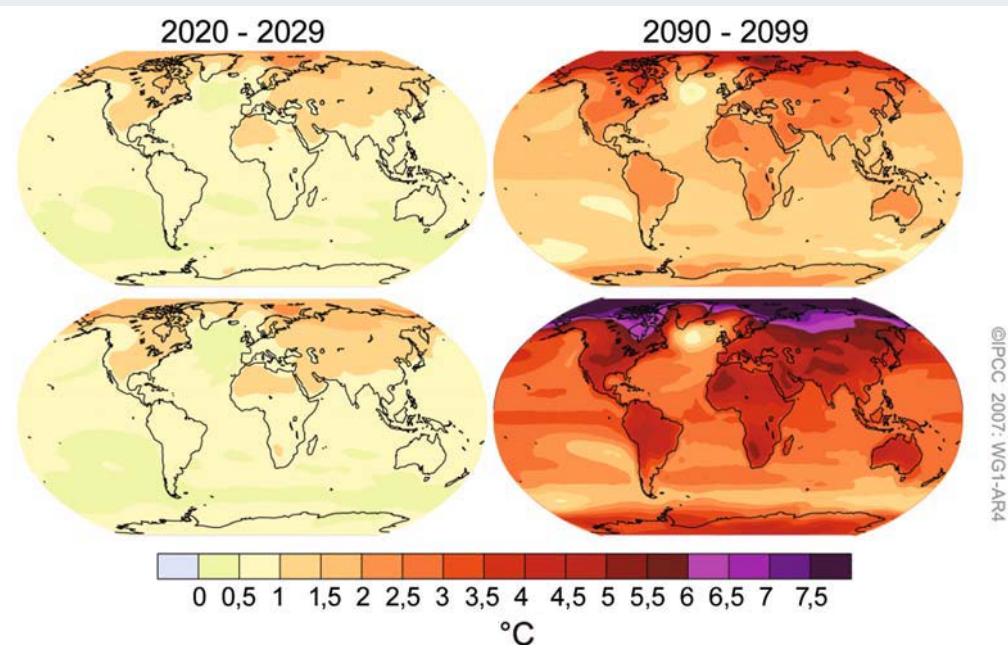
Was ist das IPCC?

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurde 1989 von der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) ins Leben gerufen. Aktiv für das IPCC tätig sind mehrere hundert renommierte Klimaforscher weltweit, aufgeteilt in drei Arbeitsgruppen. Sie führen keine zusätzlichen Forschungen für den Weltklimarat durch, sondern werten in erster Linie wissenschaftliche Veröffentlichungen aus.

Die jeweils im Abstand von einigen Jahren veröffentlichten „Assessment Reports“ des IPCC fassen die neuesten Erkenntnisse und Prognosen zusammen, diskutieren aber auch abweichende Modelle und Studien.

Sie geben damit nicht nur den aktuellen Stand der Wissenschaft wieder, sondern sind gleichzeitig auch eine Art Trendbarometer in Sachen Klimaforschung.

*Prognostizierte Änderungen der globalen Oberflächentemperaturen in Bezug auf den Zeitraum 1980–1999 für die Szenarien B1 (oben) und A2 (unten).
© IPCC 2007, AR4 WG1*





Antarktis eventuell zukünftig noch deutlich beschleunigen könnte. Nach Berechnungen aus dem Jahr 2008 wären sogar Anstiege von mehr als acht Millimeter pro Jahr und 30 bis 60 Zentimetern bis zum Ende des Jahrhunderts allein durch die Eisschmelze durchaus im Rahmen des Möglichen. Das entspricht einer Verdopplung bis Verdreifachung der bisherigen Schätzungen.

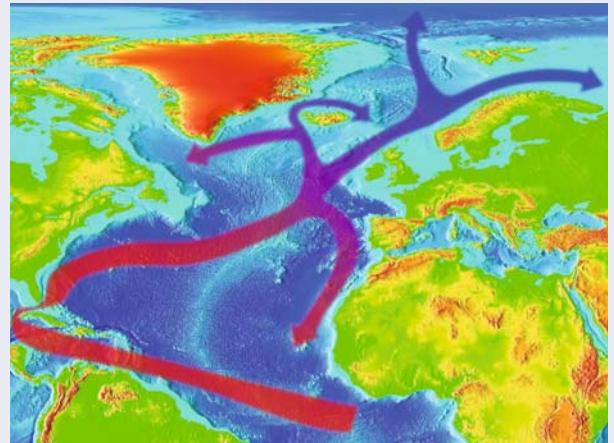
Die Ozeane sind darüberhinaus wichtige Puffer im globalen Klimasystem, da sie nur allmählich auf Temperaturveränderungen reagieren. Sie erwärmen sich deutlich langsamer als die Landmassen, können dafür aber die Wärme länger speichern. Durch diese Eigenschaft dämpfen sie auch die Temperaturschwankungen in der Luftmasse über ihnen. Aus diesem Grund haben Küstenregionen häufig weniger starke Temperaturgegensätze als Regionen, die weit im Inland liegen. Der Puffereffekt des Meeres ist an der Küste sogar direkt spürbar: Die sommerlichen Winde, wenn sie vom Wasser her wehen, sind meist verhältnismäßig kühl, die Seewinde im Winter entsprechend mild.

Auch globale Meeresströmungen, wie beispielsweise der Nordatlantikstrom, spielen für das Klima eine wichtige Rolle. Sie transportieren warmes, salreiches Wasser aus den Tropen weit nach Norden und beeinflussen dadurch das Klima der dortigen Regionen. So ist es an den vom Nordatlantikstrom umspülten Küsten West-, Mittel- und Nordeuropas wärmer als auf vergleichbaren Breitengraden in Nordamerika, weil die warme Meeresströmung als „Fernheizung Europas“ für mildes Klima sorgt. Nach Erkenntnissen der Klimaforscher könnte die globale Erwärmung jedoch auch das Verhalten dieser Fernheizung beeinflussen. Ein vermehrter Zustrom von Süßwasser durch abtauende Gletscher in Verbindung mit steigenden Meerestemperaturen könnte den Nordatlantikstrom abschwächen oder sogar ganz ausfallen lassen. Die Folge wäre eine „Kleine Eiszeit“, bei der es in Nordeuropa um bis zu 5 °C kälter werden könnte als heute.

Was tun gegen den Klimawandel?

Wenn der Klimaschutz nicht schnell und effektiv angegangen wird, dann könnte es zu spät sein – zu spät für einige Regionen und ihre Bewohner, zu spät für viele Pflanzen und Tiere und zu spät auch für entscheidende Kipppunkte im Klimasystem. Diese seit Jahren von Klimaforschern fast schon gebetsmühlenartig wiederholte Mahnung stieß bisher nur bedingt auf offene Ohren.

Nur ganz allmählich realisieren auch Politiker, die breite Öffentlichkeit und die Entscheider der Wirtschaft, wie wenig Zeit zum Handeln noch bleibt. Geht die Emission von Treibhausgasen so weiter wie bisher, dann könnten die Auswirkungen am Ende unseres Jahrhunderts zu einer Senkung der globalen Wirtschaftsleistung um fünf bis 20 Prozent führen, so haben Wirtschaftsexperten errechnet. Allein die



Meeresströmungen wie hier der Nordatlantikstrom spielen eine wichtige Rolle als globale Wärmeverteiler. Doch die Erwärmung stört ihr sensibles Gleichgewicht. © GFDL

Rechts: Eis und Meer sind - wie hier in der Antarktis - wichtige Puffer im Klimasystem: Gletscher und Eisflächen reflektieren das Sonnenlicht und verhindern so eine Erwärmung, das Meer nimmt CO₂ auf und speichert es. Doch beide Puffer sind in Gefahr. © Harald Frater



Der Treibhausgas-Ausstoß von Kraftwerken und Industrien hat sich in den letzten Jahrzehnten weiter erhöht. © SXC

Zunahme von Extremwetterlagen wie Stürmen, Dürren oder Starkregen würde bis 2050 rund 0,5 bis ein Prozent der Weltwirtschaftsleistung kosten. So bedeutet beispielsweise ein Anstieg von nur fünf bis zehn Prozent in der Windgeschwindigkeit von Hurrikans für die USA die Verdoppelung der durchschnittlichen jährlichen Schadenssummen. In Großbritannien gehen schon heute jährlich 0,1 Prozent des Bruttoinlandsprodukts durch Überschwemmungen und Hochwasser verloren. Bei einer Temperaturerhöhung um drei bis vier °C würde sich dieser Wert verdoppeln bis vervierfachen. Solche Einbußen wären für die ohnehin reichereren Industrieländer vielleicht tragbar, nicht aber für Menschen in Entwicklungsländern, die ohnehin bereits am oder unterhalb des Existenzminimums leben.

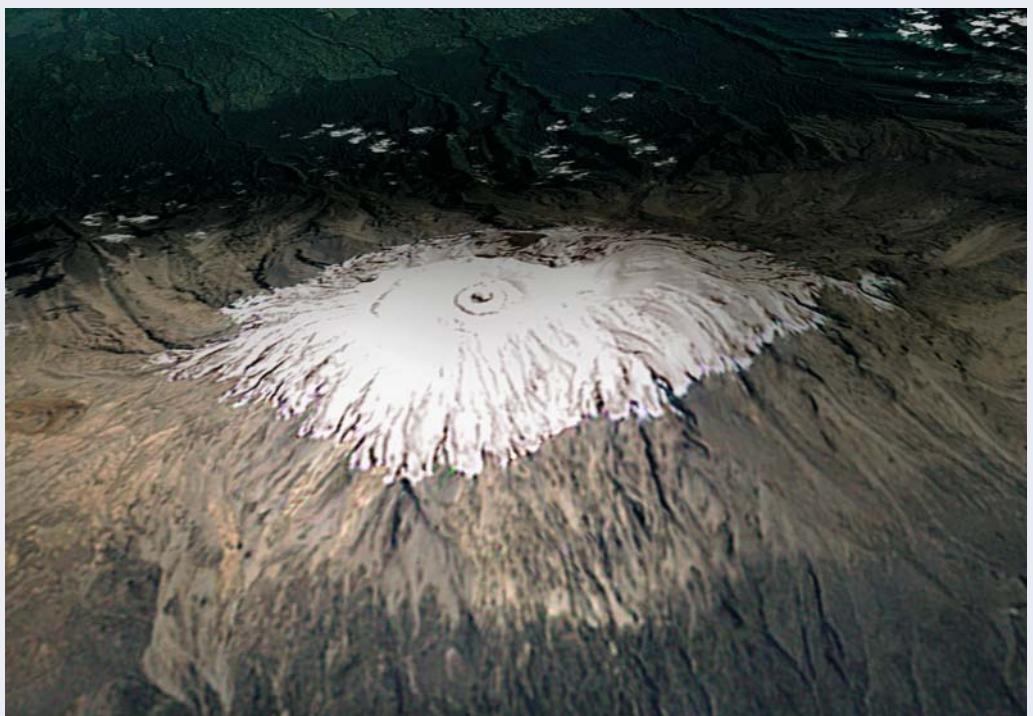
Aber lässt sich die Entwicklung überhaupt noch aufhalten? Und wie viel Zeit bleibt zum Handeln? Selbst wenn von heute auf morgen alle CO₂-Emissionen um 60 bis 70 Prozent reduziert werden würden, wäre der Klimawandel damit noch nicht gestoppt, auch das zeigen die Simulationen der Klimaforscher. Die Trägheit des Klimasystems sorgt dafür, dass die globalen Temperaturen in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen würden – um rund ein halbes Grad bis 2100. Realistisch wäre eine so große Reduktion der Emissionen aber ohnehin nicht, das sehen inzwischen auch die Wissenschaftler. Sie plädieren für eine Begrenzung der Erwärmung auf zwei Grad um die Folgen des Klimawandels zumindest in einem handhabbaren – und bezahlbaren – Maß zu halten. Um dieses Ziel zu erreichen, das sich auch die EU offiziell auf die Fahnen geschrieben hat, müssten die weltweiten Treibhausgas-Emissionen in den nächsten 30 Jahren jährlich um mindestens ein



Prozent sinken. Das klingt ersteinmal nicht extrem viel, doch auf die nächsten 50 Jahre aufsummiert läuft dies auf eine Reduktion der jetzigen Emissionen um die Hälfte hinaus. Inzwischen deuten aber mehrere Studien darauf hin, dass ein sehr viel schnelleres Handeln nötig sein könnte, um die Entwicklung noch aufzuhalten. Demnach müsste bis spätestens 2015 der Treibhausgas-Ausstoß um 48 bis 86 Prozent gegenüber dem Jahr 2000 verringert werden. Nur eine solche „Vollbremsung“ könne die Menschheit noch vor einem Klimakollaps retten, warnen die Klimaforscher.

Aber welche Maßnahmen wären in relativ kurzer Zeit machbar – und vor allem international durchsetzbar? Denn Klimaschutz auf globaler Ebene ist alles andere als einfach oder schnell, das zeigen die bisherigen Bemühungen wie die Klimarahmenkonvention oder das im Jahr 1997 beschlossene Kyoto-Protokoll. Dieses Protokoll sieht vor, dass die Industrieländer ihre Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2012 im Schnitt um fünf Prozent bezogen auf die Werte von 1990 senken. Einberechnet sind dabei die Emissionen von Kohlendioxid, Methan und Stickoxiden, außerdem die Abgabe von drei besonders langlebigen Fluorkohlenwasserstoff-Verbindungen. Wie weit die Emissionen für jedes Land gesenkt werden müssen, ist individuell in einem Reduktionsziel festgelegt. Neben den Reduktionsvorgaben legte das Kyoto-Protokoll zusätzlich drei Mechanismen fest, die dazu beitragen sollen, die globalen Emissionen zu vermindern. Eine davon ist der Emissionshandel. In seinem Rahmen können Unternehmen, aber auch ganze Länder, mit den ihnen zugeteilten zulässigen CO₂-Ausstoß-Mengen handeln. Staaten, die

Ungebremst wird der Klimawandel in Zukunft hohe Kosten für die Volkswirtschaften verursachen. © SXC



ihre Emissionen stärker reduzieren als im Kyoto-Protokoll vorgesehen, könnten so beispielsweise die Differenz zwischen tatsächlichen Treibhausgas-Emissionen und festgelegter Obergrenze in Form einer entsprechenden Anzahl an Zertifikaten an andere Vertragsstaaten verkaufen.

Links: Trotz aller Bemühungen schreitet die Erwärmung voran: Der Gipfelgletscher des Kilimandscharo schrumpfte zwischen 1993 und 2000 deutlich. © USGS

Das Kyoto-Protokoll sah eigentlich vor, dass die teilnehmenden Staaten bis zum Jahr 2005 schon einen „vorzeigbaren Fortschritt“ in der Reduktion ihrer Treibhausgas-Emissionen erreichen sollten. Wie es damit tatsächlich aussah, zeigte dann Mitte November 2005 ein erster umfassender Bericht des UN-Klimasekretariats. Demnach hatten die Industrieländer zwischenzeitlich ihre Treibhausgas-Emissionen zwar um rund 5,9 Prozent vermindert. Ein Großteil davon war jedoch auf den Zusammenbruch des Ostblocks zurückzuführen und war daher kurzlebig. Mit der Erholung der Wirtschaft in Osteuropa erhöhte sich daher auch der Ausstoß von klimaschädlichen Gasen wieder. Die westlichen Industrieländer hatten dagegen kaum nennenswerte Reduktionen vorzuweisen.

Und es sollte noch schlimmer kommen: Im Herbst 2008 veröffentlichte das Global Carbon Project, ein internationaler Zusammenschluss verschiedener Forschungseinrichtungen, die aktuellsten Zahlen für die Kohlenstoffbilanz der Erde. Das Ergebnis war besorgnisregend: Trotz der Klimaschutzbemühungen im Rahmen des Kyoto-Protokolls und anderer Initiativen hatte sich der Treibhausgas-Ausstoß zwischen 2000 und 2007 weltweit gegenüber den vorhergehenden Dekaden um das Vierfache beschleunigt. Mit wachsender Wirtschaft und zunehmender Industrialisierung rücken auch die Staaten Asiens und Südamerikas immer stärker in die Liga der Großemittenden vor – und eine Aussicht auf eine Trendumkehr besteht hier laut dem Klimasekretariat der Vereinten Nati-

Die Städte Rio de Janeiro und Kyoto stehen für zwei wichtige Vereinbarungen im Klimaschutz: die Klimarahmenkonvention und das Kyoto-Protokoll. © GFDL; Bernhard Gagnon/GFDL





Der steigende Strombedarf und seine bisherige Erzeugung vor allem aus fossilen Brennstoffen ist eines der Probleme, die es im Klimaschutz zu bewältigen gilt.

© SXC

onen eher nicht. Noch gelten die Zielvorgaben von Kyoto primär für die Industrieländer, die meisten Entwicklungsländer sind von den Verpflichtungen zur Reduktion ihrer Emissionen ausgenommen. Dennoch herrscht bei Klimaforschern weitgehend Einigkeit darüber, dass gerade bevölkerungsreiche Schwellenländer wie China oder Indien für den Klimaschutz zukünftig eine entscheidende Rolle spielen werden. Wie diese konkret aussehen könnte, darüber wird allerdings auf dem internationalen klimapolitischen Parkett noch intensiv diskutiert.

Neben politischen Lösungen sehen die meisten Experten die Entwicklung von emissionsarmen und energieeffizienten Technologien als einen Schlüsselfaktor im Klimaschutz an. Nach Ansicht des IPCC kann dabei jedoch nicht eine einzige Technologie oder Strategie den Klimawandel aufhalten, sondern es müssen alle Sektoren zum Klimaschutzziel beitragen – eine einfache Patentlösung gibt es also nicht. Ein wichtiger Ansatz, darin sind sich nahezu alle Experten einig, sind erneuerbare Energien. Sie könnten die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen überwinden helfen und damit langfristig den CO₂-Ausstoß senken. Immerhin rund 13 Prozent der Energiegewinnung weltweit basieren bereits auf erneuerbaren Energien, so das Ergebnis einer Studie des Bundesumweltministeriums aus dem Jahr 2008. Die Internationale Energieagentur IEA geht davon aus, dass bis 2030 mehr als ein Viertel des weltweiten Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Bisher allerdings steigt der Weltenergieverbrauch so stark an, dass sich der Anteil der erneuerbaren Energien trotz positiver Entwicklung kaum gesteigert hat.

Klar ist inzwischen, dass die Klimafolgen sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch verstärken werden – selbst wenn Klimaschutzmaßnahmen greifen. Mindestens zwei °C mehr werden es in jedem Fall – und bereits diese lösen Folgen aus, die ohne Anpassung für viele Regionen nicht zu bewältigen sind. Erste Anzeichen dafür sind heute schon spürbar: Mit einem Zuviel an Wasser kämpfen immer mehr Anrainer von Flüssen und Bewohner von Meeresküsten. Starkregen lösen inzwischen nahezu jedes Jahr verheerende Überschwemmungen aus, Stürme lassen ganze Regionen im Wasser versinken. Anderswo dagegen fehlt das kostbare Nass: Saisonale Regenzeiten fallen aus oder verschieben sich, der Monsun wird unberechenbar, Niederschläge werden weniger.

Schon jetzt haben mehr als 800 Millionen Menschen nicht genug Nahrung, Dürren und Ernteausfälle häufen sich. Nach Schätzungen von Wissenschaftlern der Universität Hamburg sind bereits heute mehr als 20 Millionen Menschen auf der Flucht vor den direkten oder indirekten Auswirkungen des Klimawandels, in Zukunft könnte sich diese Zahl auf mehr als 50 Millionen erhöhen.

Rechts: Erneuerbare Energien wie Windkraft und Solar-energie tragen dazu bei, die Treibhausgas-Emissionen zu verringern. © SXC; NREL





Klimakapriolen – El Niño und Monsun

Regionale Klimaphänomene wie der El Niño können schwere Überschwemmungen auslösen, wie hier an der Westküste der USA. © FEMA

Ob El Niño im Pazifik oder der Monsun in Asien und Afrika - seit Jahrhunderten haben regionale Klimaphänomene das Leben und die Kultur ganzer Erdteile geprägt. Sie bringen den einen den ersehnten Regen, anderen aber sintflutartige Überschwemmungen und Stürme, sie verursachen außergewöhnliche Dürren oder lassen die Fische ausbleiben.

Doch diese Klimakapriolen haben nicht nur Folgen für ihre unmittelbare Nachbarschaft. Die mit ihnen verbundenen Veränderungen von Temperaturen, Meeresströmungen und Winden beeinflussen das Klimagesystem weltweit und sind verantwortlich für Wetterkatastrophen wie Dürren, sintflutartige Regenfälle oder Stürme auch am entgegengesetzten Ende der Erde. Allen diesen Phänomenen ist gemeinsam, dass sie periodisch zwischen mehreren Zuständen hin- und herschwanken – und dass sie sich auch gegenseitig beeinflussen.

El Niño: Wenn das „Christkind“ Amok läuft ...

„El Niño“, das Christkind – so nennen die peruanischen Fischer seit dem 19. Jahrhundert die jährliche Warmwasserperiode vor der südamerikanischen Pazifikküste, bei der immer um die Weihnachtszeit herum für einige Wochen die Fische ausbleiben. Das warme Wasser beschert den Fischern eine durchaus willkommene Zwangspause für Weihnachtsurlaub oder Reparaturen an der Ausrüstung.

Wenn allerdings Klimaforscher und Meteorologen vom El Niño sprechen, geht es um weit mehr als fischlose Ferien: Denn alle paar Jahre spielt das „Christkind“ verrückt. Das Wasser erwärmt sich in einem solchen Jahr stärker als sonst und dies nicht nur über wenige Wochen, sondern über Monate hinweg. Und nicht nur das, das gesamte Klima beginnt sich zu verändern: Sintflutartiger Regen fällt nun dort, wo sonst Wüstenklima herrscht, und feuchtwarme Tropenregionen haben plötzlich mit ausgedehnten Dürreperioden zu kämpfen. Von diesen Klimakapriolen ist dann nicht mehr nur Südamerika betroffen, sondern die gesamte Pazifikregion und in schwächerem Ausmaß auch der Rest der Welt.

Und all das wegen ein bisschen warmen Wassers? Im Prinzip ja: Der El Niño ist tatsächlich nichts anderes als ein gewaltiger Warmwasserschwall, der einmal quer über den Pazifik schwappt. Normalerweise wird diese gigantische Wassermenge von den westwärts wehenden Passatwinden im Westen des Ozeans festgehalten. Die Temperatur kann dann im Westpazifik bis zu zehn °C höher liegen als im Osten. Die gestauten Wassermassen wölben die Meeresoberfläche im Westen so stark auf, dass der Meeresspiegel um bis zu 150 Zentimeter ansteigt.

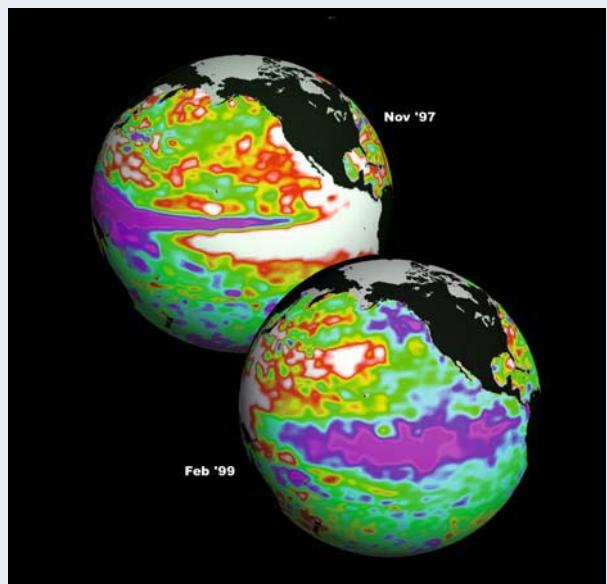
In El-Niño-Jahren jedoch werden die Passatwinde schwächer und können das Wasser nicht mehr aufhalten: Unerbittlich strömt dann das Meerwasser „bergab“ gen Osten und sammelt sich, meist mit Beginn des Winters, vor der Küste Südamerikas. Hier legt sich die wärmere Wassermasse wie ein Riegel über das normalerweise nach oben drängende kalte, nährstoffreiche Tiefenwasser und blockiert jeden Wasseraustausch. Das Kaltwasser bleibt in der Tiefe gefangen, der von ihm gespeiste Humboldtstrom bricht ab. Von der aufgeheizten Meeresoberfläche steigen währenddessen ungeheure Mengen feuchter Luft auf und transportieren große Mengen Wasser und Wärme in die Atmosphäre – und verändern damit das sensibel ausbalancierte Klimageschehen, zunächst lokal, dann aber weltweit.

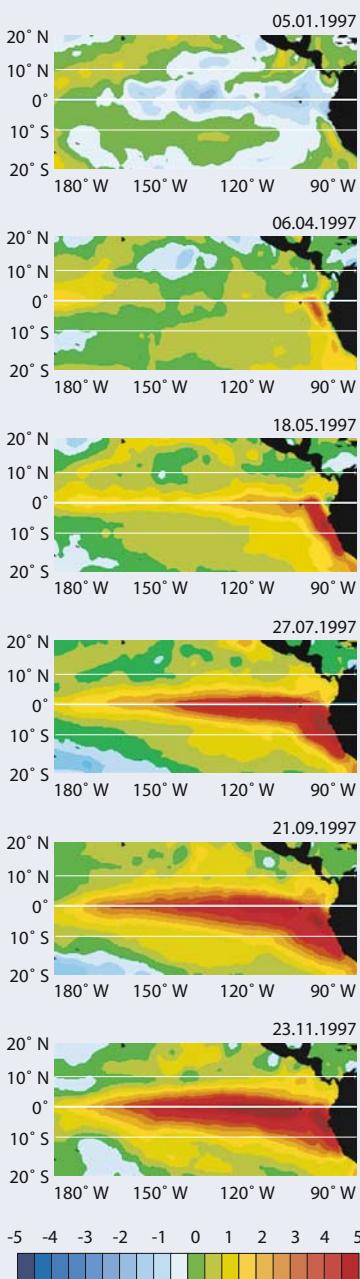
Der El Niño besitzt auch eine „kalte Schwester“, La Niña genannt, die oft im Anschluss an ein El-Niño-Ereignis auftritt. Wie ein Pendel, das in die Gegenrichtung ausschlägt, bringt ihr besonders starker Passat dem Ostpazifik keine Erwärmung, sondern eine anormale Abkühlung. Bis zu drei °C unter dem Durchschnitt liegen dann die Meerestemperaturen vor der Küste Perus.

ENSO: ein unberechenbares Pendel

Die Kapriolen von El Niño und La Niña gehören zum normalen irdischen Klimageschehen wie die Jahreszeiten oder der Monsun. Wie ein gewaltiges Pendel schwingen die wiederkehrenden Veränderungen von Wasser, Wind und Temperaturen seit Jahrtausenden zwischen Ost und West, Hoch und Tief, El Niño und La Niña hin und her. Jahresringe

Wie ein Pendel schwanken die Bedingungen im Ostpazifik zwischen El Niño, normal und La Niña hin und her.
© NASA/NOAA/TAO



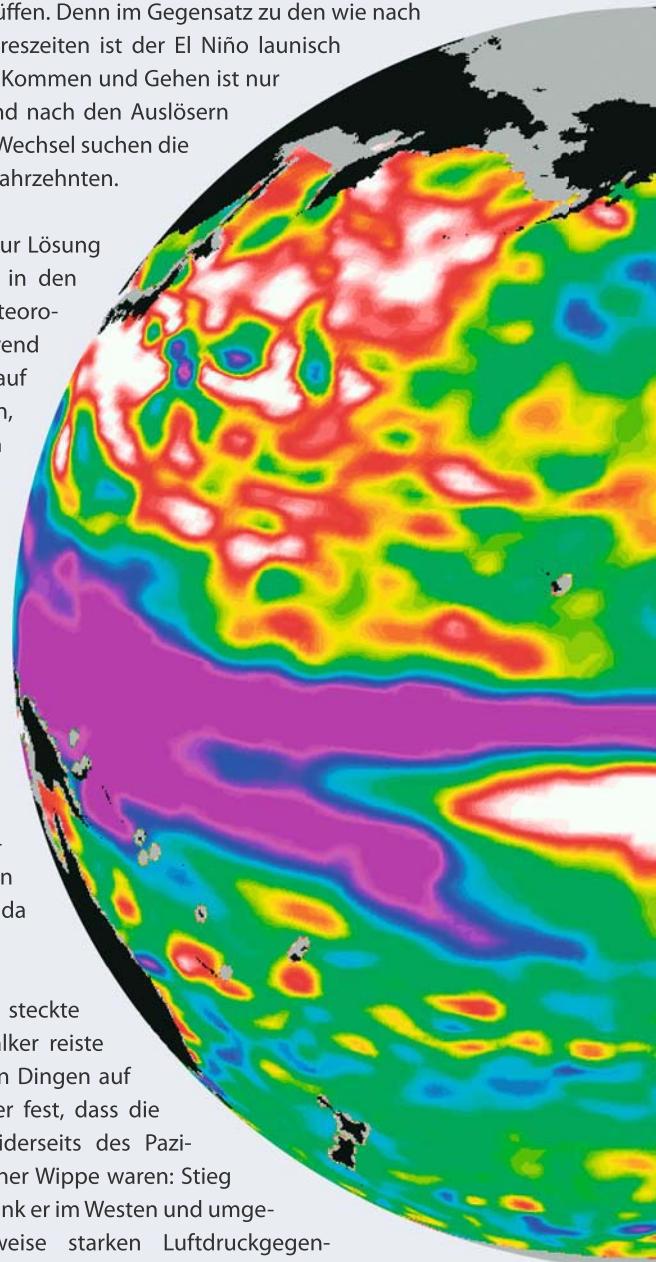


Entwicklung des El Niño 1997/98: Auf dem Höhepunkt des El Niño weichen die Temperaturen um bis zu 5 °C von den Normalwerten ab. © NASA

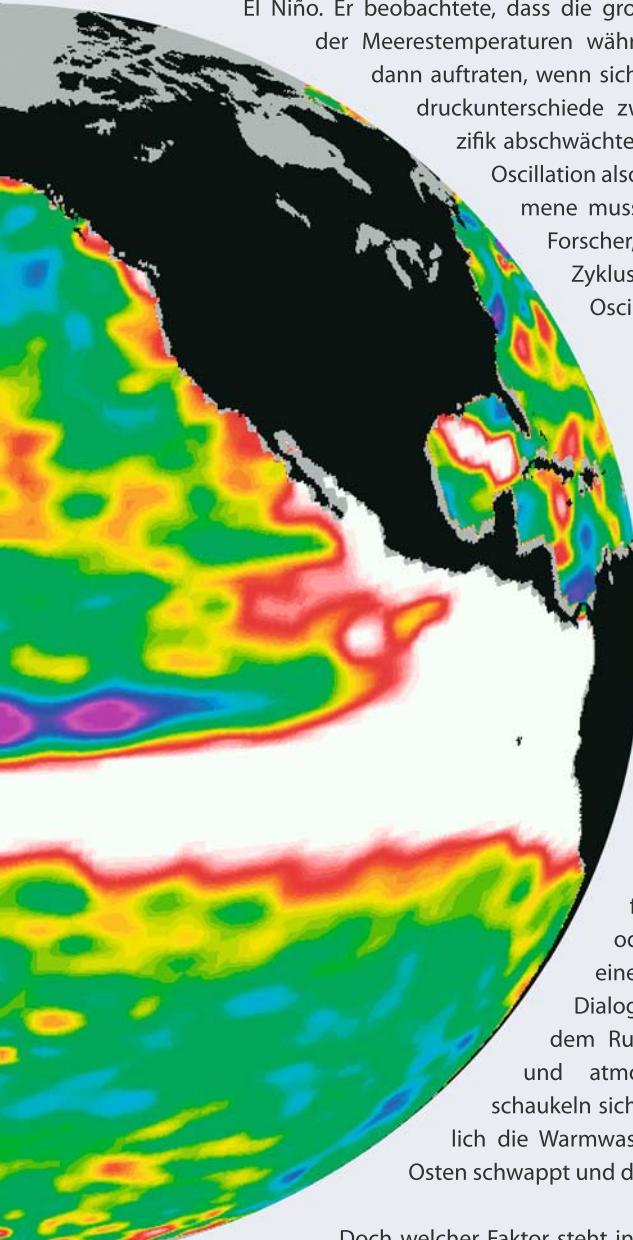
von jahrhundertealten Bäumen aus dem Amazonasgebiet, Eisbohrkerne aus dem Himalaya und Korallenstücke aus Neu-Guinea – sie alle zeugen von der langen Geschichte dieses Klimaphänomens. Und doch schafft El Niño es immer noch, die Wissenschaft zu verblüffen. Denn im Gegensatz zu den wie nach der Uhr ablaufenden Jahreszeiten ist der El Niño launisch und unberechenbar. Sein Kommen und Gehen ist nur schwer vorherzusagen und nach den Auslösern für die wiederkehrenden Wechsel suchen die Klimaforscher schon seit Jahrzehnten.

Das erste Puzzleteil zur Lösung dieses Rätsels entdeckte in den 1920er Jahren der Meteorologe Gilbert Walker. Während seine Kollegen noch vollauf damit beschäftigt waren, die lokalen Auswirkungen des El Niño entlang der südamerikanischen Küste zu beobachten, dachte er bereits in größeren Zusammenhängen. Ihm war aufgefallen, dass bestimmte Ausprägungen des indischen Monsuns oft von außergewöhnlichen Trockenperioden in Australien und Indonesien und besonders milden Wintern in Westkanada begleitet wurden.

Nur ein Zufall? Oder steckte doch mehr dahinter? Walker reiste nach Indien und ging den Dingen auf den Grund. Bald stellte er fest, dass die Luftdruckverhältnisse beiderseits des Pazifiks tatsächlich wie bei einer Wippe waren: Stieg der Luftdruck im Osten, sank er im Westen und umgekehrt. Diese normalerweise starken Luftdruckgegensätze schienen sich jedoch alle paar Jahre abzuschwächen. Und genau unter diesen „Low-Index“-Bedingungen ereigneten sich die Trockenheiten und Monsunstörungen, die Walker bereits früher aufgefallen waren. Walker taufte die von ihm entdeckten Luftdruckbewegungen „Southern Oscillation“ –



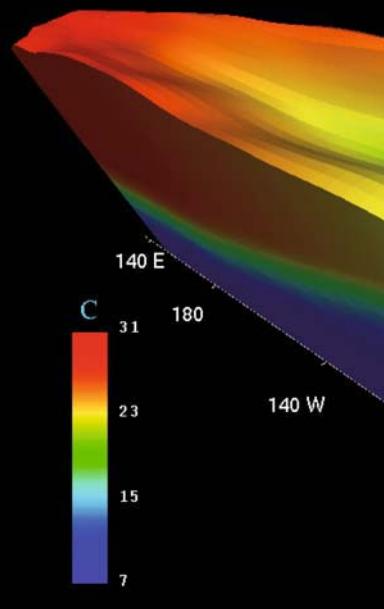
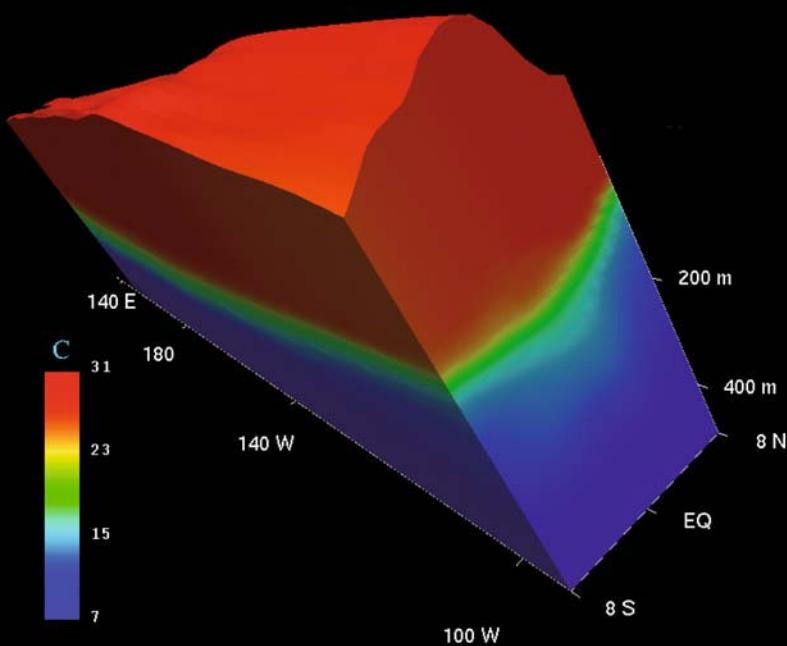
und wurde prompt von seinen Kollegen verachtet. Erst 40 Jahre später bestätigte ein anderer Klimaforscher, Jacob Bjerknes, die von Walker bereits vermuteten Zusammenhänge von „Southern Oscillation“ und Klimaphänomenen wie dem El Niño. Er beobachtete, dass die großräumigen Veränderungen der Meerestemperaturen während eines El Niño immer dann auftraten, wenn sich gleichzeitig auch die Luftdruckunterschiede zwischen Ost- und Westpazifik abschwächten, das Pendel der Southern Oscillation also ausschwang. Beide Phänomene mussten daher, so folgerte der Forscher, Teil eines einzigen großen Zyklus sein, des „El Niño Southern Oscillation“ oder ENSO.



Seit der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen El Niño und Southern Oscillation war klar, dass Winde, Wassertemperaturen und Druckverhältnisse im Pazifik über einen komplexen Rückkopplungskreislauf miteinander verbunden sind: Ozean und Atmosphäre stehen in einem andauernden Dialog, bei dem jede Äußerung des einen die Reaktion des jeweils anderen beeinflusst – entweder hemmend oder verstärkend. Während eines El Niño scheint dieser Dialog jedoch regelmäßig aus dem Ruder zu laufen. Ozeanische und atmosphärische Bedingungen schaukeln sich so lange hoch, bis schließlich die Warmwasserwelle von Westen nach Osten schwapppt und der El Niño eintritt.

Doch welcher Faktor steht in dieser Eskalationskette am Anfang? Sind es die schwächer werdenden Passatwinde, die das Gleichgewicht der Meeresströmungen durcheinanderbringen? Oder geben vielmehr die steigenden Meerestemperaturen den Ausschlag und die Winde sind nur deren Folge? Je weiter die Wissenschaftler in die Komplexität des Systems einsteigen,

Der El Niño im Winter 1997/98 gehörte zu den stärksten der Geschichte. Die Grafik zeigt die relativen Meereshöhen im Pazifik im Dezember 1997. Sie sind ein Maß für die El-Niño-typischen Temperaturanomalien.
© NASA/JPL



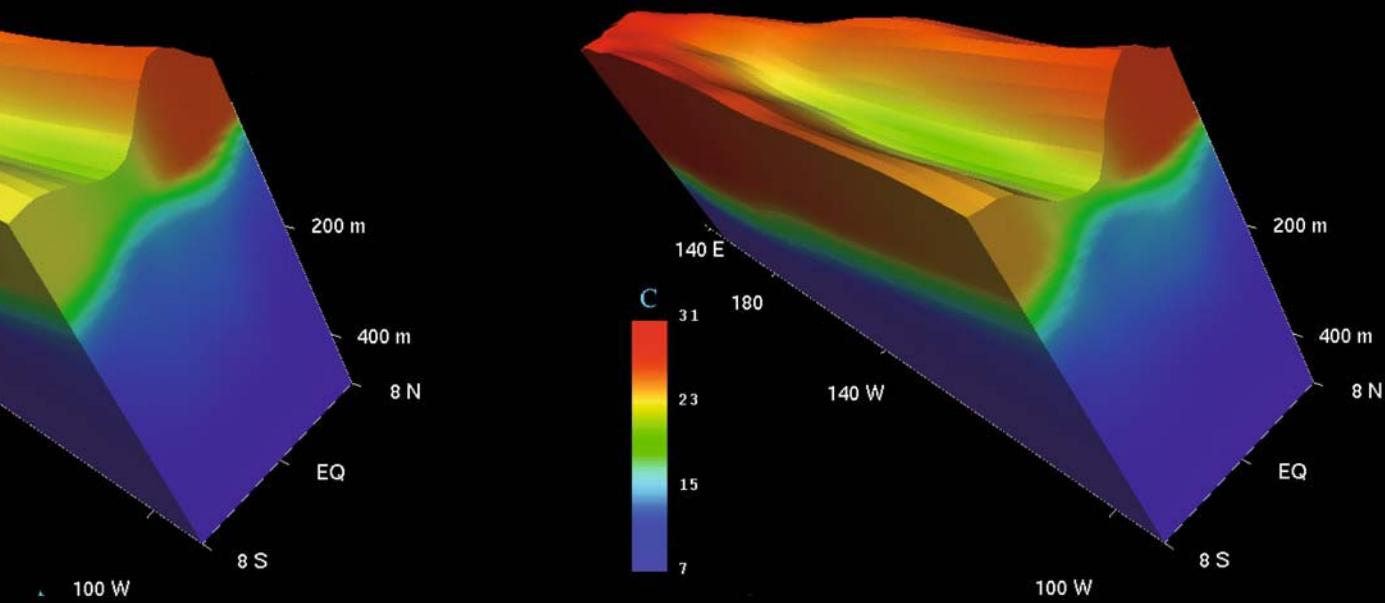
Temperaturen und Meereshöhen während eines El Niño (links), unter normalen Bedingungen (Mitte) und während einer La Niña (rechts). © NOAA/TAO/TRITON

desto mehr neue Fragen scheinen sich aufzutun. Und noch immer stehen sie vor dem alten Henne-Ei-Problem – oder, in diesem Falle, dem von Ozean oder Atmosphäre.

Inzwischen deuten einige Studien auf einen Zusammenhang von El-Niño-Beginn mit starken Schneefällen über Asien oder dem südostasiatischen Monsun hin. Andere Forscher glauben jedoch, in Störungen der Ozeanwellen, die sich über den tropischen Pazifik ausbreiten, den Auslöser zu erkennen. Und wieder andere verweisen auf Computermodelle, die auf die ozeanische Hitzebilanz als dem ausschlaggebenden Faktor aufbauen. Immer mehr Wissenschaftler vermuten, dass der El Niño unter Umständen nicht von einem einzigen Faktor, sondern durch ganz unterschiedliche „Trigger“ ausgelöst werden kann. Vielleicht reicht dann ja sogar der berühmt-berüchtigte Flügelschlag eines Schmetterlings ...

Was kommt, wenn er kommt?

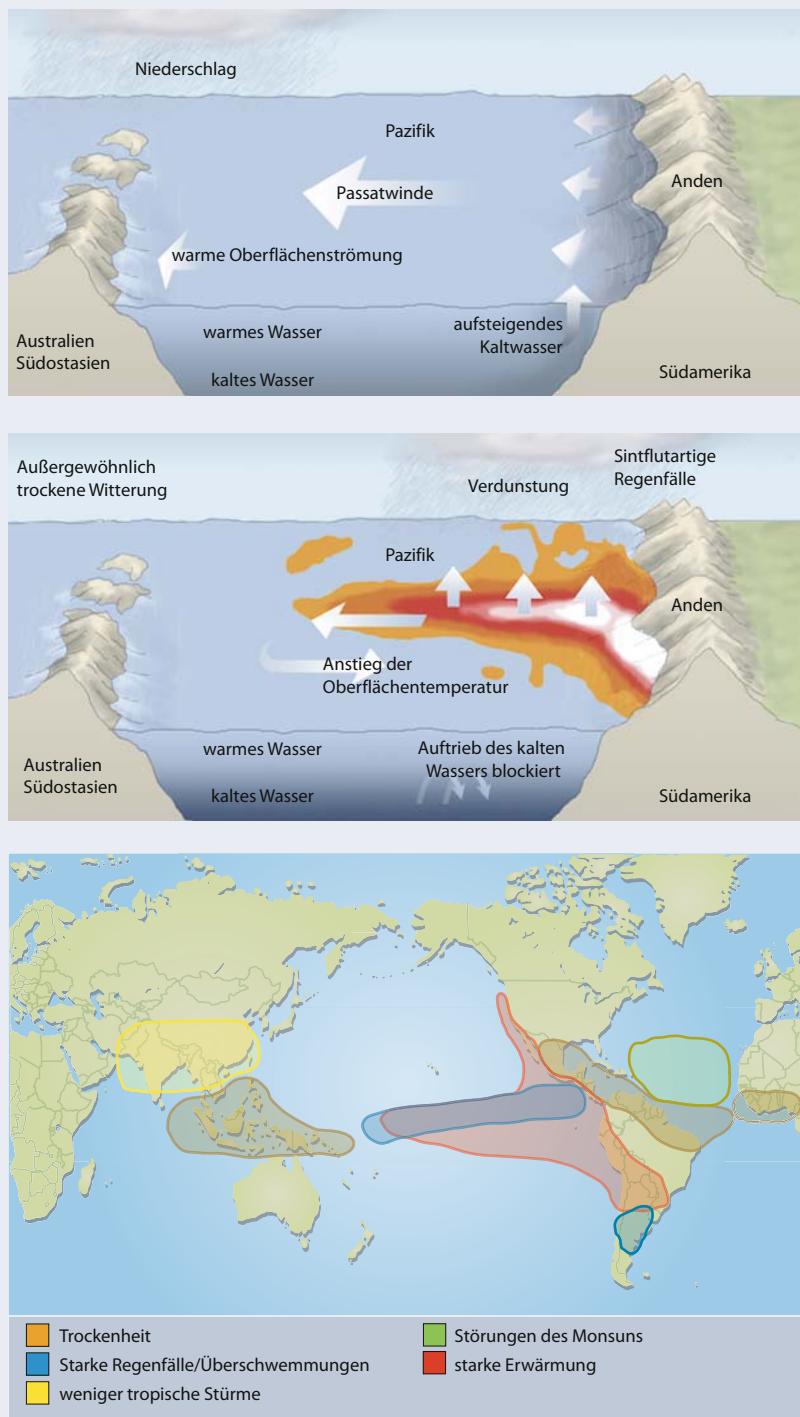
Die Anwohner des tropischen Pazifiks sind die ersten, die die Auswirkungen des El Niño zu spüren bekommen. Die normalen Wetterverhältnisse – trocken im Osten und feucht im Westen – kehren sich in einem El-Niño-Jahr noch im Laufe des Herbstes komplett um: Die normalerweise über den feuchtwarmen Regionen Asiens hängenden Regenwolken verziehen sich ostwärts. Die Folge sind Trockenheit und starke Waldbrandgefahr in Indonesien, Malaysia und anderen Ländern des tropischen Südostasiens. Während des starken El Niño von 1997/98 beispielsweise gerieten durch die Dürre die zahlreichen von indonesischen Waldarbeitern gelegten Brände so außer Kontrolle, dass die gesamte südostasiatische Region für Monate unter einem Rauch und Smogschleier versank. Von den typischerweise



durch El Niño ausgelösten Dürren bleiben auch Australien und das südliche Afrika nicht verschont. Der Regen, der den westlichen Pazifikstaaten fehlt, geht dafür um so reichlicher im Osten nieder: Die über dem aufgeheizten Ostpazifik aufsteigende warme und feuchte Luft regnet sich über den tropischen Küstenregionen Südamerikas wieder ab und löst Überschwemmungen und Erdrutsche aus. Ganze Ernten können in sintflutartigen Regenfällen ertrinken.

Doch die Wetterveränderungen beschränken sich nicht nur auf die Tropen, auch die gemäßigten Breiten bekommen die Kapriolen des „Christkinds“ zu spüren: Die an milde und trockene Winter gewöhnten Einwohner von Florida und den anderen südöstlichen „Sonnenstaaten“ der USA müssen sich dann auf ungemütlich nasses und kaltes Winterwetter einstellen. Im Golf von Mexiko fördert der El Niño zudem die Entstehung von Stürmen, die durch den abgelenkten Jetstream bis in den Südosten der USA getragen werden. Ein ähnlicher Mechanismus lässt die pazifischen Winterstürme weiter im Osten entstehen als gewöhnlich und lenkt sie südwärts an die Küsten Chiles und Argentiniens und nordwärts nach Kalifornien und entlang der amerikanischen Westküste.

Dort können starke Regenfälle und Rekordschneefälle immer wieder zu Überschwemmungen, Erdrutschen und Schlammlawinen führen. Einige der verheerendsten Erdrutsche im Südwesten der USA ereigneten sich während der El Niño-Jahre. Doch wenigstens einige der vom El Niño betroffenen Menschen können aufatmen: Für die Bewohner der hurrikangefährdeten Gebiete im Südwesten der USA sind El-Niño-Jahre gute Jahre, denn dann nehmen Zahl und Stärke der Wirbelstürme in dieser Region ab. Der El Niño verändert nicht nur Wetter und



Klima weltweit, er beeinflusst auch die Lebensbedingungen vieler Pflanzen und Tiere und kann so ganze Ökosysteme umkrempeln.

1982/83 verwandelten starke Regenfälle die Küstenwüsten Ecuadors und Perus innerhalb von kürzester Zeit in ein fruchtbares, von Seen durchzogenes Grasland. Die üppige Vegetation zog Schwärme von Grashüpfern und Grillen an, die wiederum unzähligen Kröten und Vögeln reiche Nahrung boten. In den neu entstandenen Seen fanden durch Überflutungen ange schwemmte oder vom Meer aus strom aufwärts gewanderte Fische eine neue Heimat – und wurden von den ortsansässigen Fischern begeistert begrüßt. Nach sechs Monaten fand der neue „Garten Eden“ allerdings ein schnelles Ende: Der El Niño ging und die Wüste kehrte zurück.

Doch so paradiesisch sind die Auswirkungen des El Niño nur selten. Die Regel sind eher vertrocknende oder im Regen ertrinkende Ernten, vergammelndes Saatgut oder durch Brände vernichtete Wälder. Für die meist ohnehin armen Länder in den betroffenen tropischen Regionen bedeutet dies nicht nur enorme wirtschaftliche Einbußen, oft droht sogar eine Hungersnot.

Hinzu kommt, dass die neu entstehenden Seen und angeschwollenen Flüsse nicht nur Fischen und Kröten einen neuen Lebensraum bieten, sondern auch Moskitos und anderen Krankheitsüberträgern. Als Folge nehmen Malaria, Cholera, aber auch verschiedene Viruskrankheiten zu. Während die Moskitos wachsen und



gediehen, ergeht es vielen anderen Tieren der Tropen in El-Niño-Jahren ziemlich schlecht. So kommt es dann in den Küstenregionen des Osthindus immer wieder zu großen Fischsterben oder -wanderungen. Verursacht werden sie durch die erhöhte Wassertemperatur und das ausbleibende nährstoffreiche Tiefenwasser. Leidtragende der dezimierten Fischbestände sind nicht nur die Fischer, sondern vor allem auch die fischfressenden Vögel. Zoologen haben beobachtet, dass viele Seevögel in einem El-Niño-Jahr ihr Nest verlassen müssen, abwandern oder sterben.

Während des El Niño 1982/83 gingen allein in Peru bis zu 85 Prozent der Seevögel ein. Neben sintflutartigen Regenfällen und überschwemmten Nestern war vermutlich vor allem der Mangel an Futterfischen die Ursache. Auch Korallen reagieren schon auf kleinste Veränderungen der Wassertemperatur. Erwärmt sich das Meer nur um wenige Grad, stört dies die empfindliche Symbiose zwischen Korallen und den in ihnen lebenden Mikroorganismen und ganze Korallenriffe gehen zugrunde. Während des El-Niño-Jahres 1982/83 starben dadurch 90 Prozent der Korallen im Osthindus ab.

Auch wenn sich Pflanzen- und Tierwelt letztendlich doch immer wieder von den Umwälzungen des El Niño erholen und auch die betroffenen Länder ihre Wirtschaft wieder in Gang bringen – es ist nur eine Frage der Zeit, bis das pazifische Pendel das nächste Mal ausschlägt und der El Niño wiederkommt.

Ein ozeanisches Fieberthermometer als Vorwarnhilfe

Bis vor wenigen Jahren steckte die El-Niño-Vorhersage noch in den Anfängen – mit teilweise fatalen Folgen. Noch im Spätsommer 1982 waren sich Klimaforscher darin einig, dass im folgenden Winter kein El-Niño-Ereignis bevorstehe. Zwar hatten einige Messschiffe eine Erhöhung der Meerestemperatur im östlichen Pazifik beobachtet, die Satellitendaten zeigten jedoch keinerlei signifikante Veränderungen. Und auch die Computermodelle der Klimaforscher blieben stumm. Eine Warnung blieb aus. Noch bis in den Herbst 1982 hinein wähnten sich die Klimatologen – und mit ihnen der Rest der Welt – in Sicherheit. Mögliche Vor-

*Korallensterben, Erdutsche und Waldbrände gehören zu den sekundären Folgen eines El Niño.
© IMSI MasterClips; FEMA*



Wartungsarbeiten an einer Boje
zur El-Niño-Vorhersage.
© NOAA/ PMEL/TAO

kehrungen und Vorbeugungsmaßnahmen unterblieben. Und prompt trat das Unerwartete ein: Im Dezember 1982 kam der totgesagte El Niño nicht nur mit voller Macht, er entwickelte sich auch zu einem der stärksten El Niños des 20. Jahrhunderts. In seiner Folge gab es Dürren und Buschbrände in Australien, Überschwemmungen und Erdrutsche in Süd-amerika und Stürme an der gesamten amerikanischen Westküste. Tausende von Menschen wurden Opfer der von El Niño ausgelösten Naturkatastrophen, die Schäden gingen in die Milliarden.

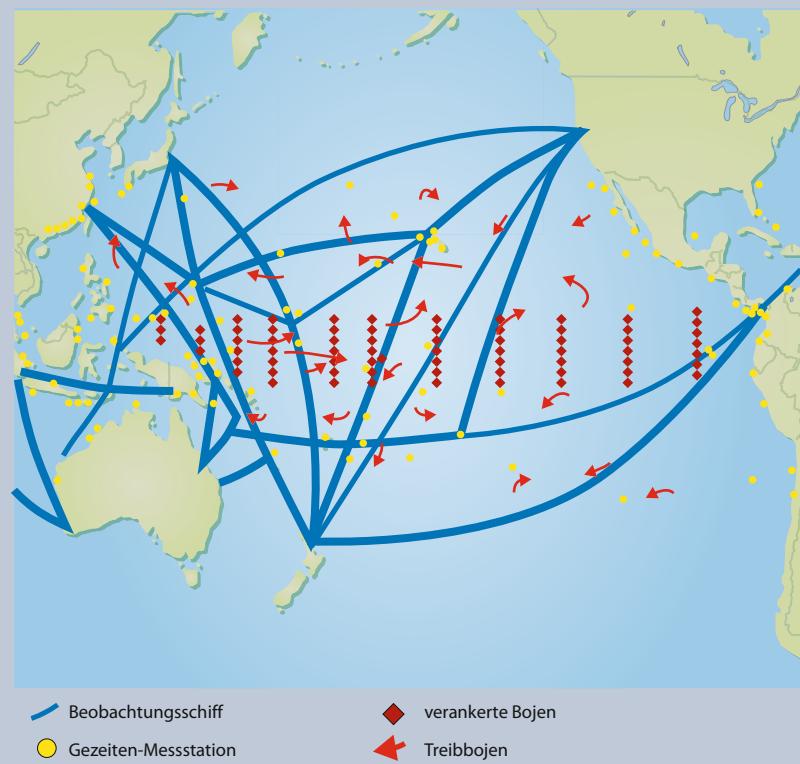
Doch entmutigen ließen sich die Klimaforscher durch den Rückschlag von 1982/83 nicht. Noch im gleichen Jahr begannen die amerikanischen Wissenschaftler John Toole und Stan Hayes mit der Entwicklung eines völlig neuen Systems der El-Niño-Vorhersage. Es sollte nicht auf Satellitendaten basieren, sondern in erster Linie auf Temperaturmessungen vor Ort: mitten im Ozean. Anfangs noch verlacht und nicht ernst genommen, setzten sich Toole und Hayes 1983 mit ihrer Idee durch. Ihr simples, aber effektives Messsystem bildet bis heute das Rückgrat der El-Niño-Vorhersagen.

Als „ozeanisches Fieberthermometer“ dient den Forschern dabei ein sich 20.000 Kilometer quer über den Pazifik erstreckendes Messnetz aus verankerten Bojen und Treibbojen.

Die unzähligen Geräte des TAO-TRITON-Netzes registrieren kontinuierlich Temperatur, Druck, Strömung, Sonneneinstrahlung und andere Faktoren an der Meeresoberfläche und bis zu 500 Meter darunter. Über Antennen senden sie ihre gesammelten Informationen regelmäßig über Satelliten direkt an die großen Rechenzentren der Klimaforscher, wo sie mit Messergebnissen von zusätzlichen Beobachtungsschiffen kombiniert und ausgewertet werden. „TAO ist ein Stethoskop“, erklärt Mike McPhaden, der Nachfolger von Hayes im El-Niño-Forschungsteam, das Prinzip des Messnetzes. „Wir nutzen es, um die natürlichen Rhythmen, den Herzschlag des globalen Klimasystems zu überwachen und kennenzulernen. Auch der Wechsel der Jahreszeiten wäre eine Katastrophe, wenn wir nicht auf ihn vorbereitet wären. Mit einem Kalender – einem Vorhersagesystem – wird die Katastrophe nur noch eine lästige oder sogar günstige Veränderung. Genau das wollen wir mit TAO-TRITON auch für den El Niño erreichen.“

Inzwischen bildet das TAO-TRITON-System zusammen mit Messsatelliten und den immer weiter verbesserten Prognosemodellen und Klimasimulationen das Herzstück der modernen El-Niño-Vorhersage. Mit ihr kann im Idealfall ein drohender El Niño schon bis zu ein Jahr im Voraus entdeckt werden. Seinen Härtetest bestand das System im Jahr 1997, als es ein halbes Jahr vor Einsetzen eines der stärksten El Niños des 20. Jahrhunderts Alarm schlug und so rechtzeitig vorbeugende Maßnahmen ergriffen werden konnten.

Aber was kann überhaupt noch getan werden, wenn sich ein El Niño anbahnt? Verhindern lässt sich das Klimaphänomen nicht, wohl aber seine schlimmsten Folgen. Peru ist eines der Länder, die ein standardisiertes System von Vorhersage und daraus folgenden Maßnahmen und Handlungsanweisungen entwickelt haben. Jedes Jahr im November veröffentlichen die peruanischen Klimaforscher die Prognosen für die kommende Regenzeit. Dabei stufen sie ihre Ergebnisse in eine von vier Kategorien ein: normale Bedingungen, schwacher El Niño mit erhöhten Niederschlägen, starker El Niño mit Überschwemmungen und als Vierter La-Niña-Bedingungen mit erhöhtem Dürrerisiko. Steht der Status fest, treffen sich Regierungsbeamte und Vertreter der Landwirtschaftsverbände, um gemeinsam zu entscheiden, welche Kombination von Pflanzen ausgesät werden sollte, um unter den vorhergesagten Bedingungen dennoch optimale Ernten zu erzielen. Besonders Reis und Baumwolle, zwei der wichtigsten Feldfrüchte im Norden Perus, sind extrem sensibel gegenüber Menge und Zeitpunkt der Niederschläge. Entsprechend empfiehlt das peruanische El-Niño-Team den Bauern, in feuchten El-Niño-Jahren vermehrt Reis, in normalen oder trockenen Jahren dagegen mehr Baumwolle anzubauen, um Missernten zu vermeiden. Ähnliche Maßnahmen gibt es inzwischen auch in anderen stark vom El Niño betroffenen Ländern wie Australien, Brasilien, Äthiopien und China.



Das TAO-TRITON-Messnetz

Das Messnetz erstreckt sich 20.000 Kilometer quer über den Pazifik und besteht aus verschiedenen Bojen sowie Gezeitenstationen und Schiffen.

Die verankerten Bojen messen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Windstärke, aber auch die Temperatur des Wassers in unterschiedlichen Tiefen.

Die Treibbojen messen Richtung und Stärke von Meeresströmungen.

Gezeitenstationen registrieren die örtlichen Veränderungen des Meeresspiegels an den Küsten. Ein El Niño ist mit sinkenden Pegeln im Westpazifik und steigendem Wasserspiegel im Ostpazifik verbunden.

Die Beobachtungsschiffe bringen neue Bojen aus und warten die bereits ausgesetzten. Zusätzlich führen sie jedoch auch eigene Messungen durch.

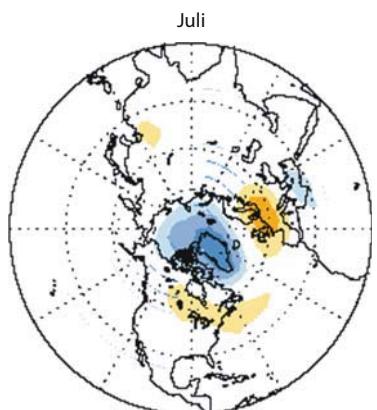
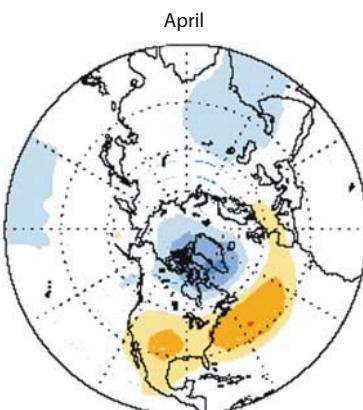
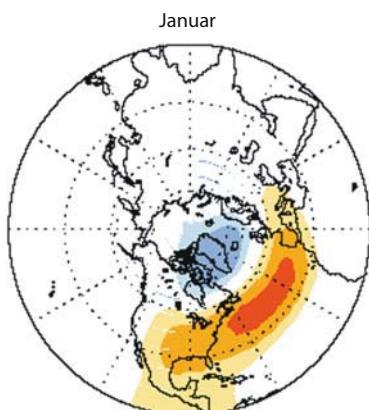
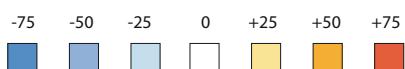
© NOAA/TAO/PMEL

Doch auch in nichttropischen Regionen kann die entsprechende Vorwarnung einiges an Geld und Schäden ersparen. So verursachte der starke und überraschend aufgetretene El Niño von 1982/83 allein in Kalifornien wirtschaftliche Einbußen von rund 2,2 Milliarden US-Dollar. Der nicht minder starke El Niño von 1997/98 dagegen schlug nur mit genau der Hälfte, 1,1 Milliarden Dollar, zu Buche. Zu verdanken hatten dies die Kalifornier vor allem den rechtzeitigen Vorbeugungsmaßnahmen: Schon im Vorfeld gaben die Einwohner und Behörden des Bundesstaates mehr als 125 Millionen Dollar für Sturm- und Regensicherungen von Geschäftsgebäuden und Wohnhäusern aus. Farmer passten Aussaat und Bewirtschaftungsmaßnahmen den zu erwartenden starken Niederschlägen an und Wasser- und Stromversorger sicherten Staudämme und stellten die Energieversorgung teilweise auf Wasserkraft um. Diese Aktionen konnten zwar nicht alle Folgen des El Niño verhindern, die Schäden aber immerhin deutlich verringern.

Der Cousin aus dem hohen Norden: die Nordatlantische Oszillation

Auf der Nordhalbkugel gibt es eine Parallele zu El Niño, genannt Nordatlantische Oszillation (NAO). Sie ist das Resultat eines Zusammenspiels des bekannten Islandiefs und des Azorenhochs. Liegen beide in etwa über ihren namensgebenden Inseln, befindet sich das System im „positiven“ Modus. Durch ihre entgegengesetzten Drehbewegungen schleusen Hoch und Tief zwischen sich Winde über den Nordatlantik nach Osten Richtung Europa. Wenn bei Winterbeginn die Temperaturen im Norden sinken, wird der Druckunterschied zwischen beiden Systemen größer und die Winde verstärken sich. Für Europa bedeutet das einerseits verhältnismäßig nasse und milde Winter, weil die Winde über dem Atlantik Feuchtigkeit aufnehmen, andererseits aber auch stärkere Stürme. Dem Osten der USA und Kanadas bringen sie genau das Gegenteil, denn von dort wird die Kaltluft auf der Rückseite des Tiefs nach Süden gelenkt, dadurch sind die Winter kälter.

Positive NAO: Azorenhoch und Islandtief liegen an ihren typischen Positionen und zeigen ausgeprägte Druckunterschiede (hier ausgedrückt durch den positiven Wert des NAO-Index).
© NOAA



Befindet sich die Oszillation dagegen im „negativen“ Modus, verlässt das Islandtief seinen angestammten Ort und wandert nach Süden Richtung Azoren. Im Gegenzug verschiebt sich das Azorenhoch nach Norden. Als Folge wird die Höhenströmung nach Süden Richtung Mittelmeer umgelenkt, so dass es dort häufig und kräftig regnet, teilweise sogar bis in den Nahen Osten hinein. Die Winter in Europa werden kälter, im Osten der USA und in Kanada tendenziell milder.

Die NAO kann innerhalb von Tagen wechseln, aber im Allgemeinen verharrt sie länger im positiven Modus als im negativen. Statistische Daten zeigen, dass es Zyklen sowohl von zwei bis fünf Jahren als auch dekadische Oszillationen von zwölf bis 15 Jahren gibt. Noch länger ist die Atlantische Multidekaden Oszillation (AMO) von etwa 70 Jahren. Seit 1980 war die NAO mit Ausnahme des Jahres 1995 im Wesentlichen positiv. Europa war dadurch zahlreichen schweren Winterstürmen mit enormen Schäden ausgesetzt. Gleichzeitig sorgte jahrelange Trockenheit auf der Iberischen Halbinsel für Ernteeinbußen und leere Wasserspeicher.

Die genauen Ursachen der Nordatlantischen Oszillation sind noch nicht eindeutig geklärt. Wissenschaftler vermuten jedoch, dass sowohl der Ozean als auch die Atmosphäre eine Rolle spielen. Klimamodelle belegen, dass NAO auf Veränderungen in der weltweiten Temperatur reagiert. Ob die seit fast 30 Jahren dominierend positive NAO allerdings eine Folge der globalen Klimaerwärmung sein könnte, ist noch unklar.

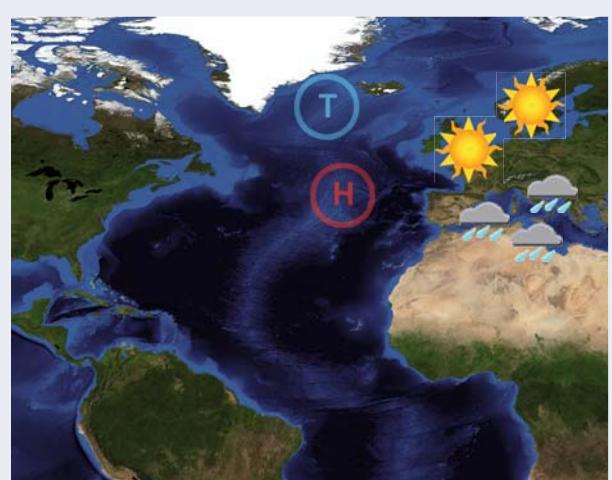
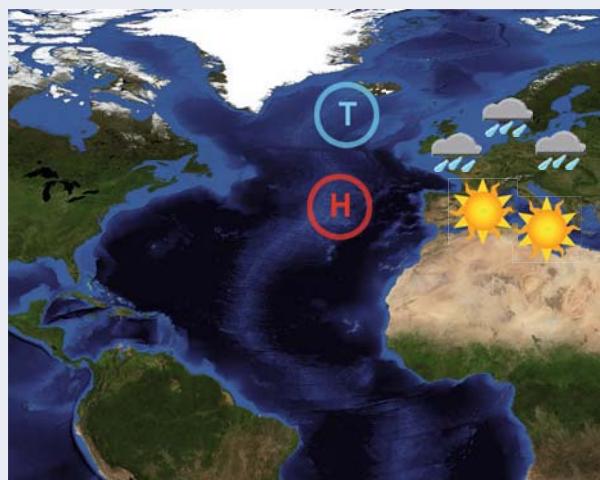
Der Monsun: Lebensspender und Zerstörer

Er ist eines der bekanntesten Klimaphänomene der Welt – und sicherlich das regenreichste: der Monsun. Regentropfen fallen wie Bindfäden und sintflutartige Wassermassen brechen aus dunklen Wolken über Indien, Thailand und Bangla-

Positive NAO (links): Starke Druckunterschiede zwischen Azorenhoch und Islandtief bringen milde, feuchte Luft nach Mitteleuropa.

Negative NAO (rechts): Abgeschwächte Druckunterschiede verändern die Westströmung, so dass die Feuchtluft zum Mittelmeer umgelenkt wird.

© MMCD NEW MEDIA





desh, aber auch Afrika und Mittelamerika herein. Der Monsun bestimmt das Leben von rund zwei Dritteln der Weltbevölkerung: Er überschwemmt, verwüstet und reißt jährlich Tausende in den Tod – und spendet Leben für Millionen. Ohne Monsun gibt es keine Ernte und ohne Ernte weder Geld noch Nahrung.

Wie aber entsteht dieses Phänomen? Ursache des asiatischen Monsuns ist die starke sommerliche Erwärmung Nordwestindiens und der Hochfläche Tibets. Dabei entsteht ein gewaltiges Hitzetief über dem Festland, das die Luftmassen in sich hineinsaugt. Dadurch zieht es wie ein Staubsauger den Passat der Südhalbkugel über den Äquator Richtung Norden. Die auf der Nordhalbkugel umgekehrten Kräfte der Erdrotation lenken den Südostpassat in einen Südwestwind ab, der Kurs auf den asiatischen Kontinent nimmt. Von diesem Wind angeschoben erreicht die feuchtwarme Luft die Küste Indiens als Monsun und gleitet auf das dort liegende Hitzetief auf. Zum Aufsteigen gezwungen, kühlt sich die Luft mit der Höhe ab und kann die Feuchtigkeit nicht mehr halten: Der Monsun überzieht das Land mit heftigen Regenfällen. Ein kleiner Trost für die Bewohner dieser Region: Der Großteil des Regens fällt nachts. Der Monsun wandert im Laufe der Saison bis zum Himalaja, erst dort blockieren die Bergriesen das weitere Vordringen der Luftmassen.

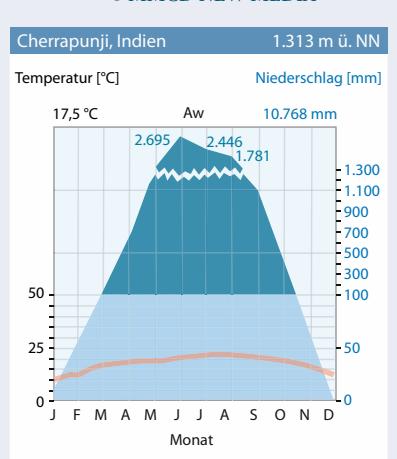
Das Förderband des Monsunregens kommt erst zum Stillstand, wenn sich das Hitzetief im September langsam aufzulösen beginnt und sich die Tiefdruckrinne wieder zurück an den Äquator verschiebt. Langsam kommt auch der Regen zur Ruhe. In Cherrapunji, einem Städtchen im Nordosten Indiens, sinken die Monatsmittel zwischen November und Februar unter 100 Millimeter pro Monat – verglichen mit mehr als 2.600 Millimetern im Juni kaum mehr als ein paar Tropfen.

Wassermassen reißen Brücken aus der Verankerung, untergraben die Asphaltdecken der Straßen und spülen Bahngleise weg. Schlammfluten steigen über die Ufer, drücken Häuser ein und waschen ganze Dörfer von der Erdoberfläche – jedes Jahr wieder. Bereits nach dem ersten Monsun-Regen Anfang Juni 2006 sind über 500.000 Inder auf der Flucht vor dem Hochwasser, 800 Dörfer allein im Staat Assam überschwemmt und mehr als 120 Menschen in den Fluten umgekommen. Bis zum Ende der Monsun-Saison im Oktober wird die Zahl der Todesopfer noch weiter steigen. Zum Vergleich: 2005 starben zwischen Juni und August über 1.400 Inder an den Auswirkungen des Monsuns und bis zu zehn Millionen Menschen verloren ihr Dach über dem Kopf.

Beispiel Mumbai: Im ehemaligen Bombay steht das Wasser zu Monsunzeiten hüfthoch. Die Menschen waten hindurch, nur wenige Straßen sind noch befahrbar. Die Elektrizität wird abgeschaltet und das Geschäftsleben kommt für Tage zum Erliegen: Das wirtschaftliche Herz Indiens liegt im Koma. Allein in der bevölkerungsreichsten Stadt der Welt sind über 13 Millionen Einwohner vom Monsun betroffen – von einer Milliarde Indern sind es insgesamt über 270 Millionen. Szenenwechsel: Farbschnipsel fliegen durch die Luft von Jaipur in Rajasthan,



Oben: Der Monsun bringt der indischen Provinz Kerala Regen – und davon jede Menge.
Links: Monsunwolke, aus dem All gesehen. © Public domain; NASA



Musik plärrt aus scheppernden Lautsprechern und Menschen tanzen auf regendurchtränkten Böden. Mit dem Monsunanfang im Juni atmen die Bewohner auf: Die drückende Hitze lässt nach, der Staub wird aus der Landschaft gespült und der Regen bewässert die ausgedörrten Felder. Seit Jahrhunderten ist der Monsun Lebensspender, der nach dem ersten Regenguss bereits das Grün aus der trockenen Erde zaubert.

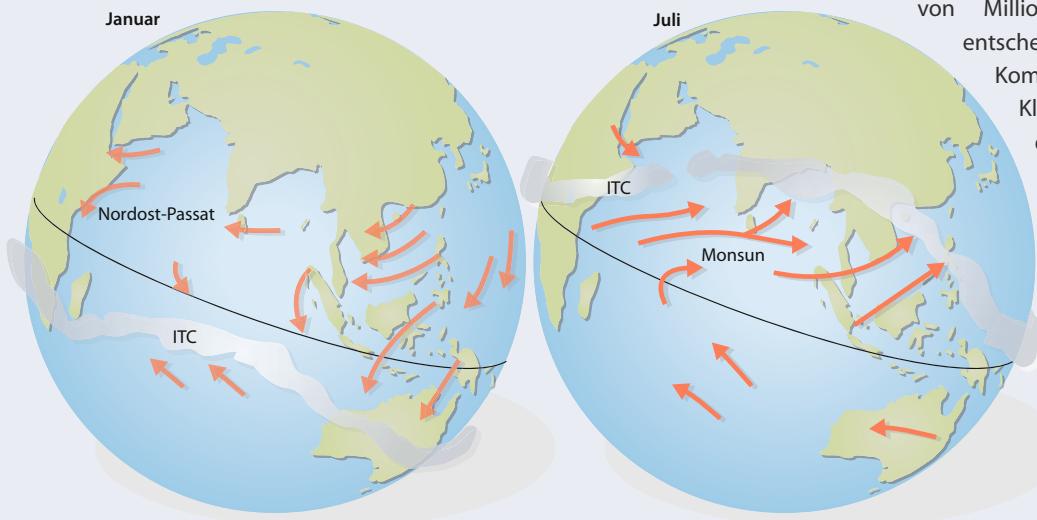
Zwischen solchen Szenarien liegen oft nur wenige Kilometer oder wenige Stunden. In vielen Regionen des Landes wie dem Ratnagiri-Distrikt sind die Bauern völlig abhängig vom Monsun. Nur mit Niederschlag können sie ihre Felder bewirtschaften und zumindest einmal im Jahr ernten. Je nach Region fallen 70 bis 90 Prozent des Jahresniederschlags innerhalb der drei Monsun-Monate. Kommt der Regen später, schwächer oder überhaupt nicht, ist eine Hungersnot nicht mehr abzuwenden. Lediglich 40 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen Indiens sind mit Bewässerungssystemen versehen, die allerdings auch nur während der Regenzeit eine gleichmäßige Verteilung des Wassers ermöglichen. Und dabei leben knapp 700 Millionen Inder von der Landwirtschaft – denn Land gibt es genug, nur Wasser ist Mangelware. Um auch während der Trockenzeiten an Wasser zu kommen und eventuell sogar zweimal ernten zu können, bauen Hilfsorganisationen wie die deutsche Arbeiterwohlfahrt in Ratnagiri kleine Brunnen.

ENSO, Nordatlantik und Monsun: Zusammenspiel der „Regionalen“

Der Indische Ozean ist wie der Pazifik an das globale Förderband der Weltmeere angebunden: Durch unterschiedliche Temperatur und Salzgehalt hat das Wasser regional verschiedene Dichten und treibt so den Austausch von Wassermassen über Meeresströmungen an. Ist der Monsun in einer Saison schwächer, ändert sich daher nicht nur der Nordäquatorialstrom, sondern auch die globale Zirkulation – mit Auswirkungen auf die Ozeane und das Klima weltweit. Das prägende Klimaphänomen Asiens ist damit nicht nur ein regionales Ereignis, das über das Schicksal

von Millionen Bewohnern Asiens entscheidet, sondern ebenso eine Komponente der weltweiten Klima-Maschine. Er steht daher auch in Wechselwirkung mit anderen regionalen Klimaereignissen wie dem ENSO-Phänomen oder der Nordatlantischen Oszillation. Einen Zusammenhang zwischen ENSO und Monsun vermutete bereits um 1900 der britische Physiker Gilbert Walker, als er den

Ein Hitzetief über Zentralasien „saugt“ im Juli die Passatwinde in sich hinein. Aus den ursprünglichen Ostwinden wird der aus südwestlicher Richtung wehende Monsun. © MMCD





großräumigen Windkreislauf zwischen den Kontinenten („Walker-Zirkulation“) beschrieb. Heute gehen Klimaforscher davon aus, dass die pazifische ENSO-Zirkulation vielleicht sogar für knapp 25 Prozent der jährlichen Schwankungen bei den Monsunniederschlägen verantwortlich sein könnte: Während eines El-Niño-Jahres ist der Monsun oft schwächer ausgeprägt – absinkende Luftmassen über Südostasien „stehlen“ dem Monsun die Feuchtigkeit und tragen sie in den Pazifik. Während einer La-Nina-Phase dagegen regnet es im Westen mehr als im Durchschnitt: Der Monsun fällt stärker aus, weil er zusätzlich Feuchtigkeit zugeführt bekommt.

Doch nicht alle ENSO-Ereignisse wirken sich auf den Monsun aus. So verursachte der extrem starke El Niño des Jahres 1997 zwar im Pazifik katastrophale Folgen, aber die erwartete Abschwächung des Monsuns blieb aus – statt Trockenheit fielen in Indien durchschnittliche Niederschläge. Wissenschaftler vermuten, dass El Niño sich zu spät entwickelte, so dass er den Monsun nicht mehr beeinflussen konnte. Offenbar ist entscheidend, zu welcher Jahreszeit die ENSO-Phänomene ihren Höhepunkt erreichen. Die genauen Mechanismen, die ENSO und Monsun aneinanderkoppeln, sind jedoch noch unklar.

Aber nicht nur die Klimakapriolen im tropischen Pazifik wirken auf den Monsun, möglicherweise haben auch die Strömungen im Nordatlantik einen Einfluss. Anfang 2003 untersuchte eine internationale Forschergruppe die

Dunkle Monsunwolken
über Lucknow, Indien
© Public domain



Monsun-Sturm in Asien und Sturmflut an der US-Westküste während des El Niño. Sind beide Phänomene miteinander verbunden? © SXC; Public domain

Entwicklung des Monsuns in den letzten 10.000 Jahren anhand der im Meeres-sediment konservierten Schalen von Einzellern. Ihre Anzahl und Artenverteilung ermöglicht Rückschlüsse auf die klimatischen Bedingungen zu ihrer Lebenszeit. Interessanterweise zeigte sich ausgerechnet in der Zeitperiode von 800 bis 1300 n. Chr. Hinweise auf einen besonders starken Monsun – genau in der Zeit einer ausgeprägten Warmperiode in Europa.

Als nach 1400 die „Kleine Eiszeit“ in Europa rund 300 Jahre lang für Abkühlung sorgte, flaute der asiatische Monsun dagegen ab. Anhand einer weiteren Methode konnten die Forscher letztlich mehr als sieben Schwäcphasen des Monsuns mit ungewöhnlichen Kaltwasserströmungen im Nordatlantik in Verbindung bringen. Wie genau ein möglicher Zusammenhang dieser beiden Regionen und ihrer klimatischen Schwankungen zu erklären ist und welche Mechanismen dahinter stehen, ist allerdings – ähnlich wie für die ENSO – noch nicht geklärt.

Der Klimawandel beeinflusst auch den Monsun

Noch bevor die Wissenschaftler den Monsun bis ins letzte Detail verstanden haben, verändert er sich bereits wieder – und die Menschen sind schuld. Zwar ist der Monsun auch natürlichen Klimaschwankungen unterworfen, doch vor allem in den letzten 50 Jahren haben sich seine Auswirkungen in Indien extrem zugespielt. Während etwa im Jahr 2002 der Regen nahezu völlig ausblieb und eine landesweite Dürre folgte, starben in den überdurchschnittlich starken Monsun-niederschlägen 2005 über 1.000 Menschen allein in Mumbai. Nach Ansicht von Klimaforschern ist dafür die globale Erwärmung zumindest mitverantwortlich.

Im März 2009 simulierten Klimaforscher des Climate Change Research Center der Purdue Universität anhand eines Modells die Auswirkungen der Erwärmung für den Monsun über Südasien bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Die Modellrechnungen ergaben eine deutliche Verzögerung des Monsunbeginns von fünf bis 15

Tagen in den nächsten 100 Jahren. Auch die Niederschläge während des Sommermonsuns werden sich verändern. Während Indien, Nepal und Pakistan trockener und heißer werden, könnten Gebiete weiter im Osten mehr Regen bekommen, als ihnen lieb ist. Denn das Modell ergab eine Ostwärtsverschiebung der Monsunzirkulation, die dem Indischen Ozean, Bangladesh und Myanmar mehr Niederschläge bescheren wird. Insbesondere die ohnehin durch Überschwemmungen bedrohten Gebiete Bangladeshs müssen in Zukunft daher mit noch häufigeren Starkregen rechnen.

„Fast die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Gebieten, die durch die Monsune beeinflusst werden. Schon eine leicht Abweichung vom normalen Monsunmuster kann daher große Auswirkungen haben“, erklärte Noah Diffenbaugh. „Landwirtschaftliche Produktion, Wasserverfügbarkeit und Stromerzeugung durch Wasserkraft könnten grundlegend betroffen sein durch einen verzögerten Monsunbeginn und reduzierte Niederschläge.“

Die sich beschleunigende globale Erwärmung wirkt auch auf regionale Klimaphänomene wie den Monsun. © Harald Frater





Dürren und Hitzewellen – wenn die Erde austrocknet

Wüstes Land und ein paar Knochen – viel mehr bleibt vielen australischen Farmern nach der schlimmen Dürre der letzten Jahre nicht. © SXC

Früher gehörten Hitzewellen und Dürren zu den Wetterkatastrophen, die weit weg von uns in Afrika oder Asien stattfanden – dort, wo es ohnehin schon eher trocken und heiß war. Immer wieder zogen dadurch verursachte Missernten und Trinkwassermangel dramatische Hungersnöte und wahre Flüchtlingsströme nach sich. Doch im Zuge des Klimawandels rücken diese Katastrophen immer näher: Inzwischen häufen sich Trockenperioden, „Jahrhundertsommer“ und Hitzewellen auch in Europa und Nordamerika.

Europa, Juli 2003: Temperaturen von mehr als 40 °C, Trockenheit und Ernteausfälle von bis zu 40 Prozent – für Deutschland und weite Teile West- und Mitteleuropas geht dieser Sommer als der heißeste und trockenste in die Geschichte ein. Fast drei Monate lang, von Juni bis Mitte August, liegen die Temperaturen drei bis fünf °C über den normalen Werten für diese Jahreszeit. Die Hitze fordert in Deutschland rund 8.000, in ganz Mittel- und Westeuropa mehr als 35.000 Todesopfer. Vor allem ältere Menschen sterben an Überhitzung und Dehydrierung. In Italien zieht eine schwere Dürre gravierende Ernteausfälle nach sich, alleine beim Obst gibt es Einbußen von bis zu einem Viertel der Ernte. Die großen Flüsse führen extreme Niedrigwasser. Vielerorts droht Trinkwassermangel, Kraftwerkskühlungen fallen aus und die Binnenschiffahrt wird zeitweilig ganz eingestellt. In Portugal, Spanien, Italien und Südfrankreich vernichten Brände ganze Wälder.

In Nordamerika trifft es immer häufiger den „Sunshine-State“ Kalifornien. Hier muss Gouverneur Arnold Schwarzenegger am 27. Februar 2009 wegen der Dürre sogar den Notstand ausrufen. Drei Jahre mit ungewöhnlich geringen Niederschlägen haben das Land extrem ausgetrocknet. Ernten verdorren, Wasser wird knapp. Viele Bauern müssen bereits einen Teil ihrer Felder brachliegen lassen, tausende Landarbeiter werden entlassen. Die Trinkwasservorräte sind auf dem niedrigsten Stand seit 1992. Und Klimaforscher machen nicht viel Mut: Ihrer Ansicht nach könnte die Trockenheit noch mehrere Jahre anhalten.

Erst die Folgen machen Hitze und Dürre zur Katastrophe

So dramatisch ihre Folgen auch oft sind: Dürren und Hitzeperioden sind ein natürliches Phänomen – eigentlich. Immer wieder gab und gibt es Zeiten, in denen in einem Gebiet weniger Regen fällt als es dem langjährigen Mittelwert entspricht. Das kann auch in feuchten Regionen wie beispielsweise hier bei uns in Deutschland der Fall sein. So registrieren Meteorologen in Europa während des Jahrhundertsommers im Jahr 2003 durchschnittlich 300 Millimeter weniger Regen als im langjährigen Mittel.

Noch stärker gefährdet sind jedoch trockene oder durch unregelmäßige Niederschläge gekennzeichnete Gebiete wie der Mittelmeerraum oder die Sahelzone in Afrika. Hier ist die Verdunstung von Wasser aus dem Boden und der Vegetation auch unter normalen Umständen höher als das, was vom Himmel hinzukommt. Die Niederschläge schwanken zudem oft sehr stark und trockene Perioden mit Dürren und Wassermangel sind daher keine Ausnahme. Meist jedoch reichen die Regenzeiten oder der zumindest ab und zu fallende Niederschlag gerade noch aus, um das prekäre Gleichgewicht zu halten und den Menschen sowie ihren Tieren und Feldern ein zumindest karges Überleben zu ermöglichen.

Doch wenn kurz- oder längerfristige Veränderungen des Klimasystems eintreten, beispielsweise durch einen ausbleibenden oder verzögerten Monsun oder einfach lokal veränderte Luftströmungen, gerät dieses System aus dem Gleichgewicht. Wenn Natur und Mensch diese Schwankung nicht mehr ausgleichen und aushalten können, ist eine Dürrekatastrophe die Folge.

Versuchen die Menschen in den betroffenen Regionen, weiterhin Nahrungsmittel zu produzieren, wird das Ökosystem nachhaltig geschädigt – Verwüstung ist die Folge. In den

Der Boden ist nach einer anhaltenden Dürre extrem ausgetrocknet und regeneriert sich nur langsam. © SXC





Ernteausfälle durch Dürren bringen nicht nur Farmer an den Rand des Ruins, sie sind auch immer wieder für große Hungersnöte verantwortlich.

© USDA

Wäldern finden die Wildtiere weniger Nahrung und sterben. Die Lebensräume schrumpfen, die Tiere konzentrieren sich um die Wasserstellen und werden dort Opfer von Raubtieren. Die biologische Vielfalt nimmt ab.

Bleibt die Natur sich selbst überlassen, regeneriert sie sich nach dem Ende der Dürre wieder. Steht sie jedoch bereits unter Druck, beispielsweise durch menschliche Einflüsse, kann die Dürre eine langfristige Schädigung des Bodens bewirken und damit dem Menschen die Lebensgrundlage für den zukünftigen Anbau von Nahrungsmitteln entziehen. Quellen und Brunnen versiegen, sauberes Trinkwasser wird Mangelware und muss teuer bezahlt werden. Tümpel und Teiche trocknen aus, Flüsse führen weniger Wasser. Die Wasserknappheit kann auch zu Verteilungskonflikten zwischen verschiedenen Nutzern führen. Krankheiten durch verschmutztes Wasser nehmen zu. Soziale Spannungen und Konflikte in Städten und Ländern, in denen sich die Flüchtlinge niederlassen, werden immer größer.

Hält ein solcher Zustand längere Zeit an, kann er sogar ganze Kulturen in den Untergang stürzen, wenn diese sich nicht anpassen. So waren vermutlich drei mehrjährige Trockenphasen im achten und neunten Jahrhundert n. Chr. die Ursache für den Niedergang des Maya-Reichs. Eine Studie aus dem Jahr 2003 belegt zumindest für das heutige Venezuela verminderte Niederschläge zu dieser Zeit. Die Landwirtschaft der Maya war nicht sehr effektiv und in weiten Teilen auf Bewässerung angewiesen. Möglicherweise laugten die traditionellen Anbauformen die ohnehin nährstoffarmen Böden zusätzlich aus.

Eine hausgemachte Katastrophe

Eine echte Dürre-Katastrophe ist oft „hausgemacht“: Erst die unangepasste Lebensweise und Landnutzung des Menschen kippt das natürliche Gleichgewicht und setzt die Ökosysteme unter Druck. Die Abholzung von Wäldern und die Versiegelung der Böden hemmt beispielsweise die Versickerung von Regenwasser und damit ein Auffüllen der Feuchtigkeitsreserven.

Oft verstärkt auch eine Überweidung die Dürre: Zu viele Rinder oder Schafe auf armem, spärlich bewachsenem Boden dünnen die schützende Pflanzendecke aus und verstärken so die austrocknende Wirkung der Sonnenstrahlung.

Historisch bedeutsame Dürren

USA, 1930–1937

Jahrelange Dürren im mittleren Westen der USA zwingen viele Farmer zur Aufgabe. Teile der großen Ebenen werden als „Dust Bowl“ – „Staubschüssel“ – bekannt. 350.000 Menschen verlassen die Region.

England, 1069

Drei Jahre nach der Eroberung Englands durch die Normannen vernichtet eine Dürre einen Großteil der Ernten. Fast 50.000 Menschen verhungern.

Ägypten, 3.500 v. Chr.

Die erste geschichtlich belegte Dürreperiode löst eine Hungersnot aus, die tausende zum Opfer fallen.

Ägypten, 1.300 v. Chr.

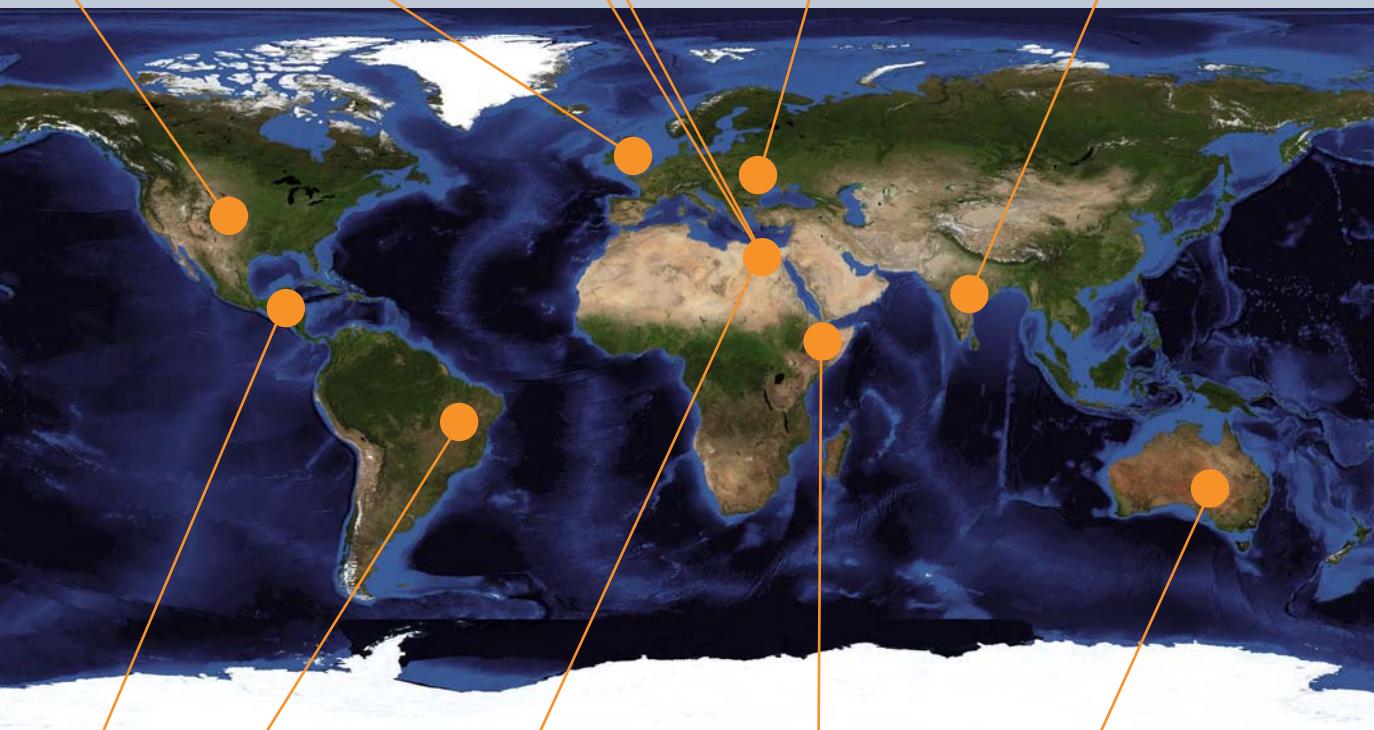
Die sieben mageren Jahre der Bibel: Eine Dürre über sieben Jahre lässt zehntausende Menschen verhungern.

Ukraine, 1921–1922

Eine langanhaltende Dürre verursacht in der Ukraine und an der russischen Wolga eine Hungersnot, fünf Millionen Menschen sterben. Insgesamt sind rund 20 Millionen Menschen betroffen.

Indien, 1876–77

Eine Dürre und die dadurch verursachte Hungersnot lässt drei Millionen Menschen sterben. Insgesamt sind mehr als 36 Millionen Menschen betroffen. Diese Dürrekatastrophe gilt als eine der schlimmsten der Geschichte.



Mittelamerika, 810, 860, 910

Drei langanhaltende Dürren beschleunigen und fördern den Untergang der Hochkultur der Maya.

Drei Monate ausbleibenden Regens gipfeln in Buschbränden, die fast die gesamte Kaffeeernte des Landes vernichten. 250 Menschen sterben in den Flammen, 300.000 werden obdachlos.

Brasilien, 1962

Aufgrund eines El Niño-Events kommt es zu einem Jahr ohne Regen. 250 Menschen sterben in den Flammen, 300.000 werden obdachlos.

Ägypten, Mesopotamien, 2200 v. Chr.

Klimaveränderungen, verbunden mit anhaltender Trockenheit, tragen zum Niedergang des Alten Reiches der Ägypter bei. Die lebensnotwendigen Nilhochwässer bleiben immer häufiger aus. Auch die Hochkulturen am Indus und in Mesopotamien sind von diesem Klimawandel betroffen.

Äthiopien, 1984–1985

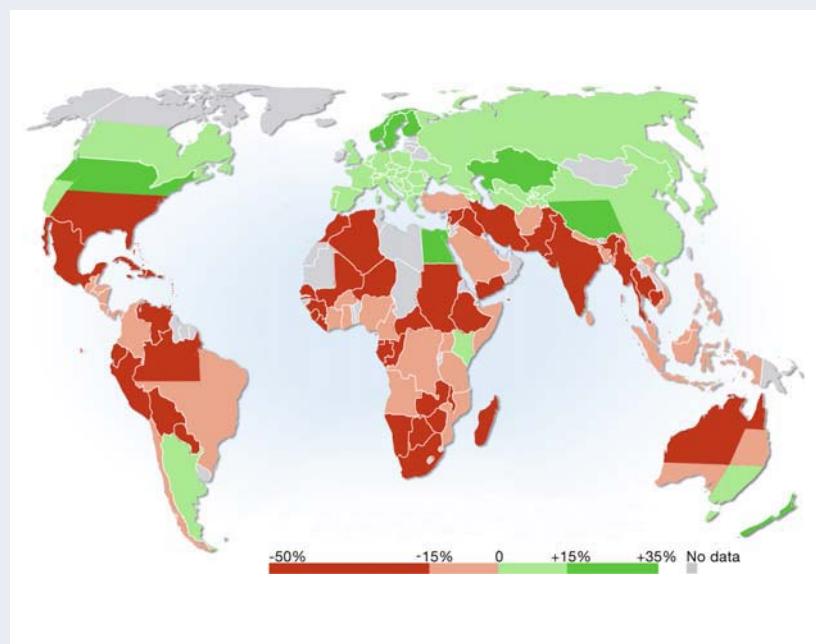
Eine ausgedehnte Dürre verursacht Missernten und Hungersnöte in 20 afrikanischen Staaten. Äthiopien ist am schlimmsten betroffen, hier hat es 1981 kaum noch geregnet. Die Bilder von hungrigen und sterbenden Kindern gehen um die Welt.

Australien, 1994

Das El Niño-Ereignis im Pazifik löst eine ungewöhnlich regenarme Periode im gesamten Osten Australiens aus. 90 Prozent der Weizenernte werden vernichtet.



In Australien waren 2007 mehr als die Hälfte aller landwirtschaftlich genutzten Flächen von einer „Jahrhundertdürre“ betroffen. Während der mehr als fünf Jahre anhaltenden außergewöhnlichen Trockenperiode fiel im Winter zu wenig Regen, so dass die Flüsse einen Rekordniedrigstand erreichten. In der „Kornkammer“ Australiens, im Südosten des Landes, sanken die Vorräte in den Wasserreservoiren auf ein Drittel, Trinkwasser musste teilweise rationiert werden. Mehr als die Hälfte der 130.000 Bauern überlebte nur noch mit Subventionen. Australien konnte die Folgen der Dürre durch staatliche Hilfen für die Betroffenen zumindest in Teilen ausgleichen. Verhungern oder verdurstet musste dort niemand.



Doch was, wenn Geld und Infrastruktur fehlen, um Ernteverluste auszugleichen oder auf andere Anbautechniken umzustellen? Dann ist die Bevölkerung der Armut und dem Hunger nahezu hilflos ausgeliefert – wie in vielen Entwicklungsländern. Was dies bedeutet, zeigte sich Anfang 2007, als in Ostafrika die Regenzeit ausblieb: Ernten fielen aus, Vieh verdurstete und drei Millionen Afrikaner hungerten.

Nach Angaben der Vereinten Nationen leben heute rund 100 Millionen Menschen in potenziell durch Dürren gefährdeten Regionen, zwei Milliarden und damit ein Drittel der gesamten Menschheit sind potenzielle Opfer der Desertifikation. Und in Zukunft könnte es noch mehr werden: Denn die globale Erwärmung lässt in vielen Regionen der Erde Wetterextreme wie Hitze und Trockenheit häufiger werden. Nach Schätzungen von Klimaforschern könnten schon in den nächsten zehn Jahren mehr als 50 Millionen Menschen heimatlos und zu Umweltflüchtlingen werden, so eine 2007 veröffentlichte Studie. Die Anzahl dieser Flüchtlinge übertrifft die gesamte Bevölkerung von Südafrika oder Südkorea – und sie wäre erst der Beginn. Die meisten von ihnen werden durch die fortschreitende Desertifikation ihre Lebensgrundlage verlieren und daher ihre Heimat verlassen müssen. Was solche Flüchtlingsströme für die Ursprungsländer, aber auch für die Zielgebiete bedeutet, weiß heute noch niemand so genau.

Was aber kann getan werden? Kann man überhaupt etwas gegen Dürre tun? Gegen die klimatische Seite der Dürre ist der Mensch machtlos. Das Wetter lässt sich nicht beeinflussen. Aber es gibt Möglichkeiten, die Folgen zu minimieren.

Wer profitiert, wer leidet? Diese Karte zeigt, wo bis zum Jahr 2080 die Erträge steigen (grün) oder fallen (rot). © Hugo Ahlenius/UNEP/GRID-Arendal

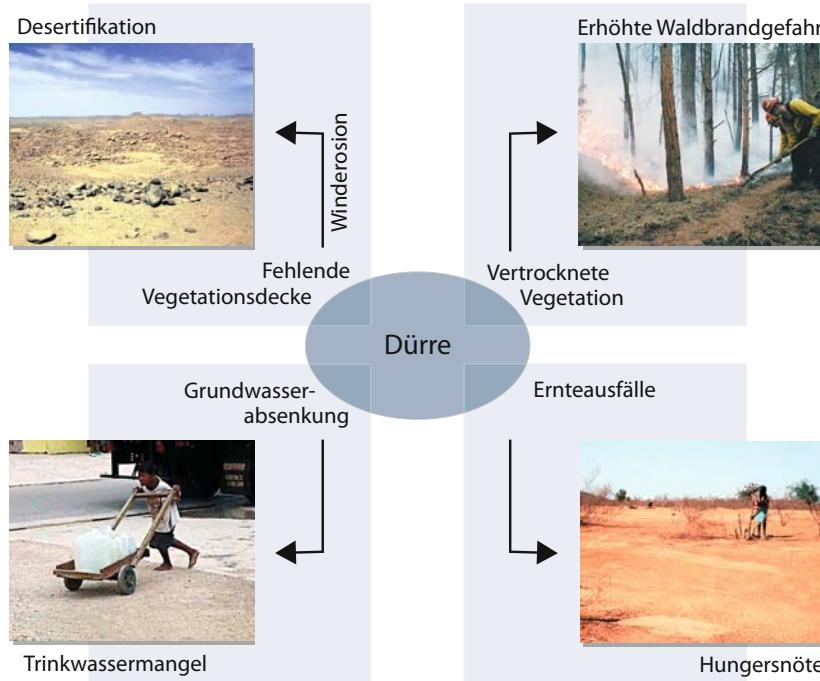
Die Anzahl der Menschen, die vor Missernten und Desertifikation flüchten, wird ansteigen. © DWH

Ein Schritt ist die Vorwarnung: Die meisten gefährdeten Länder besitzen bereits eigene Dürre-Warnzentren. Diese werten die Wetterdaten von Satelliten aus und nutzen spezielle Vorhersagemodelle, um eine sich anbahnende kritische Dürre rechtzeitig zu erkennen. Dank der veröffentlichten Warnungen können Landwirte und örtliche Behörden dann mehr oder weniger rechtzeitig ihre Vorkehrungen treffen.

Die Überwachung von periodischen Klimaschwankungen wie El Niño machen eine Warnung vor entstehenden Dürren teilweise so rechtzeitig möglich, dass noch entsprechend trockenheitsresistente Anbaumethoden und -produkte gewählt werden können.

Ein zweiter Ansatzpunkt ist eine langfristige Anpassung an trockener werdende Klimabedingungen, beispielsweise durch gezielte Landnutzungsplanung indürregefährdeten Regionen und die Entwicklung angepasster Anbaumethoden. Wasserspeicher, Wassertransport- und Bewässerungssysteme sorgen für eine bessere Nutzung des Rohstoffs Wasser. Zu den Maßnahmen gehört aber auch eine gezielte Schulung und Information der Bevölkerung über Risiken und Gegenmaßnahmen, um langfristige Schäden und eine Desertifikation zu verhindern.

Eine Dürre und ihre Folgen



Desertifikation:

Durch die Trockenheit geht die schützende Vegetationsdecke des Bodens verloren. Der Wind trägt den fruchtbaren Boden ab und hinterlässt unfruchtbare Land. Das Gebiet wird zur Wüste.

Erhöhte Waldbrandgefahr:

Verdornte Pflanzen erhöhen die Gefahr von Bränden. Weht ein kräftiger Wind, kann ein Feuersturm riesige Gebiete in Schutt und Asche legen.

Trinkwassermangel:

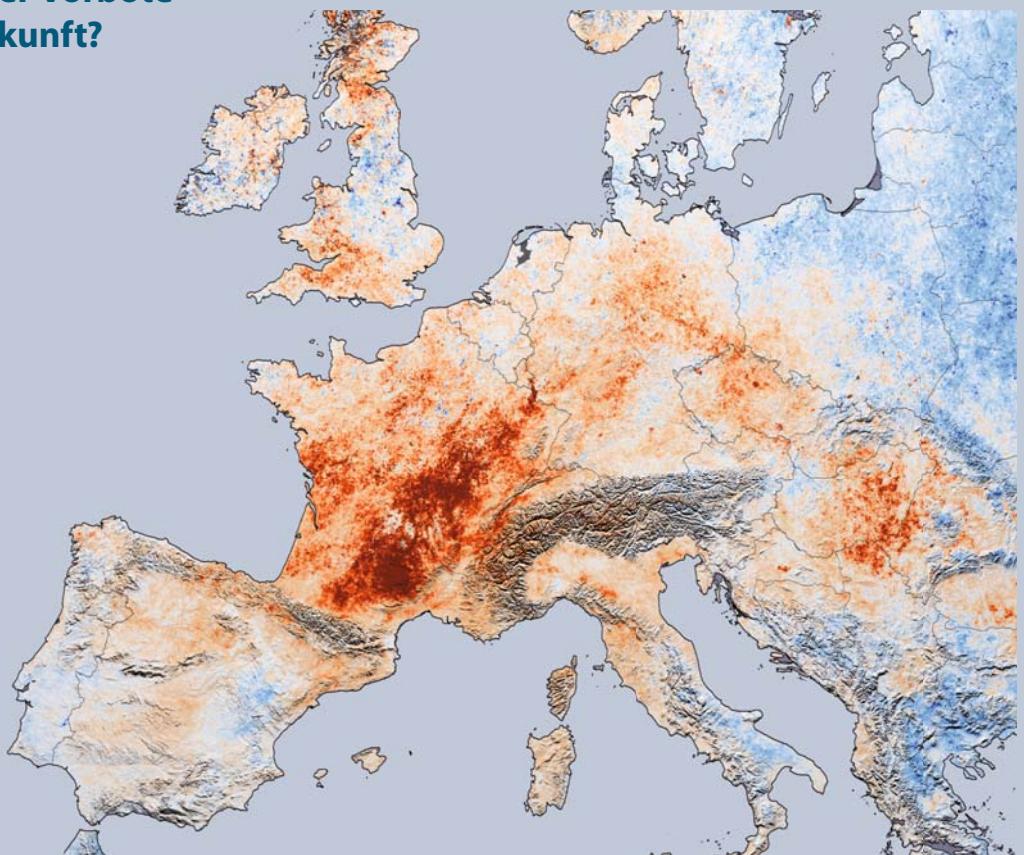
Fehlende Niederschläge lassen das Grundwasser absinken. Trinkwasserbrunnen reichen nicht mehr tief genug hinab, das Wasser wird knapp.

Hungersnöte:

In vielen Regionen der Erde reichen weder die Wasserreserven noch die finanziellen Mittel aus, um effektive Bewässerungssysteme einzusetzen. Als Folge gehen Nahrungspflanzen ein, bevor sie geerntet werden können. Eine Hungersnot droht.

© Harald Frater/FEMA/DWH

Die Hitzewelle 2003 – Ausreißer oder Vorbote der Klima-Zukunft?



© NASA/MODIS

Der Sommer 2003 brachte eine Hitzewelle der Superlative für große Teile Europas. Klimaforscher des IPCC sehen diese Extrembedingungen jedoch als durchaus realistisches Modell für das zukünftige Klima in Europa an.

Wie unnormal war der Sommer 2003?

Mithilfe des „Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer“ (MODIS) an Bord des Terra-Satelliten der NASA haben Meteorologen sich ein Bild der Hitzewelle gemacht. Die Grafik zeigt die Abweichungen der Lufttemperaturen im Juli 2003 im Vergleich zu den Lufttemperaturen vom Juli 2001. Rot steht für höhere, weiß für gleiche und blau für niedrigere Temperaturen als in 2001. Eine Decke tiefen Rots über Südwährend und Ostfrankreich zeigt die Gebiete, in denen die Temperaturen 10° C und mehr höher lagen als vor zwei Jahren. Wald-

brände vernichteten hier, wie auch in Portugal, Spanien und Italien, große Waldgebiete.

Auch die Alpen waren außergewöhnlich warm. Als Folge schmolzen die Gletscher noch schneller, durch das Tauwasser anschwellende Flüsse und Seen drohten Sturzfluten und Erdrutsche auszulösen. Am Matterhorn mussten Kletterer evakuiert werden, nachdem die Schmelze einen Felshang kollabieren ließ. In Großbritannien waren in erster Linie der äußerste Norden und der Süden betroffen. In London wurden Bahnlinien stillgelegt aus Furcht, die durch die Hitze verzogenen Schienen könnten Züge zum Entgleisen bringen. In Schottland drohten die hohen Temperaturen in Kombination mit den fallenden Pegeln in Flüssen und Bächen das Laichen und Überleben der Lachse zu gefährden.



Waldbrände – flammendes Inferno

Häufig sind die Flammen kaum unter Kontrolle zu bringen, wie hier im Oktober 2007 in Südkalifornien. © FEMA/Andrea Booher

Lodernde Flammen, gewaltige Hitzeschübe, Qualm, der einem den Atem nimmt und die Augen tränen lässt: Wald- und Buschbrände haben in Australien eine lange Tradition. Jahrhundertelang waren es die Ureinwohner, die Aborigines, die die riesigen Savannen und Buschgebiete regelmäßig abfackelten. Einerseits, damit mehr und frischeres Gras nachwächst, andererseits, um bessere Sicht zu schaffen und so die Jagd zu erleichtern.

Doch während diese Feuer gezielt gelegt wurden und keine größeren Schäden anrichteten, hat sich die Situation in den letzten Jahrzehnten dramatisch verändert. Denn seitdem gehört das Land „Down under“ zu den Regionen weltweit, die am häufigsten und am heftigsten unter unkontrollierten, gefährlichen Waldbränden zu leiden haben – zahlreiche Todesopfer und zerstörte Natur inklusive. So wie im Februar 1983, als in Südaustralien 75 Menschen einem Buschfeuer zum Opfer fielen. Mehr als 200.000 Hektar Land wurden damals zerstört. Oder von Dezember 2002 bis Januar 2003, als die bis dahin schlimmsten Wald- und Buschbrände in der Geschichte des Landes sogar mehrere Millionenstädte bedrohten. So war Sidney zeitweise von einem Ring aus 80 Bränden eingeschlossen, nur zwei Ausfallstraßen konnten damals offen gehalten werden. Mehrere Menschen kamen bei der Katastrophe ums Leben und erneut wurden viele hunderttausend Hektar Land vernichtet.

Doch was sich dann im Januar und Februar 2009 im Südosten Australiens abspielte, erreichte selbst für die branderprobten Menschen dort eine neue Dimension. Alles begann mit einer Hitzewelle, wie es sie seit 100 Jahren nicht mehr gegeben hatte. Sie überzog die Region wochenlang mit Temperaturen von mehr als 40 °C und einer extremen Trockenheit. Am stärksten betroffen waren die Bundesstaaten South Australia, New South Wales und vor allem Victoria. In einigen Regionen erreichte das Thermometer Werte von 48,2 °C – Rekord!

Diese extreme Wetterlage trug ihren Teil dazu bei, dass innerhalb von wenigen Tagen überall Waldbrände aufflammten, die gewaltige Forst- und Buschflächen vernichteten. Die „Jahrhundertfeuer“ machten aber auch hunderte von Häusern, ja ganze Siedlungen dem Erdboden gleich. Allein in den fast völlig zerstörten Städten Kinglake und Marysville nordöstlich von Melbourne waren dabei fast 80 Todesopfer zu beklagen. Die Menschen wurden im Schlaf überrascht oder verbrannten auf der Flucht vor den Flammen qualvoll in ihren Autos. Am Ende hatte die Naturkatastrophe über 200 Menschenleben gefordert, 1.800 Häuser lagen in Schutt und Asche, die Sachschäden gingen in die Milliarden.

Südostaustralien ist jedoch nur einer der „Hot Spots“ für Waldbrände auf der Erde. Auch Kalifornien oder der Mittelmeerraum werden fast jedes Jahr von zahlreichen Feuersbrünsten heimgesucht. Die Auswirkungen sind nicht selten ähnlich katastrophal wie in Australien, da immer mehr Menschen in den gefährdeten Gebieten leben. Um das Schlimmste abzuwenden, sind Feuerwehr und Katastrophenschutz bei Waldbränden pausenlos im Einsatz. Löscharbeiten am Boden und aus der Luft sollen schlimmere Auswirkungen vermeiden helfen und Hab und Gut der Betroffenen schützen. Längst nicht immer gelingt es den „firefighters“ jedoch, die vorrückenden Flammen wirklich aufzuhalten. Evakuierungen sind daher oft die einzige Möglichkeit, den Feuersbrünsten zu entgehen – wenn überhaupt.

Brandstiftung und Brandrodung statt Blitzschlag

Doch sind allein enorme Hitze, Trockenheit und heftige Winde verantwortlich für verheerende Waldbrände? Keineswegs. So war 2009 in „Down Under“ schnell klar, dass zumindest ein paar der Feuer von Brandstiftern aus Profitgründen gelegt wurden – ein Phänomen, das allerdings längst nicht nur für Australien typisch ist. Nach einer Studie der Umweltorganisation WWF werden heute nur vier Prozent

Unachtsames Verhalten oder Brandstiftung? Oft genug ist das menschliche Handeln Ursache für großflächige Waldbrände wie hier in West Glenwood im US-Bundesstaat Colorado.

© FEMA/Andrea Booher





Blitzschlag ist als Waldbrandursache nur noch von geringer Bedeutung. © NOAA/NSSL

aller Brände auf natürlichem Weg – etwa durch Blitze – verursacht, der Rest geht auf das Konto von bewusster Brandstiftung oder nachlässigen Touristen und Einheimischen. Denn manchmal reicht schon eine weggeworfene Zigarette oder ein nicht richtig gelöschter Grill, um das Inferno in Gang zu setzen. Auch Forste mit Monokulturen und gebietsfremden Bäumen können die Waldbrandgefahr weiter erhöhen. „Hauptgrund dafür ist die nicht an Brände angepasste Landnutzung und Besiedlung sowie fahrlässiger Umgang mit Feuergefahr“, erklärt der WWF-Waldexperte Markus Radday.

Professor Johann Goldammer von der Arbeitsgruppe Feuerökologie am Max-Planck-Institut für Chemie sieht auch noch andere Gründe für die Brände – zum Beispiel die Landflucht oder das Abbrennen von Stoppelfeldern. Viele junge Menschen ziehe es mit Macht in die Städte. „Das Land liegt dadurch brach und wächst zu – es verbuscht“, sagt Goldammer. Zudem gibt es mehr brennbares Material in den nicht bewirtschafteten Wäldern und Feuer brechen leichter aus und lodern dann auch heißer.

Doch wie sieht es in Deutschland mit der Waldbrandgefahr aus? Könnte es auch hier zu ähnlichen Brandkatastrophen wie in Australien und im Mittelmeerraum kommen? Max-Planck-Forscher Goldammer hält dies durchaus für möglich – wenn die Wetterbedingungen stimmen: langanhaltende hohe Temperaturen, Trockenheit und starke Winde: „Eine solch gefährliche Situation hatten wir im April. Der deutsche Feuerindex war dunkelrot“, so Goldammer im Jahr 2007. „Nur hat es bei uns nicht so schlimm gebrannt wie derzeit in Griechenland. Wir sind mit einem blauen Auge davon gekommen.“

Doch das muss in Zukunft nicht so bleiben. Vor allem ein Aspekt macht Waldbrandexperten und auch Natur- und Umweltschützern Sorgen: die Klimaerwärmung. Sollte es in den nächsten 100 Jahren wirklich, wie vom Intergovernmental Panel on Climate Change prognostiziert, um bis zu 6,4 °C heißer werden, steigt die Waldbrandgefahr in vielen Regionen weltweit weiter an. Und auch die Schwere der Brände würde vermutlich weiter zunehmen. Zu einem der größten Krisengebiete könnte dabei erneut Australien werden. So gehen Klimaforscher für Sydney beispielsweise von einem Temperaturanstieg von 4,8 °C bis zum Jahr 2070 aus. Die Folge wird vermutlich unter anderem eine Häufung von Stürmen sein, die die alljährlich auftretenden Buschfeuer kräftig anfachen und stärker als bisher in die Vorstädte treiben. Studien des australischen Bureau of Meteorology

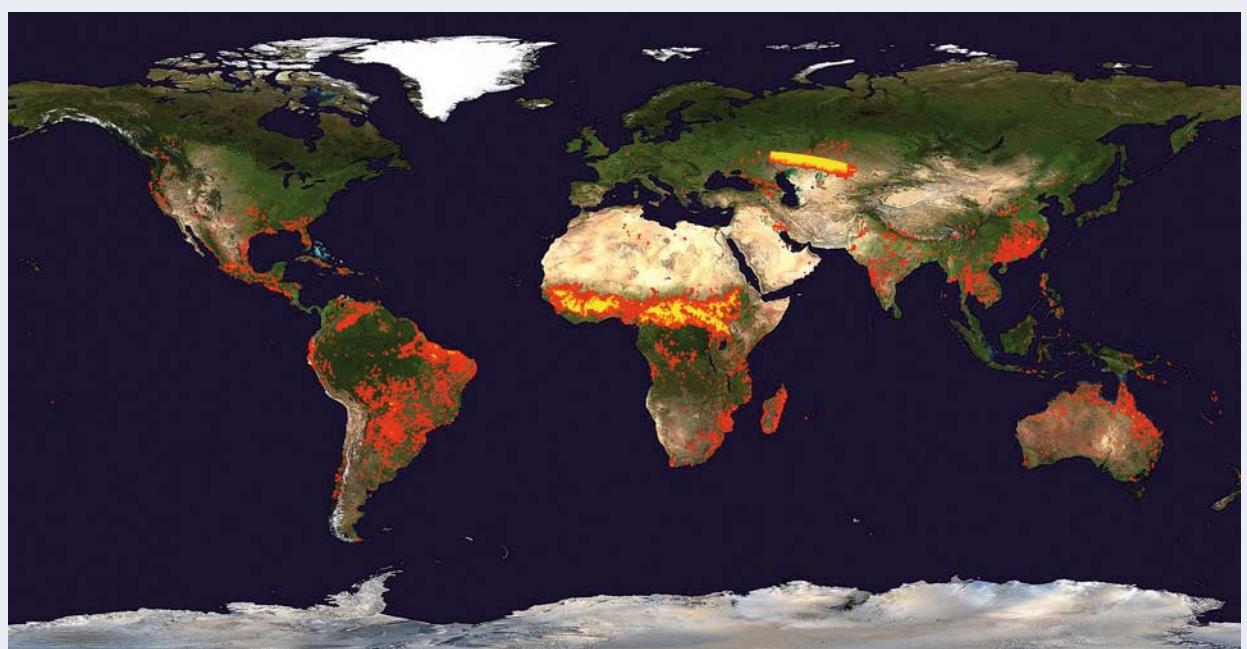
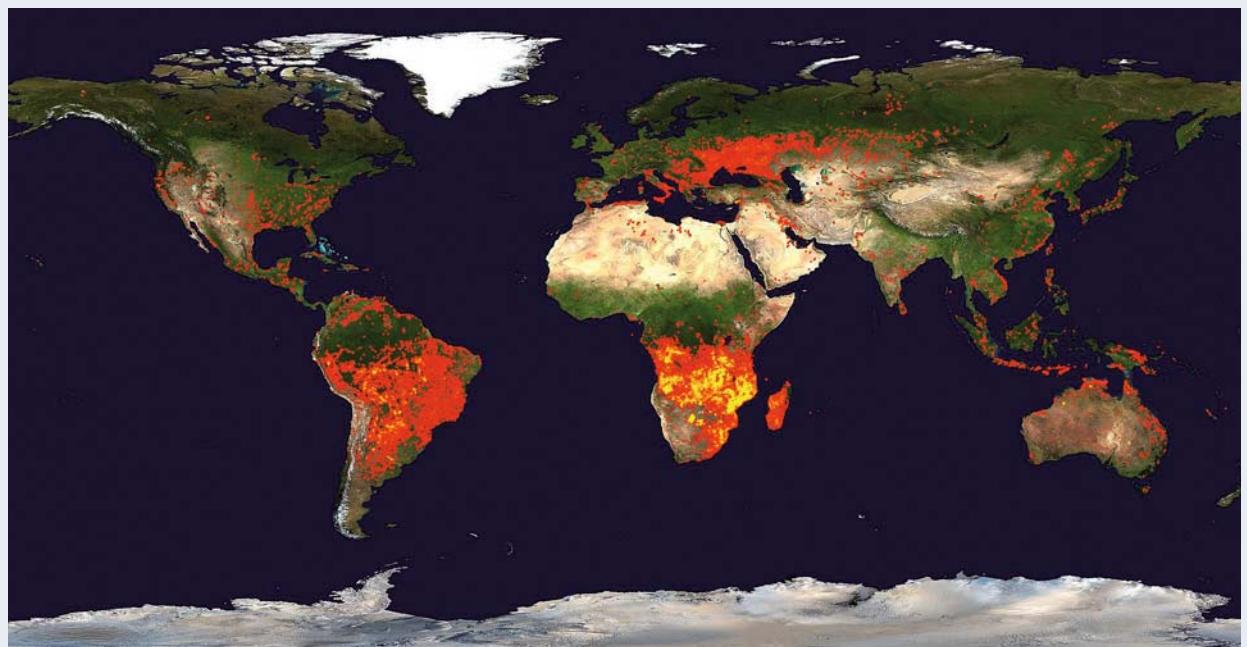
Feuerüberwachung aus dem All

Da Waldbrände sehr oft in schlecht erreichbaren Gebieten auftreten, kommen immer mehr Satelliten zum Einsatz, um Feuer aufzuspüren und ihre Auswirkungen zu erkunden. Mit hoch empfindlichen Strahlungsmessgeräten im sichtbaren Licht und Infrarotbereich bestückt, zeichnen diese sowohl das reflektierte Licht als auch die Wärmestrahlung der Erdoberfläche auf.

Die Daten des MODIS-Sensors an Bord des Terra-Satelliten der NASA liefern alle zehn Tage eine globale Feuerkarte. Alle 14 Tage, aber dafür hochauflöst, sendet der Satellit „Landsat“.

Den Waldbrandauslöser „Blitz“ kartiert der Lightning Imaging Sensor (LIS) an Bord der Sonde der „Tropical Rainfall Measuring Mission“. LIS blickt selbst durch Wolken hindurch und erkennt 90 Prozent aller Blitze zwischen den Wendekreisen. Bild: Terra-Satellit. © NASA





Weltweite Verteilung von Waldbränden und Buschfeuern im August 2008 (oben) und im Dezember 2008 (unten). Gelb signalisiert Flächen mit besonders vielen Feuern.

© NASA/MODIS/ Jacques Descloites

2007: Südeuropa im Bann des Feuers

Mitte Juni 2007. Wochenlang Temperaturen von zum Teil 40 °C und mehr sowie extreme Trockenheit und frischer Wind haben die Wälder in vielen Ländern Südeuropas zu tickenden Zeitbomben gemacht. Fast überall steigt die Waldbrandgefahr kontinuierlich an. Kurze Zeit später ist es dann soweit. Meterhohe Flammen auf Sardinien und Sizilien, wie Fackeln brennende Bäume in Montenegro oder Kroatien, verheerende Feuersbrünste auf dem Peloponnes – nahezu gleichzeitig brechen in vielen Ländern rund um das Mittelmeer hunderte von Waldbränden aus. Sie sorgen für ein „flammendes Inferno“, dessen Rauchschwaden man noch aus dem All erkennen konnte ...

Schlimmster Waldbrandmonat aller Zeiten

Wie die Experten des Europäischen Waldbrand-Informationsystems EFFIS, das Feuerwarnungen ausspricht, aber auch Schäden ermittelt, kurze Zeit später ermittelten, war der Juli 2007 der schlimmste Waldbrandmonat aller Zeiten. Berechnungen von EFFIS hatten ergeben, dass schon zu diesem frühen Zeitpunkt des Jahres 3.376 Quadratkilometer Land vernichtet worden waren – so viel wie noch nie zuvor seit Beginn der Datenerfassung. Betroffen von den Flammen waren auch zahlreiche Touristenzentren: Campingplätze

brannten nieder, Hotelkomplexe wurden von den Flammen umzingelt und tausende von verschreckten Urlaubern mussten von Helfern in Sicherheit gebracht werden. Löschflugzeuge versuchten derweil aus der Luft, die immer wieder aufflodernden Feuer unter Kontrolle zu bringen. Mobile Einsatzkommandos der Feuerwehr und Hilfsorganisationen unterstützten sie dabei vom Boden aus. Trotz aller Bemühungen kamen allein in Italien 13 Menschen durch die Waldbrände um, viele Menschen mussten zudem mit Vergiftungserscheinungen in Krankenhäusern behandelt werden. Die Sachschäden erreichten Milliardenhöhe.

Ausnahmezustand in Griechenland

So schlimm die Folgen dieser Waldbrände auch waren, dies war erst der Anfang – zumindest in Griechenland. Denn dort wüteten die Flammen auch im August noch ohne Unterrast weiter. Besonders betroffen waren die Halbinsel Peloponnes und die Insel Euböa, wo zeitweise 100 großflächige Brände gemeldet wurden. Dutzende von Dörfern waren von den Flammen vollständig eingeschlossen und warteten zum Teil vergeblich auf Hilfe. Sogar die antike Stätte von Olympia, wo vor mehr als zweitausend Jahren die ersten Olympischen Spiele stattfanden, wurde von den Waldbränden bedroht.



Die Regierung rief zwar den Notstand aus, war aber ansonsten mit den Lösch- und Rettungsarbeiten völlig überfordert. Erst mit einem massiven Aufgebot an internationaler Hilfe konnte man der Waldbrände schließlich Anfang September Herr werden. Bilanz der verheerenden Naturkatastrophe: 64 Tote, zahlreiche Verletzte sowie Gesamtschäden in Höhe von rund fünf Milliarden Euro. Insgesamt hatten die Flammen 200.000 Hektar Land verbrannt und mehr als 2.000 Häuser zerstört.

Ausgedehnte Brände wie 2007 in Südeuropa können hundertausende Hektar Wald vernichten. © FEMA/Bryan Dahlberg

und der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) sagen zudem voraus, dass sich die Zahl der Tage, an denen Wald- und Buschbrände in Südostaustralien ein extremes Risiko bedeuten, schon bis zum Jahr 2050 nahezu verdoppeln könnten – ein Worst-Case-Klimawandelszenario vorausgesetzt.

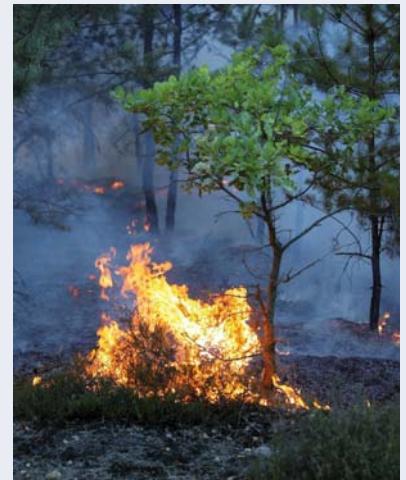
Viele Wissenschaftler gehen im Übrigen davon aus, dass die globale Erwärmung schon jetzt ihren Beitrag zu ungewöhnlich heftigen Bränden wie in Australien leistet. „Der Klimawandel, das Wetter und die Trockenheit verändern die Art, die Stärke und die Dauer von Waldbränden“, so Gary Morgan, der Leiter des Bushfire Cooperative Research Center in Melbourne im Jahr 2009.

Leben auf dem „Pulverfass“

Zu einer Gefahr werden unkontrollierte Brände vor allem dann, wenn sie Kurs auf Siedlungen oder gar Großstädte nehmen. Dies passiert in den letzten Jahrzehnten immer öfter. Ein Grund dafür: Die Menschen siedeln immer häufiger in Risikogebieten. Viele Brandkatastrophen in Kalifornien oder Australien sind typische Beispiele dafür. So kostete der Feuersturm von Oakland Hills, der im Oktober 1991 an der amerikanischen Pazifikküste wütete, 25 Menschen das Leben und zerstörte fast 2.500 Häuser und 440 Appartements. Die Schäden lagen bei 1,5 Milliarden US-Dollar.

Der wohl wichtigste natürliche Faktor, der Waldbrände verstärken kann, ist der Wind. Er versorgt das Feuer zusätzlich mit Sauerstoff und treibt die Flammen zudem vor sich her. Auch lokale Winde, wie zum Beispiel der Föhn, tragen häufig zur Ausbreitung der Brände bei. Die Wirbel und Turbulenzen, die dabei entstehen, reißen die Glut in die Luft oder heizen das Feuer wie mit einem Blasebalg an. Zudem erzeugen Feuerstürme ihr eigenes Windsystem, das den Brand lange Zeit in Gang hält.

Auch die Vegetation kann unter bestimmten Voraussetzungen Waldbrände weiter anfachen. Harz- und ölige Pflanzen, wie Kiefern oder Eukalypten, die zusätzlich noch ihre Rinde abwerfen, sorgen für Brennmaterial im Baumbestand und am Waldboden. Die Borke der Eukalyptusbäume und deren Blätter sind zudem so leicht, dass sie im entzündeten Zustand von aufsteigenden Winden bis zu 30 Kilometer weit verfrachtet werden und so genannte „Spot“-



Die Waldbrandgefahr steigt auch in Deutschland, hier ein Bodenfeuer in Brandenburg, Sommer 2003. © GFDL

Gefährlich werden Brände vor allem dann, wenn sie sich Siedlungen nähern, wie hier dem Ort Glenwood Springs in Colorado im Juni 2002. © FEMA/Bryan Dahlberg





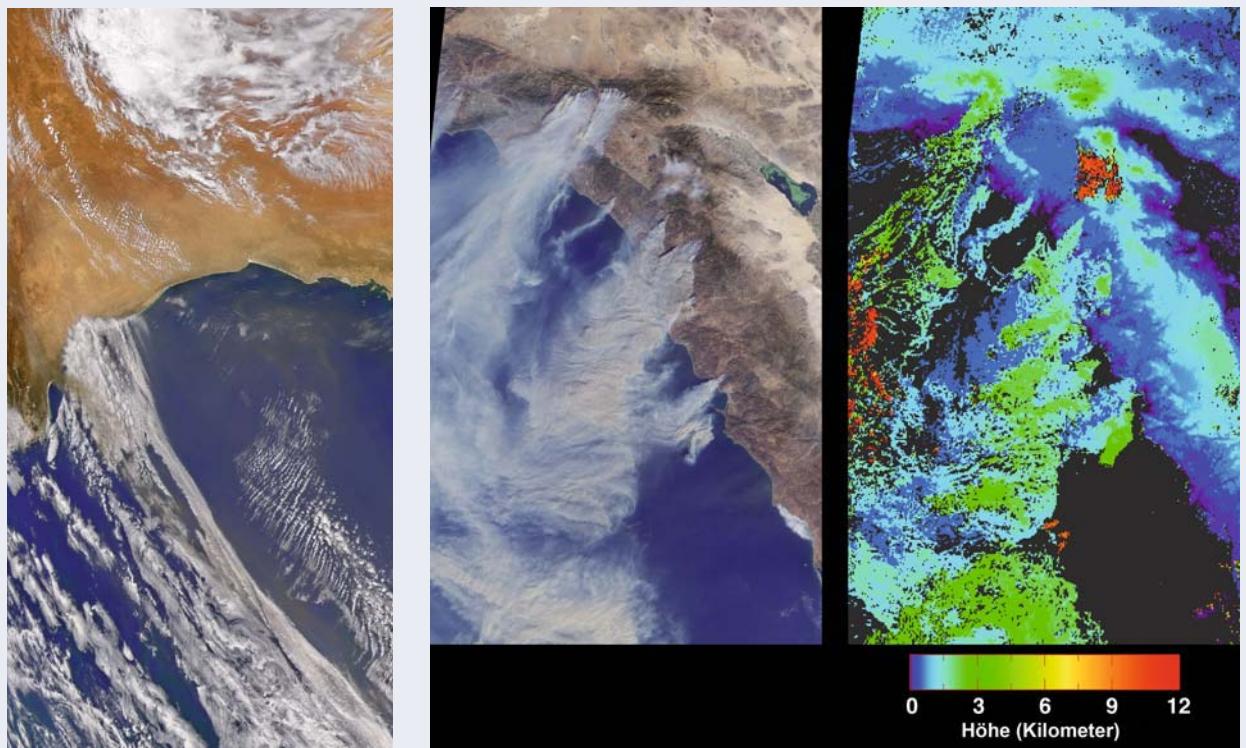
Brandrodung vernichtet viele Hektar wertvoller Waldflächen und erzeugt klima- und umweltschädlichen Rauch. © FEMA / Andrea Booher

Brände entfachen. Durch dieses „Spotting“ dehnen sich die Feuer rasend schnell aus – auf bis zu 400 Hektar in einer halben Stunde. Zum Vergleich: In einem Nadelwald wird in der gleichen Zeit gerade mal ein halber Hektar vernichtet.

Lokales Ereignis – globale Folgen?

Als regionale oder sogar globale Bedrohung können sich aber auch ausgedehnte Brandrodungen in den tropischen Regenwäldern entpuppen. Sie vernichten nicht nur die dort ohnehin stark bedrohte Tier- und Pflanzenwelt, sondern geben auch große Mengen an Schadstoffen in die Atmosphäre ab. So führten große Waldbrände in Südostasien 1997 zu einem Dunstschleier, der wochenlang über der Region lag und noch aus dem All deutlich zu erkennen war. Der Rauch der Brände vermischt sich damals mit Auto- und Industrieabgasen, die aufgrund der fehlenden Winde nicht mehr aufs offene Meer abdriften konnten. In den betroffenen Gebieten Malaysias betrugen die Sichtweiten teilweise nur noch wenige Meter. Der Smogindex erreichte hier teilweise Höhen von fast 840. Als gesundheitsgefährdend gelten Werte zwischen 301 bis 500. Atemwegserkrankungen in der Bevölkerung, ständig überfüllte Krankenhäuser und sogar der Absturz eines Verkehrsflugzeugs waren die Folge.

Doch das ist längst noch nicht alles. Denn Forscher vom Max-Planck-Institut für Chemie und vom Institut für Küstenforschung am GKSS-Forschungszentrum



Geesthacht haben den Ursprung von giftigem Quecksilber in der Atmosphäre untersucht. Dabei konnten sie mithilfe des fliegenden Luftbeobachtungs-systems CARIBIC an Bord eines Lufthansa-Airbus A340-600 nachweisen, dass Waldbrände und andere Biomasseverbrennungen größere Mengen dieses chemischen Elementes abgeben und damit zusätzlich zur Luftbelastung beitragen.

Und noch eines macht Waldbrände so brisant: Sie können das globale Klima beeinflussen. Denn in ihren gewaltigen Rauchwolken befinden sich riesige Mengen an winzigen Schwebteilchen oder Tröpfchen, die so genannten Aerosole. Welche Rolle diese im Klimageschehen spielen, ist noch nicht annähernd geklärt. Wissenschaftler gehen allerdings davon aus, dass sie in den letzten rund 100 Jahren die Durchschnittstemperaturen auf der Erde vermutlich um $0,4^{\circ}\text{C}$ gesenkt und damit die globale Erwärmung eingedämmt haben. Doch ob dieser Kühlereffekt für alle Aerosole und unter allen Bedingungen gilt, ist bisher nur teilweise bekannt.

Eine Task-Force gegen Waldbrände

Brennt es in Wald oder Buschland erst einmal lichterloh, ist schnelles Handeln gefragt. Da sich die Feuer unvorstellbar schnell ausbreiten und Schneisen in den Wald hineinfressen, zählt jede Sekunde für die Löschtruppen. Mit allen Mitteln versuchen Feuerwehrleute und Helfer, die Brandherde einzudämmen und eine weitere Ausbreitung der Flammen zu verhindern.

Der Rauch von großen Bränden ist auch aus der Umlaufbahn deutlich sichtbar, links in Australien. Höhe und Verteilung der Rauchfahnen zeigen ihren Einfluss auch auf die Atmosphäre. © NASA/GSFC; NASA/GSFC/SVS



Um gefährliche Waldbrände unter Kontrolle zu bekommen, schließen sich Feuerwehrleute dabei meist mit Meteorologen zu einer Task-Force zusammen. Nur so ist es möglich, rechtzeitig auf Wetteränderungen zu reagieren und die weitere Entwicklung der Brände besser vorhersagen zu können. Die Helfer legen Gegenfeuer, löschen Schwelbrände und schützen Fahrzeuge und Häuser mit Löschschaum. Bei den gewaltigen Feuersbrünsten in Amerika übernehmen die „firefighter“ und „smokejumper“ diesen oft lebensgefährlichen Job.

Stößt das traditionelle Löschmittel Wasser an seine Grenzen, werden aus der Luft spezielle Löschmaterialien über den Waldbrandgebieten verteilt. In Zukunft könnte ein neu entwickelter Zusatz für das Löschwasser dabei helfen, Waldbrände schneller und effektiver zu löschen. Wasser, das mit dem Produkt gemischt wurde, wirkt wie eine flüssige Löschdecke, die das Feuer durch Luftabschluss erstickt und zudem für Kühlung sorgt. In geringen Mengen zugesetzt, eignet sich dieses Mittel sowohl zur Brandbekämpfung als auch zum Schutz von durch Feuer bedrohten Objekten.

Als Brandkiller dient dabei eine flüssige Polymersubstanz, die ein Vielfaches an Wasser aufnehmen kann. Es bildet sich so ein Hitze abschirmendes Gel, das selbst an Decken und senkrechten Wänden hält. Aufgrund seiner hohen Zähigkeit fließt das Gel nur sehr langsam ab und bleibt deshalb länger löschtirksam. Der Schutzfilm nimmt die Verbrennungswärme an der Oberfläche auf, darunter bleibt aber die bewahrende Funktion intakt.

Einen ersten Härtetest hat das Gel bereits hinter sich. Bei den schweren Waldbränden im kalifornischen Orange County im Jahr 2006 wurden ganze Brandschneisen mit dem chemischen Zusatz ausgestattet, um ein weiteres Übergreifen zu unterbinden. Das hat hervorragend funktioniert. Die Flammen erstickten, sobald sie an die „eingegelten“ Bereiche herankamen.

Löschen ist gut, Feuer verhindern ist besser: Damit „firefighter“, Löschschaum und Notfallflugzeuge gar nicht erst zum Einsatz kommen müssen, ist gute Vorbeugung nötig. Mittlerweile gibt es einige Maßnahmen und Produkte, die Waldbrände verhindern sollen – zumindest immer öfter. Ein wichtiges Hilfsmittel dabei sind beispielsweise selbst-

löschende Zigaretten, die Wissenschaftler bereits vor einigen Jahren entwickelt haben. Mit einem Spezialpapier und besonderen Zusätzen versehen, gehen die feuersicheren „Fluppen“ nach kurzer Zeit aus, wenn nicht daran gezogen wird. Waldbrände durch unachtsam weggeworfene Zigaretten könnten durch diese intelligenten Produkte schon bald der Vergangenheit angehören. In Kanada und Teilen der USA sind sie längst Pflicht. Doch auch die Europäische Union oder Australien haben längst den Sinn der selbstlöschenden Zigaretten erkannt und planen eine schnelle Einführung.

Wann und wo man im Wald als Spaziergänger oder Jogger besonders vorsichtig sein muss, darüber informiert in Deutschland der Deutsche Wetterdienst (DWD) jedes Jahr von März bis Oktober in seinem Waldbrandgefahrenindex. Darin sind Waldbrandgefahrenstufen von 1 (niedrig) bis 5 (sehr hoch) für die einzelnen Bundesländer festgelegt. Bei der höchsten Gefahrenstufe dürfen die Wälder sogar nicht mehr betreten werden.

In Amerika dagegen erstellen die Forscher des „Wildland Fire Assessment System“ täglich für alle Bundesstaaten vergleichbare Karten des Waldbrandrisikos. Herzstück dieser Gefahrenkarten sind Vorhersagen von über 1.500 Wetterstationen. Die aktuellen Wetterdaten werden anschließend mit zahlreichen anderen Faktoren, unter anderem der Feuchtigkeit des brennbaren Materials, verknüpft und ausgewertet. Mithilfe von Computermodellen reduzieren die Experten die Fülle der Rohdaten wieder auf einen ebenfalls fünfstufigen Gefahrenindex und geben diesen dann an die Öffentlichkeit weiter.

*Links: Firefighter müssen noch immer viel Handarbeit leisten, aber Löschhubschrauber und spezielle Löschflüssigkeiten helfen ihnen dabei.
© FEMA/Justin Domerroski; U.S. Air Force/Roy. A. Santana; Chris Fahey*



Links: Wenn alle Bekämpfungsmaßnahmen versagen, bleibt nur noch die Evakuierung. Rechts: Verbrannte Bäume bleiben am Schluss (rechts). © FEMA/Bryan Dahlberg; NPS



Viele Pflanzen gedeihen auf verbrannter Erde besonders gut, wie hier das „fireweed“ in den USA. © NPS

Die Zapfen des Mammutbaums beispielsweise öffnen sich oft erst nach dem Durchzug eines Feuers und nach dem Brand sprießen Keimlinge aus dem von Asche bedeckten Boden. Ebenso sind die Eukalyptuswälder Australiens oder das Wald- und Buschland von Florida „Waldbrandspezialisten“. Geschützte, schlafende Knospen und Wurzeln überstehen unbeschadet die hohen Temperaturen, treiben nach den tobenden Feuersbrünsten aus und erlauben so einen Neubeginn. Für die Natur sind Waldbrände daher manchmal sogar lebensnotwendig.

Feuerökologen haben das schon lange erkannt, und anstatt allzu schnell die Löschmannschaften loszuschicken, sagen sie immer häufiger „let it burn“ – lass es brennen. Und das hat seine Gründe: Waldbrände reduzieren totes Material wie Holzreste oder Laub, versorgen die Böden mit mineralreichen Nährstoffen und fördern das Keimen der Samen. Sie sorgen aber auch für mehr Licht am Boden und dämmen die Massenvermehrung von Schädlingen wie Parasiten und Pilzen ein. Nicht jeder kleine Waldbrand – vorausgesetzt, es besteht keine Gefahr für Menschen – wird daher heute sofort gelöscht.

Es gibt aber noch einen weiteren wichtigen Grund für diese auf den ersten Blick überraschende Strategie der Experten: Ein Waldbrand wird viel gefährlicher, wenn es schon lange Zeit nicht mehr gebrannt hat. Denn dann stapelt sich das Totholz im Revier immer höher. Brennt es schließlich irgendwann doch einmal, ist so viel Brennmaterial vorhanden, dass die Flammen nicht nur am Boden bleiben, sondern die alles vernichtenden Baumkronenfeuer entstehen.

Die Flammen springen in so einem Fall von Krone zu Krone weiter und die Brände nehmen schnell riesige Dimensionen an. Beobachtungen von Wissenschaftlern zeigen, dass in Wäldern, in denen es regelmäßig brennt, seltener große Brandkatastrophen entstehen.

Fluch und Segen für das Ökosystem

Sie töten Menschen und verwüsten oft tausende Hektar Wald und Buschland, sie können aber nach dem Prinzip des „Phönix aus der Asche“ auch eine wichtige Aufgabe als „Modernisierer“ spielen oder der Natur wichtige Lebensgrundlagen zur Verfügung stellen: Waldbrände sind Fluch und Segen zugleich.

Denn unter natürlichen Bedingungen sind Feuer eine vollkommen normale Erscheinung. Einige Pflanzen, aber auch ganze Ökosysteme, haben sich sogar an die immer wiederkehrenden Waldbrände angepasst.

Rechts: Glück im Unglück: Fire-fighter konnten diese Siedlung gerade noch retten. © FEMA / Michael Rieger



INTERVIEW

Prof. Dr. Johann Georg Goldammer ist Leiter der Arbeitsgruppe Feuerökologie am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz



Sie sind Chef des „Global Fire Monitoring Center“, das seit Jahren im Auftrag der Vereinten Nationen weltweit Waldbrände beobachtet, auswertet und Regierungen und internationalen Organisationen konkrete Empfehlungen zum Handeln gibt. Warum lassen sich so verheerende Wald- und Buschbrände wie im Januar und Februar 2009 in Australien nicht verhindern?

Professor Goldammer: Derartige katastrophale Feuer hat es auch schon in den vergangenen Jahrhunderten gegeben, dafür gibt es viele historische Belege. Aber noch nie war die Bevölkerungsdichte in gefährdeten Wald- und Buschgebieten so hoch. Damit hat sich die Anfälligkeit der Menschheit gegenüber katastrophentartigen Bränden allgemein erhöht. Denken Sie beispielsweise an die von großer Armut gekennzeichnete Landbevölkerung in Entwicklungsländern. Oder beispielsweise an die wohlhabenden Bevölkerungsschichten in Nordamerika oder Australien, die es sich leisten können, den Großstädten zu entfliehen und sich ein Haus „im Grünen“ zu bauen.

Allerdings erweist sich diese schöne Natur zunehmend als Feuerfalle.

Was halten Sie im Rahmen der Waldbrand-Prävention von „technischen Hilfsmitteln“ wie selbstlöschenden Zigaretten?

Professor Goldammer: Weltweit spielen Zigaretten als Verursacher von signifikanten Wald- und Flächenbränden eine eher untergeordnete Rolle. Wenn man aber auch diese Ursache fahrlässig entstandener Feuer ausschließen könnte, dann wäre das natürlich zu begrüßen. Wichtiger ist es aber, den entscheidenden Gründen für das Entstehen der Wildfeuer durch Prävention zu begegnen – das sind Feuer, die im Rahmen der Landwirtschaft, Brandrodung oder durch Brandstiftung entstehen.

Durch den prognostizierten Klimawandel im 21. Jahrhundert könnten sowohl die Zahl als auch die Heftigkeit der Wald- und Buschbrände künftig zunehmen. Wie kann man sich dafür rüsten?

Professor Goldammer: Hier spielen besonders Konzepte der Land-, Weide- und Forstwirtschaft eine Rolle, die sich dem vermehrten Auftreten von extremen Wetterereignissen stellen müssen. Wälder können so aufgebaut und bewirtschaftet werden, dass sie widerstandsfähig gegen Stürme, extreme Niederschläge und Dürre – und damit Waldbrand – sind. Die pflanzliche Biomasse kann zur intensiven Nahrungsmittelproduktion und zur Bereitstellung erneuerbarer Energieträger genutzt werden – nicht nur in Biotreibstoff-Plantagen. Ein sys-

matisch durchforsteter, gepflegter und weitständiger Kiefernwald, in dem wenig Brennmaterial herumliegt, wird sich in vielen Erdteilen als stabilste Waldökosystem durchsetzen, der all den Wetterextremen und dem Feuer gewachsen ist.

Seit mehr als 30 Jahren erforschen Sie mittlerweile die Auswirkungen von Feuern auf Natur- und Kulturlandschaften. Was hat sich beim Phänomen Waldbrände in diesem Zeitraum am meisten verändert?

Professor Goldammer: Wir beobachten zwei gegenläufige Entwicklungen. In den armen Ländern der Welt wird der Naturraum durch unverändert eskalierende Brandrodung und durch Wildfeuer bedroht, da die Menschen die natürliche Vegetation mit Feuer umwandeln in Agrar- und Weideland – und damit gehen unkontrollierte Brände einher, die weltweit zur Reduzierung der schützenden und produktiven Vegetationsdecke führen. In den Industrieländern verstärkt sich der Trend zur Landflucht – die Menschen verlassen die Landwirtschaft, die Jugend sucht die Zukunft im städtischen Leben. Als Folge sieht man vor allem in Süd- und Südosteuropa, aber auch bei uns in Mitteleuropa, dass die Kulturlandschaft verwildert, dadurch erhöht sich das Potenzial für extreme Brände – siehe Griechenland 2007!

Sie betätigen sich im Rahmen Ihrer Forschung manchmal auch als Brandstifter. Warum?

Professor Goldammer: Sowohl in den alten Kulturlandschaften Europas, als auch in den großen Naturräumen

Asiens, Amerikas und Afrikas haben Menschen seit vielen Jahrtausenden das Feuer in der Land- und Weidewirtschaft oder aber auch zum Zweck der Jagd eingesetzt. Die Savannen Afrikas oder auch die Prärien Nordamerikas wurden deswegen regelmäßig gebrannt, damit der offener Lebensraum und vor allem die Weidegrundlagen für Wildtiere erhalten wurden, die anderweitig durch Überwuchs mit Busch oder Wald bedroht worden wären. So sehen wir beispielsweise heute, dass der Lebensraum der Bisons in Nordamerika sich durch den Wegfall der traditionell gelegten Feuer dramatisch schnell in Richtung Wald entwickelt und damit den Offenlandcharakter verliert. Ähnliches hat sich auch hier in Europa abgespielt, wo beispielsweise die Schafhirten die Heideflächen zwischen Norwegen und Portugal, vor allem auch in Nordwestdeutschland, regelmäßig mit Feuer pflegten. Warum? Die Heide überaltert, sie verholzt nach 20 bis 30 Jahren, sie wird unattraktiv für die Beweidung durch Schafe. Das Feuer verjüngt die Heide – die Regeneration aus Wurzeln oder der Samenbank nach dem Brennen ist hervorragend. Diese Erfahrung beleben wir derzeit wieder, indem wir in den Heidegebieten zum Werkzeug des kontrollierten Brennens auf wissenschaftlicher Grundlage greifen. Darüber hinaus verhindert das kontrollierte Brennen, dass die Heide von Wald überwachsen wird und dann letztendlich aus unserer Kulturlandschaft verschwindet – ein Prozess, der in Analogie zu den afrikanischen Grassavannen oder den nordamerikanischen Prärien gesehen werden muss. Ziel ist dabei nicht nur die Erhaltung der Heide selbst, sondern der Lebensräume von Arten, die auf die offenen

Heideflächen angewiesen sind, beispielsweise die Heidelerche oder auch das Birkwild.

An welchem Projekt arbeiten Sie zurzeit?

Professor Goldammer: Zwei Arten von Projekten in Entwicklungsländern sind stellvertretend für viele unserer Arbeiten weltweit. In der Mongolei führen wir das Instrument des kontrollierten Brennens ein, das die Wirkung natürlicher Blitzschlagfeuer in den Kiefernwäldern Zentralasiens nachahmt. Ziel ist es, diese Wälder mit Hilfe von gesteuerten Bodenfeuern geringerer Intensität offen zu halten, die Wälder vom brennbarem Material auf dem Waldboden zu befreien, dieses gezielt und sicher herauszubrennen, ohne den „Patienten Wald“ zu schädigen. Ein anderes typisches Projekt ist unsere Arbeit in Nepal. Die Wälder im Land sind auf dramatische Weise vom

Klimawandel und gleichermaßen auch von der demographischen Entwicklung betroffen. So wirkt sich die zunehmende Erwärmung der Himalaja-Region dahingehend aus, dass die Bergwälder austrocknen. Darüber hinaus bringen die landsuchenden Menschen verstärkt das Feuer in die Bergwälder ein, sowohl zur Rodung als auch unabsichtlich. Und so brannte es vor allem im März 2009 in den Bergregionen Nepals und Tibets, mit dramatischen Auswirkungen auf die Stabilität dieser sensiblen Bergwelt. Hier muss mit allen Mitteln die Sensibilität der Bevölkerung und der Politik erhöht werden und die Kommunen und Behörden müssen in die Lage versetzt werden, effiziente Verhütung und Bekämpfung von Waldbränden zu leisten.

Professor Goldammer bei einem Experiment. © Global Fire Monitoring Center, Freiburg





An der deutschen Nordsee-
küste wie hier bei Büsum
wird mit immer stärkeren
Sturmfluten gerechnet.
© Harald Frater



Naturkatastrophen in Deutschland

Meldungen von großen Naturkatastrophen sind bei uns im Vergleich zu vielen anderen Ländern relativ selten. Das liegt sicher auch daran, dass verschiedene Frühwarnsysteme existieren – und gut funktionieren. Daher ist es oft schon weit vor dem drohenden Ereignis möglich, präzise Unwetter-, Sturmflut-

oder Hochwasserwarnungen herauszugeben. Trotzdem dürfen wir uns in Deutschland nicht zu sehr in Sicherheit wiegen. Denn trotz aller Hilfsmittel stellen vor allem Stürme und Überschwemmungen immer wieder eine große Gefahr dar.



Gefährdung durch Fluten, Stürme und weitere Ereignisse

Mit mehr als zwei Millionen Blitzen pro Jahr ist Deutschland in dieser Kategorie gefährdet.
© Harald Frater

Die Weihnachtsbescherung im Jahr 1993 fiel am Rhein buchstäblich ins Wasser: Fast drei Tage lang stand die Kölner Altstadt trotz eilig aufgebauter Schutzanlagen unter Wasser und große Teile von Koblenz waren überflutet. Auf 10,63 Meter stieg damals der Rheinpegel in der Domstadt – knapp sieben Meter höher als der normale mittlere Wasserstand.

Dabei sah im Spätherbst 1993 zunächst alles ganz vielversprechend aus. Noch im November hatte ein stabiles Hochdruckgebiet für gutes und trockenes Wetter gesorgt. Doch Anfang Dezember änderte sich dies nachhaltig. Zunächst sorgten sporadische Niederschläge für eine erste Sättigung des Bodens, so dass dieser in der Folge kaum noch Wasser aufnehmen konnte. Ab Mitte Dezember kam es dann richtig „dicke“. Im Fachjargon war damals von einer „zyklonalen Westwetterlage mit raschem Durchzug einzelner atlantischer Tiefausläufer und breiten, ergiebigen Niederschlagsfeldern“ die Rede. Was im Klartext heißt: Regen, Regen, Regen ...

Besonders hohe Niederschläge fielen damals an Neckar, Nahe, Mosel und Sieg – also in den westlichen Mittelgebirgen. Innerhalb von zwei Tagen kamen hier so viele Niederschläge herunter wie sonst im gesamten Dezember. Allein die auf 630 Millionen Kubikmeter geschätzten Wassermassen des Moselhochwassers hätten als See die Fläche des Bodensees und eine Tiefe von 1,20 Meter gehabt. Und

diese Flut traf in Koblenz auf den ohnehin schon stark angeschwollenen Rhein. Ein Jahrhunderthochwasser war die Folge. Entsprechend groß war die Erleichterung, als die Deiche hielten. Auch wenn die Flut über die Wehranlagen in Köln, Bonn sowie Koblenz stieg und für verdreckte Wohnungen, überschwemmte Straßen und beschädigte Brücken sorgte, so wäre ein kompletter Deichbruch gleichwohl viel verheerender ausgefallen. Doch auch so waren die Schäden immens: Auf 400 Millionen Euro wurden diese damals geschätzt. Dunkelziffer unbekannt.

Bereits im Frühjahr 1995 hieß es schon wieder „Land unter“ am Unterlauf des Rheins. Doch obwohl die Flut diesmal noch ein paar Zentimeter höher stieg als vierzehn Monate zuvor, waren die Schäden dank der gesammelten Erfahrungen weitaus geringer als befürchtet. Denn die Katastrophenpläne waren verbessert worden, der Informationsaustausch zwischen den Einsatzkräften lief reibungsloser und die Anwohner hatten Keller und Erdgeschosse vorsorglich leergeräumt oder abgedichtet. Und doch wurde den Rheinanwohnern erneut bewusst, dass es eine endgültige Sicherheit vor dem Risikofaktor Hochwasser nicht gibt.

Extremereignisse wie diese, bei denen hunderte oder tausende von Helfern unterwegs sind, um das Schlimmste zu verhindern, treten in Deutschland immer wieder einmal auf, sie sind jedoch eher die Ausnahme. In den letzten zwei Jahrzehnten hat es vielleicht eine Handvoll davon gegeben. Neben den Rheinhochwassern fallen einem spontan die „Jahrhundertfluten“ an Oder (1997) und Elbe (2002, 2006) sowie die Winterstürme „Lothar“ (1999) und natürlich „Kyrill“ (2007) ein. Sie forderten zwar auch einige Todesopfer und sorgten manchmal für Schäden in Milliardenhöhe, mit Naturkatastrophen wie dem Hurrikan „Katrina“ 2005 in den USA oder dem Zyklon „Nargis“ 2008 in Myanmar lassen sie sich jedoch nicht vergleichen. „Katrina“ hinterließ 1.322 Tote und sagenhafte 125 Milliarden US-Dollar Gesamtschäden. Bei Nargis kamen 84.500 Menschen ums Leben – die meisten davon im Irawady-Delta. Hunderttausende wurden obdachlos.

Erdbeben, Lawinen, Erdrutsche

Viele Menschen in Deutschland fürchten sich trotzdem vor Überschwemmungen und Orkanen. „Weit weniger bekannt ist allerdings, dass – auf längere Sicht gesehen – Erdbeben auch in Deutschland durchschnittliche jährliche Schäden der gleichen Größenordnung generieren können wie die viel bekannteren und häufiger auftretenden Formen Hochwasser und Sturm“, sagt der Sprecher des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Professor Friedemann Wenzel vom Geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe. „Zum Beispiel ist Köln im langjährigen Mittel genauso durch Erdbeben wie durch Hochwasser gefährdet.“ Das liegt daran, dass Erdbeben zwar deutlich seltener als Hochwasser auftreten, dann aber erheblich höhere Schäden nach sich ziehen. Und noch eine Gefahr lauert womöglich im Verborgenen: Die Eifel ist heute eine idyllische Landschaft mit Hügeln, Seen und Wäldern. Doch im Untergrund brodelt es heftig: Noch vor wenigen tausend Jahren spien hier Vulkane Lava und heißen Dampf. Dieser Vulkanismus ist aber nicht tot – er ruht nur. Wissen-

schaftler halten es durchaus für möglich, dass es in Zukunft wieder einmal einen größeren Ausbruch geben könnte – wenn auch erst in einigen tausend Jahren.

Viel konkreter und realer sind hierzulande die Tücken einiger anderer Naturereignisse. So sterben in den bayerischen Alpen Jahr für Jahr mehrere Menschen bei Lawinen. Mitte Februar 2009 zum Beispiel ereignete sich dort gleich eine ganze Serie von schweren Lawinenunfällen. Dabei waren in der Nähe von Pfronten, Oberammergau und am Hochgrat im Allgäu drei Tote durch die Schneemassen zu beklagen, mindestens ein weiterer Skifahrer konnte – lebensgefährlich verletzt – von Helfern ausfindig gemacht und geborgen werden. Zwar sind solche Unglücke oft auf Leichtsinn – Ski- oder Snowboardfahren abseits der gesicherten Pisten – zurückzuführen, häufig genug sind in den Tourismusorten aber auch die Möglichkeiten des Lawinenschutzes noch längst nicht ausgereizt.

Gefahr droht bei uns immer wieder auch durch Erdrutsche und Muren. Betroffen davon ist keineswegs nur der Alpenraum. Dies hat sich am 18. April 2008 erneut gezeigt. Damals lösten lang anhaltende Regenfälle in Sachsen einen

*Der Ort Hitzacker an der Elbe wurde aufgrund fehlender Schutzmaßnahmen in den letzten Jahren häufig von Hochwasser heimgesucht.
© Harald Frater*



schweren Erdrutsch aus. Die Schlamm- und Erdmassen verschütteten auf einer Länge von bis zu 300 Metern den Standstreifen einer Autobahn. Die A17 Richtung Prag musste daraufhin wegen Aufräumarbeiten zwischen den Anschlussstellen Dresden-Südvorstadt und Dresden-Prohlis für mehrere Tage voll gesperrt werden. Menschen kamen bei der Naturkatastrophe aber nicht zu Schaden. Auf Rügen dagegen stellen die Kreidefelsen ein Naturrisiko dar. So stürzten ebenfalls im April 2008 mehr als 15.000

Jahr	Gebiet	Todesopfer	Schäden (in Mio. €)	Ereignis
22.01.1970	Baden-Württemberg	6	59	Verheerende Regenfälle und die einsetzende Schneeschmelze lassen die Flüsse Rhein, Main, Neckar und Mosel über die Ufer treten. Dammbrüche, überflutete Ortschaften und unterbrochene Bahn- und Fährverbindungen sind die Folge.
22.–26.05.1978	Hessen, Baden-Württemberg, Bayern	3	284	Nach heftigen Unwettern kommt es in mehreren Bundesländern zu Sturzfluten, Erdrutschen und Schlammlawinen. Flüsse treten über die Ufer, zehntausende von Häusern und landwirtschaftlichen Flächen sind überflutet oder beschädigt, Bahn- und Schiffsverkehr müssen zeitweilig unterbrochen werden.
06.–09.02.1984	große Teile des Landes	3	111	Winterstürme mit starken Niederschlägen sorgen für Überschwemmungen entlang von Flüssen wie Rhein, Neckar, Lahn, Sieg oder Mosel. Zahlreiche Gemeinden melden „Land unter“ oder sind von der Außenwelt abgeschnitten.
21.–27.12.1993	Nordrhein-Westfalen (Köln), Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg	5	446	Das vielleicht bedeutendste der vielen „Jahrhunderthochwasser“ an Rhein, Main, Mosel, Lahn und Donau lässt die Pegel auf Höchstmarken steigen. Allein in Köln sind fünf Quadratkilometer Fläche überflutet, tausende von Menschen müssen evakuiert werden.
13.–18.04.1994	Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Bayern, Baden-Württemberg	2	153	Heftige Regenfälle lassen in mehreren Bundesländern zahlreiche Flüsse und Bäche über die Ufer treten. Vor allem die Schäden in der Landwirtschaft sind gewaltig. Mehr als 1.500 Quadratkilometer Fläche sind von den Überschwemmungen betroffen.
22.01.–03.02.1995	Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Bayern	5	238	Mehrere direkt aufeinander folgende Winterstürme führen zu katastrophalen Hochwasserständen an Flüssen in Deutschland, Frankreich und den Beneluxländern. Von den Gesamtschäden in Höhe von 281 Millionen Euro ist nur ein Drittel versichert.
17.07.–10.08.1997	Odergebiet, Ziltendorfer Niederung	unbekannt	268	Tagelange Regengüsse in Polen und Tschechien führen zu Überschwemmungen entlang der Oder. 45.000 Soldaten und freiwillige Helfer sind im Einsatz, um das Schlimmste zu verhindern. Trotz aller Hilfsmaßnahmen sind die Schäden gewaltig.
12.–20.08.2002	Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Bayern	21	8.627	Die „Jahrtausendflut“ an Elbe, Donau und ihren Zuflüssen ist eine der schwersten Überschwemmungskatastrophen in Mitteleuropa seit dem Mittelalter. Die Sturzfluten und Wassermassen zerstören ganze Ortschaften und hinterlassen allein in Deutschland Schäden in Höhe von mehr als 15 Milliarden Euro.
Ende März bis April 2006	Sachsen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Brandenburg	1	74	Erneut sucht ein schweres Hochwasser das Elbeinzugsgebiet heim, teilweise steigen die Pegel sogar auf Werte, die über denen der Flut 2002 liegen. Eine Folge: Städte wie Hitzacker in Niedersachsen sind tagelang vollständig überflutet.



Schäden durch Orkane wie hier im westfälischen Sauerland sind ein auf lange Jahre sichtbares Zeichen für die Schadenanfälligkeit extremer Wetterereignisse.
© Harald Frater

Kubikmeter Kreide und Erde bei mehreren Abbrüchen an der weißen Kreideküste im Osten der Insel ab. Nach Ansicht von Experten drohen auch in Zukunft weitere solche Ereignisse. Sie häufen sich immer dann, wenn es über einen längeren Zeitraum überdurchschnittlich viel geregnet hat.

„Wirbelnde Winde“ auch in Deutschland

Wenn man den Begriff Tornado hört, denkt man unwillkürlich an zahlreiche Todesopfer und Schneisen der Verwüstung. Solche verheerenden Wirbelstürme treten vor allem im Mittleren Westen der USA, in der so genannten Tornado Alley regelmäßig auf. In Deutschland muss man sich darum aber keine Gedanken machen – sollte man zumindest meinen. Doch weit gefehlt. „Heftige Unwetter und ein



Tornado haben in Hamburg für zahlreiche Sachschäden gesorgt und mindestens zwei Menschen das Leben gekostet. Die starken Winde deckten Dächer ab, knickten Bäume um und ließen Baukräne umkippen. Der Tornado raste mit einer Geschwindigkeit von 150 Kilometern pro Stunde durch den Stadtteil Harburg und zerriss unter anderem einige Hochspannungsleitungen. 300.000 Menschen waren zeitweilig ohne Strom. Nach Polizeiangaben bildete sich am Montagabend auch im niedersächsischen Esenshamm ein Tornado und beschädigte dort ein Wohnhaus.“ Radiomeldungen wie diese vom 27. März 2006 zeigen eines ganz deutlich: Tornados gibt es nicht nur in den USA, sondern auch bei uns. Aber es handelt es sich doch sicher um eine Ausnahme, um eine seltene Laune der Natur? Leider nein. Das zeigte beispielsweise auch der 12. August 2008. Dieses

Schwere Naturkatastrophen in Deutschland

- ~~~~~ Überschwemmung
- ~~~~~ Sturmflut
- ~~~~~ Erdbeben
- ~~~~~ Hagel
- ~~~~~ Sturm/Unwetter
- ~~~~~ Vulkanausbruch
- ~~~~~ Tornado
- ~~~~~ Meteoriteinschlag



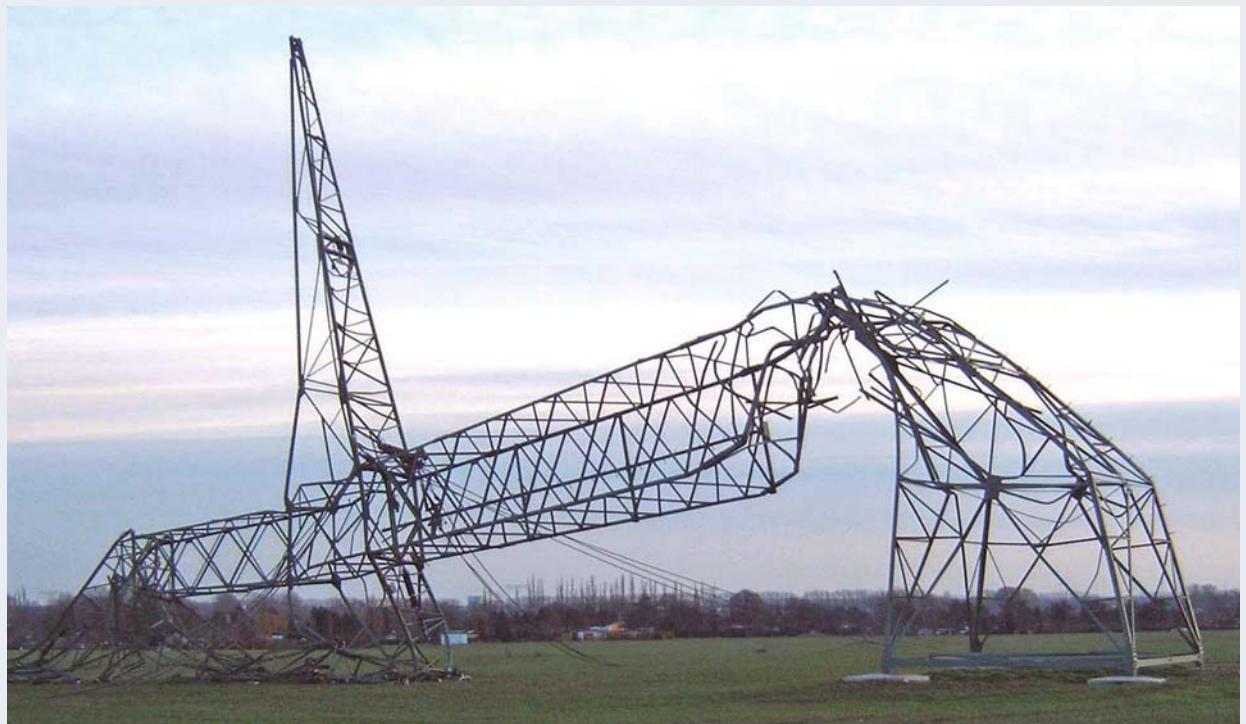
Schwere Erdbeben, heftige Vulkanausbrüche oder verheerende Tsunamis gibt es bei uns normalerweise nicht. Dafür sind es in Deutschland vor allem Winterstürme, Flusshochwasser und Sturmfluten, die immer wieder für Todesopfer und schwere Sachschäden sorgen.

Mal traf es Hessen und Nordrhein-Westfalen. Gleich zwei Tornados wüteten dort innerhalb weniger Stunden. Eine Windhose hinterließ in der Stadt Gießen eine 200 Meter breite und zwei Kilometer lange Spur der Verwüstung. Dort wurden unter anderem zahlreiche Dächer abgedeckt und Bäume umgeknickt. In der NRW-Gemeinde Burbach (Kreis Siegen-Wittgenstein) beschädigte ein Wirbelsturm mindestens 23 Gebäude zum Teil schwer. Verletzte waren bei beiden Naturereignissen glücklicherweise nicht zu beklagen.

Sind Tornados in Deutschland also keine Rarität, sondern durchaus ein normaler Teil des Wettergeschehens? Ja, sagt der Deutsche Wetterdienst (DWD) in Offenbach. Erstaunliche 15 bis 30 Tornados jährlich registrieren die Meteorologen – mindestens. Damit würde die Bundesrepublik in den USA sogar in der Top-Ten-Liste der am meisten gefährdeten Bundesstaaten geführt. Allerdings sind die Tornados hierzulande meist kleiner und weniger gefährlich als etwa in der Tornado Alley. Die Wirbelstürme bei uns entstehen meist im Sommer bei gewitterigen Wetterlagen. Prinzipiell können sie aber, so die Meteorologen, immer auftreten, wenn Luftmassen sehr labil sind und es blitzt und donnert.

Eine Warnung vor Tornados ist laut DWD praktisch unmöglich. Denn die ungewöhnlichen Phänomene bilden sich meist urplötzlich und dauern nur wenige Minuten. Deshalb bilden auch die Fernerkundungsgeräte des DWD, wie Satelliten und Wetterradar, Tornados wie in Hamburg in der Regel nicht ab.

Orkan „Kyrill“ legte im Januar 2007 das öffentliche Leben lahm und sorgte für Sachschäden in Milliardenhöhe. © GFDL





Helper im Dauereinsatz:
Ohne THW, Feuerwehr und
andere Organisationen geht
im Katastrophenfall wie hier
beim Elbe-Hochwasser 2006
nur wenig. © Harald Frater



Der Kampf gegen Naturkatastrophen

Extreme Naturereignisse wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Stürme oder Überschwemmungen hat es schon früher gegeben und sie werden auch in Zukunft die Erde und alle ihre Bewohner immer wieder in Atem halten. Dies kann auch der Mensch trotz all seiner Technologien nicht verhindern. Aber längst nicht jeder Hurrikan, jeder Erdrutsch oder jeder

Tsunami muss zwangsläufig in einer Katastrophe enden. Denn als solche gelten nur die Ereignisse, die Todesopfer fordern und große Sachschäden anrichten. Ein starkes Erdbeben in der Antarktis nimmt außer den Seismologen niemand wahr, ein Beben mit der gleichen Stärke in einer Metropole wie San Francisco oder Istanbul hingegen wäre eine Tragödie.



Vorher und nachher – was kann getan werden?

Rettungskräfte im Einsatz beim
Sichuan-Erdbeben 2008.
© GFDL

Agieren statt reagieren. Eine effektive Katastrophenvorsorge hilft im Vorfeld eines drohenden Ereignisses mit vielfältigen Hilfsmitteln wie Schutzmaßnahmen und Evakuierungen, die Gefahr für Leib und Leben sowie für Hab und Gut zu mindern. Dabei ist sie allerdings auf die Erkenntnisse der Katastrophenvorhersage angewiesen. Der Katastrophenschutz setzt dann ein, wenn das Ereignis eingetreten ist und die Folgen des Ereignisses abgemildert werden müssen.

Wenn ein gefährliches Naturereignis wie Hochwasser in einem dicht besiedelten Gebiet oder sogar in einer Megastadt mit vielen Millionen Einwohner droht, ist noch längst nicht alles verloren. Denn wenn das drohende Szenario rechtzeitig erkannt und die Bevölkerung umgehend gewarnt – und zur Not auch evakuiert – wird, kann oft das Schlimmste verhindert werden.

So wie im November 2007 beim Orkan „Tilo“. Der sorgte für die schwerste Sturmflut seit knapp 20 Jahren in der Nordseeregion und setzte beispielsweise in Hamburg Teile der Speicherstadt und von Altona unter Wasser. In den Niederlanden aber wurden aufgrund einer rechtzeitigen Warnung zum ersten Mal alle großen Sturmflutwehre von Maeslant, Hartel und Oosterschelde geschlossen. So konnte der Hafen von Rotterdam geschützt und das Eindringen der Wasser-

massen in die großen Flussmündungen verhindert werden. Und in Großbritannien machte das Thames Barrier die Schotten dicht, um den drohenden Einstrom des Meerwassers in die Themse zu unterbinden.

Frühwarnung gegen Sturm und Flut

Doch Frühwarnungen und Vorhersagen gibt es mittlerweile längst nicht nur bei drohenden Sturmfluten, auch Flusshochwasser – beispielsweise an Rhein, Elbe, Donau oder Weser – kann man mithilfe von ELWIS, dem „Elektronischen Wasserstraßen-Informationssystem“, frühzeitig identifizieren. Steigen die Pegel deutlich über normal schlägt ELWIS Alarm und es bleibt genügend Zeit, um geeignete Schutzmaßnahmen in Gang zu setzen – meistens jedenfalls. Doch was ist mit Stürmen, Starkregen und Sturzfluten, die ebenfalls häufig zahlreiche Todesopfer fordern und schwere Sachschäden anrichten? Auch vor drohenden Unwettern geben Wissenschaftler mittlerweile detaillierte Warnungen heraus. Aber wie erkennen Meteorologen kritische Wettersituationen? Wann kommt es zu einem „Alarm“? Und wie gelangen die Warnungen schließlich in unsere Wohnzimmer?

„Bei kritischen Wetterbedingungen, die zu einer Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen können, ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) per Gesetz verpflichtet, entsprechende Meldungen zu verbreiten“, erklärt der DWD-Wissenschaftler Gerhard Steinhorst. Um dafür gerüstet zu sein, hat der DWD ein dreistufiges Warnsystem eingerichtet, das aus Frühwarninformationen, Vorwarnungen und den eigentlichen Wetter- bzw. Unwetterwarnungen besteht. Diese Mehrstufigkeit stellt sicher, dass mit dem Heranrücken des gefährlichen Ereignisses die Informationen immer detaillierter und präziser werden. Die erste Stufe, das Frühwarnsystem, nutzt dabei die Ergebnisse von so genannten numerischen Vorhersagemodellen. Sie laufen auf Supercomputern und umfassen die nächsten zwei bis sieben Tage. Neben den hauseigenen Prognosen berücksichtigt der DWD für seine Frühwarninformationen auch Resultate anderer nationaler Wetterdienste und die des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW). Und für ausgewählte Wetterparameter ziehen die Meteorologen zudem so genannte Ensemble-Vorhersagen hinzu. „Diese fassen die unterschiedlichen Ergebnisse einer Vielzahl von rechnergestützten Wettervorhersagen zusammen und liefern beispielsweise Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Überschreiten von Schwellenwerten bei Regen oder anderen Niederschlägen“, erläutert Steinhorst. Liegen schließlich Erkenntnisse über mittelfristig drohende Unwetter vor, werden sie vom DWD jeweils in Berichtsform als „Wochenvorhersage Wettergefahren“ für den vorbeugenden Katastrophenschutz und die Öffentlichkeit

Links: Die Großrechner des DWD erstellen mithilfe von Modellen die numerische Vorhersage. Rechts: Meteorologen analysieren die Wetterlage anhand von Analysekarten und Satellitenbildern. © DWD



Was ist ein Frühwarnsystem?



Flucht vor dem Hurrikan an der Ostküste der USA. Speziell ausgewiesene Fluchtrouten erleichtern die Evakuierungsmaßnahmen.

© FEMA

Ein Frühwarnsystem weist auf ein Naturereignis hin, das bereits stattgefunden hat, dessen Folgen (Lavaströme, Lahars oder Tsunamis) besonders gefährdete Orte (Städte, Dörfer, Industriebetriebe) aber noch nicht erreicht haben.

Die Vorwarnzeit, also die Zeit zwischen dem Moment, wo ein Vulkanausbruch oder ein Erdbeben stattgefunden hat, und dem Zeitpunkt, an dem die Auswirkungen in den bedrohten Regionen spürbar werden, kann dazu genutzt werden, um Maßnahmen zur Vermeidung von Sach- und Personenschäden einzuleiten.

Je nach Art des Naturereignisses können die Vorwarnzeiten extrem unterschiedlich sein. Sie schwanken zwischen mehreren Monaten bei Vulkanausbrüchen bis zu nur wenigen

Sekunden bei Erdbeben. Um alle diese Aspekte zu berücksichtigen, muss ein gutes Frühwarnsystem mehrere Elemente beinhalten:

- Ein Messsystem, das die Daten für die Frühwarnung liefert
- Ein Kommunikationssystem, das die eingesammelten Daten zur Leitzentrale übermittelt
- Ein Vorhersagemodell für das Extremereignis, das Informationen zur Stärke und zum Verlauf der Katastrophe enthält
- Ein weiteres Kommunikationssystem zur Weitergabe der Vorhersage an die Entscheidungsträger
- Ein Bewertungssystem, das die zu erwartenden Folgen des Ereignisses abzuschätzen erlaubt und die Formulierung einer präzisen Warnung ermöglicht
- Ein weiteres Kommunikationssystem, das die Weitergabe der Warnung an Personen gewährleistet, die konkrete Aktionen einleiten und einen Einsatzplan aktivieren können.
- Die so genannte „letzte Meile“. Wissenschaftler verstehen darunter die Ausbildung der in gefährdeten Regionen ansässigen Bevölkerung, damit diese im Ernstfall die von den Experten ausgesprochene Warnung auch versteht und sich, ohne in Panik zu verfallen, retten kann.

Die Qualität eines solchen Frühwarnsystems wird letztlich daran gemessen, welchen Erfolg es bei dem Versuch hat, Schäden abzuwenden.

bereitgestellt. Zwölf bis 48 Stunden vor dem drohenden Unwetter tritt dann die zweite Stufe des Warnsystems in Aktion. Jetzt werden konkrete Vorwarnungen auf der Basis der numerischen Wettervorhersagen – dieses Mal für einen zeitlich näher liegenden Zeitraum und damit treffsicherer – sowie der daran angeschlossenen statistischen Verfahren (Postprocessing) erstellt. Ergebnis sind so genannte Warnlageberichte, in denen die drohende Situation schon ziemlich präzise und ausführlich beschrieben ist. Bei Wetterereignissen wie Orkanen, Starkniederschlägen oder Blitzzeis werden dann so genannte Vorwarnungen zu kommenden Unwetterwarnungen herausgegeben.

Die dritte Stufe innerhalb des Warnmanagementsystems umfasst die detaillierten landkreisbezogenen aktuellen Warnungen, die bis maximal zwölf Stunden vor dem Warnereignis erscheinen. „In diesem Kürzestfrist- und Nowcasting-Zeitbereich sind die aktuellen meteorologischen Messdaten besonders wichtig. Dazu gehören so genannte synoptische Daten der Wetterwarten wie zum Beispiel aktuelle Windwerte, stündliche Niederschlagsdaten oder Gewittermeldungen und die Informationen von Satelliten-, Radar- und Blitzortungssystemen“, sagt Steinhorst. Für das Nowcasting, das heißt die Vorhersage für die bevorstehenden zwei Stunden, kommen Verfahren zum Einsatz, die auf Messdaten, Modellergebnissen und statistischem Postprocessing beruhen.

Für die Zukunft gewappnet

Verteilt werden die so erstellten Warnungen schließlich per Internet (unter anderem <http://www.dwd.de>), Fax-Abruf, SMS, E-Mail und in Einzelfällen auch telefonisch. Bei der Information der breiten Öffentlichkeit ist der DWD dabei auf die freiwillige Hilfe von Hörfunk und Fernsehen angewiesen. Zu den wichtigsten Abnehmern der Warnungen gehören die Behörden und Einrichtungen des Katastrophen schutzes in Bund und Ländern, die technischen Hilfsdienste und die Polizei sowie die Feuerwehren. Für letztere hat der Wetterdienst sogar ein internetbasiertes Informationssystem namens FeWIS (Feuerwehr-Wetterinformationssystem) entwickelt, das die Warnungen kompakt und nach individuellen Gesichtspunkten ausgibt.

Zu den Schlüsselkunden zählen aber auch die Hochwasserzentralen der Länder, die bereits ab dem Bereich der Frühwarnung im Rahmen des

*Sturm „Emma“ im Anmarsch:
Markt Schwaben bei München
am 1. März 2008 - der DWD hat
die Behörden bereits lange vorher
gewarnt. © GFDL/J. Patrick Fischer*





Das Melde- und Lagezentrum des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) sorgt im Krisenfall für die Optimierung des länders- und organisationsübergreifenden Informations- und Ressourcenmanagements. © BBK

vorbeugenden Hochwasserschutzes versorgt werden: Meteorologische Daten, Modellergebnisse, spezielle Produkte und Warninformationen bilden im Katastrophenfall die Grundlage für die Hochwasserberechnungen der Landesbehörden und die daraus abgeleiteten Schutzmaßnahmen für Bevölkerung, Verwaltungen und Industrie. „Nicht zuletzt ist dem DWD aber auch die Information der breiten Öffentlichkeit über bevorstehende Wettergefahren besonders wichtig“, betont Steinhorst. So konnte beispielsweise der Orkan „Kyrill“, der in der Nacht vom 18. auf den 19. Januar 2007 mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 150 Kilometern pro Stunde über Deutschland und weite Teile Mitteleuropas hinweg zog, präzise vorhergesagt werden. Dennoch forderte der Wintersturm europaweit mindestens 49 Menschenleben und die Sachschäden beliefen sich auf mehr als 13 Milliarden US-Dollar.

Dass Kyrill nicht noch viel schlimmere Folgen hatte, lag nach Ansicht von Bundesinnenminister Wolfgang Schäuble auch am deutschen Katastrophen-Management im Vorfeld und während des Orkans. So hatten das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und der Deutsche Wetterdienst die Bevölkerung schon lange vor dem Eintreffen von „Kyrill“ über das drohende Sturmtief und mögliche Selbstschutzmaßnahmen informiert. „Der Einsatz in Folge des Orkans „Kyrill“ zeigt deutlich, dass der Katastrophenschutz in Deutschland gut aufgestellt ist“, zog Schäuble bereits am 19. Januar 2007 in Berlin ein Fazit. „In

Verbindung mit den exakten Wetterprognosen hat das deutsche Notfall-system seine Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt.“ Damit dies auch so bleibt, arbeiten die Wissenschaftler und Ingenieure ständig an der Verbesserung ihres Warnsystems. Dies betrifft etwa die numerischen Wettermodelle, mit denen die atmosphärischen Vorgänge immer genauer simuliert werden können, aber auch spezielle meteorologische Prognoseverfahren. „Darüber hinaus werden Systeme eingeführt, die die zunehmende Datenflut auf warnrelevante Informationen hin analysieren und bei Überschreitung eines Schwellenwertes automatisch einen Warnvorschlag generieren“, so Steinhorst. Doch damit nicht genug. Auch die Präsentation der Warnprodukte wird weiterentwickelt.

Während in Mitteleuropa vor allem Winterstürme und Überschwemmungen für viele Todesopfer und gewaltige Sachschäden sorgen, lauert beispielsweise in Südostasien mindestens noch eine andere Gefahr: Tsunamis. Gut in Erinnerung ist vielen sicher noch die Tsunami-Katastrophe vom 2. Weihnachtstag 2004, als rund um den Indischen Ozean mehr als 220.000 Menschen in den gigantischen Flutwellen starben. Um die Bewohner der Küstenregionen dort künftig besser vor solchen gefährlichen Tsunamis schützen zu können, hat ein Wissenschaftler-Konsortium unter Federführung des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) innerhalb von knapp vier Jahren ein neues Tsunami-Frühwarnsystem förmlich „aus dem Boden gestampft“. Im November 2008 wurde es offiziell eingeweiht und an den Meteorologischen, Klimatologischen und Geophysikalischen Dienst Indonesiens (BMKG) übergeben.

Neue Impulse in der Katastrophenforschung durch CEDIM

Doch nicht nur die Frühwarnung vor Naturereignissen hat in letzter Zeit große Fortschritte gemacht, auch die Katastrophenforschung ist längst in neue Dimensionen vorgestoßen. Verantwortlich dafür ist unter anderem das Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM; <http://www.cedim.de/>). Dabei handelt es sich um ein interdisziplinäres Forschungsprojekt der Universität Karlsruhe, des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) und des Forschungszentrums Karlsruhe im Bereich des Katastrophenmanagements.

Ziel der 30 Wissenschaftler aus 15 Instituten ist es, natürliche und vom Menschen gemachte Risiken „besser zu verstehen, früher zu erkennen und die Folgen von Katastrophen besser zu beherrschen“. Dazu gehört auch, Naturereignisse der Vergangenheit in einem anderen Licht zu betrachten. Mit neu entwickelten Methoden können die CEDIM-Forscher unter anderem die Schäden abschätzen, die entstanden wären, wenn Naturkatastrophen ein wenig anders verlaufen wären. So wiesen sie beispielsweise nach, dass eine nur geringfügig (zehn Prozent) höhere Windgeschwindigkeit beim Sturm „Lothar“ am zweiten Weihnachtsfeiertag 1999 zu einer Verdreifachung der Schäden an Wohngebäuden in Baden-Württemberg geführt hätte. „CEDIM-Forscher entwickeln darüber hinaus Schutzmaßnahmen für die großen urbanen Zentren der Welt, die durch Naturgefahren bedroht werden und durch ihr starkes Wachstum ein zunehmendes Risikopotenzial aufweisen“,

Nach Warnungen durch die Behörden können entsprechende Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden. © Harald Frater



GITEWS „entschärft“ Tsunamis

Es war der 2. Weihnachtstag im Jahr 2004 und er wurde zu einem schwarzen Tag in der Menschheitsgeschichte: Eines der stärksten jemals gemessenen Erdbeben mit der Magnitude 9,3 erschütterte den Grund des Ozeans vor der Küste der indonesischen Insel Sumatra und löste dabei einen gewaltigen Tsunami aus. Die Wellen rasten mit einer Geschwindigkeit von mehreren hundert Stundekilometern über den Indischen Ozean und vernichteten beim Auftreffen auf die Küste mit unvorstellbarer Wucht Menschen, Häuser und Straßen. Die traurige Bilanz: Über 220.000 Tote, unzählige Verletzte und verwüstete Dörfer, Strände und Felder so weit das Auge reicht.

Die Weltöffentlichkeit, aber auch Politiker und Wirtschaftsexperten reagierten damals nach dem todbringenden Naturereignis in Südostasien betroffen und überrascht zugleich. Denn die enorme Gefahr für Mensch und Natur, die von Tsunamis ausgeht, war bei vielen noch nicht richtig ins Bewusstsein gelangt. Doch es wurden auch Fragen laut. Warum ist es zu der Katastrophe gekommen? Und vielleicht noch viel wichtiger: Wie kann man in Zukunft verhindern, dass Tsunamis auch in Zukunft so dramatische Folgen haben?

Auf dem Gipfel der Geberländer nur knapp zwei Wochen nach dem Tsunami in der indonesischen Hauptstadt Jakarta beschlossen Politiker, UNO und Hilfsorganisationen schließlich die Gründung eines Frühwarnzentrums für Tsunamis im Indischen Ozean. Vorbild sollte das Pacific Tsunami Warning Center sein, das im Pazifischen Raum schon seit Jahrzehnten existiert und bei Gefahr Tsunami-Alarm in den gefährdeten Ländern oder Regionen gibt – in der Regel recht erfolgreich.

Schon ein paar Tage später präsentierten Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren der Bundesregierung ein fertiges Konzept für das weltweit modernste Frühwarnsystem dieser Art. Die Experten vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) und anderen deutschen Forschungseinrichtungen hatten darin unter anderem das unmittelbare Notfallmanagement in der bedrohten

Region nach dem Eintreffen einer Tsunami-Warnung berücksichtigt. Die indonesische Regierung zeigte sich schließlich derart beeindruckt von den deutschen Vorschlägen und Ideen, dass das Konzept für GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System) schließlich den Zuschlag erhielt.

Maßgeschneideter Schutz

Das neue System umfasst unter anderem ein Seismometer-Netzwerk sowie zahlreiche Pegelstationen und Bojen im Meer, mit denen sowohl auftretende Seebäben als auch Wellenbewegungen oder signifikante Änderungen des Meeresspiegels erfasst werden können. Diese Daten werden anschließend über Satellit automatisch an einen Zentralrechner übertragen. Im Ernstfall werden so genannte Echtzeit-Warnungen – das bedeutet innerhalb von zwei bis drei Minuten – an dezentrale Datenzentren in den betroffenen Ländern geschickt, die dann die Information der Menschen vor Ort in die Wege leiten. „Durch den Einsatz verschiedener Messverfahren an Land und im Wasser können Tsunamis von normalen Tiden, Sturmwellen oder sogar vom Durchzug einer Tiefdruckfront unterschieden werden“, erklärt Jörn Lauterjung, der zuständige Projektkoordinator beim GFZ. „Erst die Kombination eines gemessenen Erdbebens und eines Wellenereignisses führt zu einer Warnmeldung.“

Und GITEWS hat noch einen riesigen Vorteil: Es ist maßgeschneidert für die spezielle geologische Situation vor Ort in Indonesien. Erdbeben entstehen dort entlang einer Subduktionszone, dem Sundagraben, der sich bogenförmig von der Nordwestspitze Sumatras bis Flores im Osten Indonesiens erstreckt. Wird hier ein Tsunami ausgelöst, laufen die Wellen im Extremfall innerhalb von 20 Minuten an der Küste auf, so dass nur sehr wenig Zeit für eine Frühwarnung bleibt. Diese Randbedingungen lagen daher der Konzeption des gesamten Systems zugrunde, für das zudem neue wissenschaftliche Verfahren und neuartige Technologien entwickelt werden mussten. Ein zentraler Baustein von GITEWS sind Tsunami-Simulationen, die aufgrund der extrem kurzen Vorwarnzeit in Indonesien nicht erst im Ernstfall durchge-

führt, sondern vorausberechnet werden. Herzstück dieser Komponente ist die Tsunami-Modellierungssoftware „TsunAWI“. Das am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung entwickelte Programm stellt die Wellenausbreitung und die Überflutung an Land in bislang einmali ger Weise detailliert und präzise dar. Die vielen von den Wissenschaftlern mittlerweile durchgeführten Simulationen decken nahezu alle denkbaren und möglichen Tsunami-Varianten in der Region ab. Damit steht im Ernstfall immer ein vorberechnetes Szenario zur Verfügung, das ziemlich exakt mit den tatsächlichen Messdaten übereinstimmt und die Lage vor Ort realistisch wiedergibt.

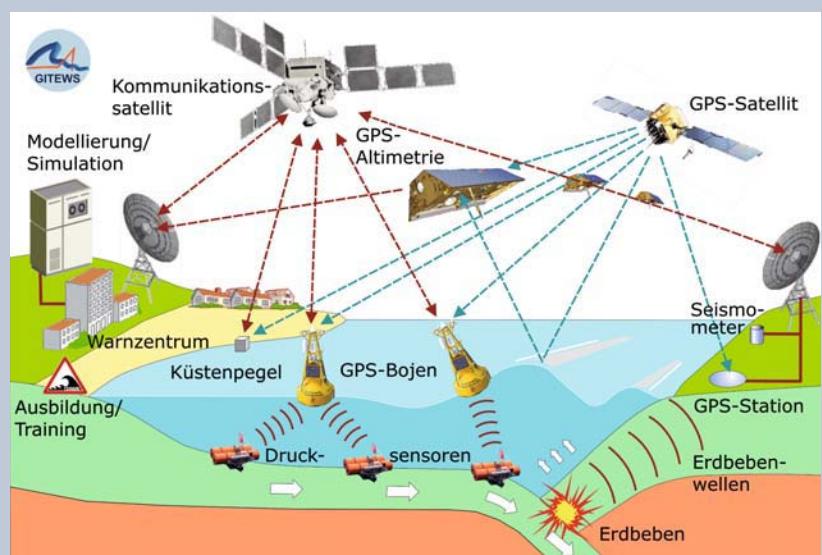
Alle verfügbaren Daten, Informationen und Modellierungen fließen letztlich in einem „Entscheidungs-Unterstützungssystem“ (DSS = Decision Support System) zusammen. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat dieses System entwickelt, mit dessen Hilfe entschieden wird, ob ein Tsunami-Alarm ausgelöst wird oder nicht. Im DSS erfolgt die Synthese aller Daten mit den vorberechneten Simulationen sowie die Erstellung der Warnmeldung. Der diensthabende Verantwortliche kann sich auf der Basis der vorliegenden Informationen sehr schnell einen Überblick über die Situation verschaffen und Entscheidungsvorschläge generieren. Das Lagebild wird zusammen mit den Handlungsempfehlungen auf mehreren Monitoren angezeigt.

„Problem der letzten Meile“

Wie gut oder wie schlecht ein Tsunami-Frühwarnsystem jedoch ist, hängt immer davon ab, ob die Warnung vor einer drohenden Flutwelle die betroffenen Menschen erreicht. Doch auch für dieses „Problem der letzten Meile“ hat GITEWS eine Lösung parat. Und dies in einer Region, wo moderne Kommunikationsmittel wie Handys oder Internet keineswegs selbstverständ-

lich sind: „Hier werden neben SMS auch Möglichkeiten der Verbreitung über Radio, Fernsehen und die gute alte Sirene oder auch die Nutzung von Lautsprechern in Moscheen diskutiert“, erklärt der GFZ-Forscher Lauterjung. Doch kann das neue Frühwarnsystem tatsächlich solche verheerenden Folgen eines Tsunami wie am 26. Dezember 2004 verhindern? Der Parlamentarische Staatssekretär im Bundesforschungsministerium Thomas Rachel zeigte sich auf der Eröffnungsfeier der Frühwarnzentrale im November 2008 in Jakarta jedenfalls optimistisch: „Deutschland leistet mit seinem Anteil am Tsunami-Frühwarnsystem einen entscheidenden Beitrag zur Katastrophenvorsorge in Indonesien und an den gefährdeten Küsten des Indischen Ozeans.“ Und weiter: „Mit dieser Technik können Behörden schnell und zuverlässig vor nahenden Tsunamis warnen“. Indonesische und deutsche Wissenschaftler werden nun die neue Technologie weiter ausbauen und optimieren. Die endgültige Übergabe des Systems an Indonesien ist für 2010 geplant.

GITEWS: Ein Netzwerk von land-, wasser- und luftgestützten Komponenten. © GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum



*Rechts oben: Transport von Sandsäcken in das Hochwassergebiet durch Hubschrauber der Bundespolizei.
Rechts unten: Feuerwehr und Technisches Hilfswerk im Einsatz.
© Harald Frater*

Naturkatastrophen und ihre Auswirkungen stehen immer im Zentrum des Medieninteresses. © Harald Frater



nennt der Sprecher des CEDIM, Professor Friedemann Wenzel vom Geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe, einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit. Im Rahmen der „Earthquakes and Megacities Initiative“, die mit CEDIM eng zusammenarbeitet, entwerfen die Wissenschaftler Werkzeuge zum Katastrophensmanagement direkt mit Stadtverwaltungen und lokalen Katastrophensmanagern.

Dabei geht es vor allem um das Einbeziehen von Vorsorgemaßnahmen in die Stadt- und Raumplanung, aber natürlich auch um die Implementierung von sicheren Baumaßnahmen in der Stadtentwicklung. Städte wie Istanbul, Manila, Katmandu sind zurzeit dabei, ihre Stadtplanungen mit Katastrophenvorsorgebetrachtungen zu verknüpfen. Dies ist eine wichtige neue Entwicklung, die zwar schon seit vielen Jahren gefordert wird, aber in der Praxis bisher kaum Niederschlag gefunden hat. „Wissenschaft und Forschung können also erhebliche Beiträge leisten, um die Wirkungen von Katastrophen zu erkennen, Schwachstellen zu analysieren, ‚Hot Spots‘ zu kennzeichnen und wissenschaftliche Methoden in die Schadensminderung einzuführen“, so Wenzels Fazit. „Wirksam werden diese Bemühungen allerdings nur dann, wenn sich die Gesellschaft über deren Notwendigkeit im Klaren ist.“

Weitere Vorsorgemaßnahmen

Frühwarnsysteme und Katastrophensforschung sind erfolgversprechende Strategien, um das Risiko für Mensch und Natur durch Extremereignisse zu vermindern. Doch es gibt noch eine ganze Reihe anderer Maßnahmen, die ebenfalls zu diesem Ziel beitragen können. Unterschieden werden dabei die technische (bauliche) Vorsorge, wie zum Beispiel Hochwasserschutz durch Deiche oder die Entwicklung erdbebensicherer Bauwerke, und nichttechnische Methoden. Dazu gehören unter anderem Nutzungseinschränkungen von gefährdeten Gebieten oder Gefahrenabschätzungen. Welche Gebiete katastrophengefährdet sind, ist meistens durch Risikoanalysen oder auch aus der Geschichte bekannt, so dass die Möglichkeit besteht, gezielte Schutzmaßnahmen zu entwickeln.

Die sicherste Form der Katastrophenvorbeugung bleibt in vielen Fällen die Umsiedlung der Bevölkerung aus einem gefährdeten Gebiet. In Rapid City in South Dakota haben sich die Verantwortlichen vor einigen Jahren zu dieser Radikalmaßnahme entschieden, nachdem bei einer Überschwemmung 238 Menschen starben und weit über 1.000 Häuser zerstört wurden. Nach der Katastrophe wurden die finanziellen Hilfsmittel für die Umsiedlung statt für den Wiederaufbau eingesetzt. Diese Maßnahme dürfte jedoch in dicht besiedelten ärmeren Ländern kaum durchzusetzen sein. Einen gewissen Schutz vor der Katastrophe stellt auch die entsprechende Vorbereitung, die so genannte „disaster preparedness“ dar. Die Bereitstellung von Hilfsmitteln im Ernstfall, die Zusammenstellung von potenziellen Hilfsteams oder die Aufstellung von Aktionsplänen sind nur einige Beispiele. Ein entscheidender Aspekt der Schutzmaßnahmen sind auch die Information und Schulung der Bevölkerung, egal in welcher Region dieser Erde. Dort, wo Katastrophen wie große Überschwemmungen sich fast jährlich wieder-



holen, ist ein Gespür für das Risiko fast zwangsläufig vorhanden. In anderen Regionen, wo solch ein Ereignis eher selten auftritt, ist das Bewusstsein dafür jedoch oft kaum ausgeprägt und dementsprechend sind die Menschen nur ungenügend vorbereitet. Hier helfen nur entsprechende Programme zur Information und Schulung der Bevölkerung. Grundsätzlich gibt es also genug Ansätze, die Risiken durch Naturgefahren zu senken. Das eigentliche Problem liegt bei der Realisierung der Vorbeugeprojekte – besonders in den Entwicklungsländern. Fehlende finanzielle Mittel sind dort häufig die Ursache dafür, dass längst entwickelte Maßnahmen nicht umgesetzt werden.

Katastrophenpläne und Katastrophenhilfe

Steht ein gefährliches Naturereignis unmittelbar bevor, lassen sich mögliche katastrophale Auswirkungen zum Teil drastisch reduzieren, wenn die Betroffenen wissen, wie sie sich am besten schützen. In Katastrophen- und Notfallplänen werden daher die notwendigen Maßnahmen zusammengefasst, Zuständigkeiten und die Verantwortung verschiedener Behörden und Institutionen festgelegt, und in Abstimmung mit Wissenschaftlern verschiedene Alarmstufen definiert. Wichtigstes Element der Notfallpläne ist die Identifizierung und Festlegung von Gefahrenzonen. Im Umfeld von Vulkanen sind dies zum Beispiel Gebiete, in denen Glutwolken, Aschefall oder Lava- und Schlammströme auftreten können. Doch die besten Gefahrenkarten nützen im Katastrophenfall nichts, wenn notwendige Evakuierungen aus den besagten Gebieten nicht stattfinden. 1985 am Nevado del Ruiz starben 22.000 Menschen genau in den Gebieten, die einen Monat zuvor von Vulkanologen als hochgefährlich eingestuft worden waren.

Die verantwortlichen Behörden hielten eine Evakuierung jedoch nicht für nötig. Ein positives Beispiel gab es dagegen bei der Eruption des Pinatubo auf der philippinischen Insel Luzon im Jahr 1991, dem vielleicht größten Vulkanausbruch des letzten Jahrhunderts. Eine präzise Vorhersage der drohenden Naturkatastrophe, eine schnelle, effiziente Kommunikation und eine entsprechende Katastrophenplanung ermöglichten es, dass 350.000 Menschen rechtzeitig in Sicherheit gebracht werden konnten. Ist die Naturkatastrophe da, steht ein breites Spektrum an Hilfsaktionen zur Verfügung, angefangen beim Selbstschutz der Betroffenen, über den Einsatz freiwilliger Helfer vor Ort, bis hin zum Wiederaufbau und der Herstellung des Zustands vor dem Sturm oder der Überschwemmung. Zahlreiche staatliche und Nichtregierungsorganisationen sind weltweit im Einsatz, um das Leid der Menschen zu lindern, zuallererst aber Leben zu retten. Vor allem bei Lawinen- und Erdbebenereignissen ist die schnelle Bereitstellung der Kata-

Evakuierungen können Menschenleben retten, wie hier eingeschlossene Winterurlauber nach starkem Schneefall in den Alpen. © Österreichisches Bundesheer



strophenhilfe entscheidend. Verschütteten bleiben oft nur wenige Tage, oft sogar nur wenige Stunden oder Minuten, um ohne ärztliche Hilfe zu überleben. Umso verwunderlicher ist es, dass ausländische Hilfe in einigen Fällen erst spät oder nur unzureichend in Anspruch genommen wird. So wie beispielsweise in Myanmar im Jahr 2008, als die dort herrschende Militärdiktatur nach dem Zyklon „Nargis“ im April und Mai 2008 vielen Rettern aus Europa, Amerika oder Asien die Einreise verweigerte. Läuft dagegen auf politischer Ebene alles reibungslos, können einige Einsatzgruppen mittlerweile an jedem Ort der Erde in wenigen Stunden nach der Katastrophe mit Hilfsmaßnahmen beginnen. Den Betroffenen und Rettern vor Ort kommt dabei heute modernste Technik zugute: Präzises Kartenmaterial aus Satellitendaten, Erstellung von Einsatzplänen mithilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) und natürlich eine insgesamt verbesserte technische Ausrüstung sorgen für eine schnellere und effektivere Durchführung von Einsätzen. Als positives Element erweist sich in Katastrophenfällen zudem die große Spendenbereitschaft. Durch Regierungshilfe und freiwillige Spenden werden jährlich immer größere Beträge für die Katastrophenhilfe aufgebracht. Das Potenzial, diese finanziellen Mittel konsequent auch für die Katastrophenvorbeugung einzusetzen, ist jedoch noch lange nicht ausgeschöpft.

Verhaltensregeln bei Naturkatastrophen

Das richtige Verhalten bei Naturkatastrophen entscheidet oft über Leben und Tod der betroffenen Menschen. Denn nicht immer greifen Vorhersagen, Vorbeuge- und Schutzmaßnahmen, um sie vor einer Katastrophe zu bewahren. Die Beteiligten müssen selbst in der Lage sein, ihr eigenes und anderer Leben zu schützen und weitere Schäden zu vermeiden – zumindest bis Hilfe eintrifft, und das kann Stunden oder in entlegenen Gebieten sogar Tage dauern. Wichtig ist es deshalb – wenn möglich – eine Notausrüstung parat zu halten, um die ersten Tage nach dem Ereignis problemlos zu überstehen. Dazu gehören unter anderem Essens- und Wasservorräte, Verbandsmaterialien und Medikamente, Werkzeuge, Taschenlampen, Feuerbekämpfungsmittel sowie ein batteriebetriebenes Radio, um Nachrichten empfangen zu können. Auch die wichtigsten Dokumente sollten im „survival pack“ nicht fehlen.

Und noch eines ist im Ernstfall entscheidend: Den Anweisungen der Behörden und der Rettungsdienste muss unbedingt Folge geleistet werden. Viele Betroffene halten dies aber nicht für selbstverständlich. Hilfskräfte haben oft damit zu kämpfen, die gefährdete Bevölkerung in Sicherheit zu bringen. In vielen von Naturkatastrophen bedrohten Regionen, zum Beispiel Japan, wird deshalb das richtige Verhalten im Katastrophenfall schon von klein auf geübt und mittels Informationsmaterialien bekannt gemacht. Hilfsorganisationen und Institutionen stellen diese Materialien, vom Malbuch bis hin zur Lawinengefährdungsabschätzung, in den meisten Fällen kostenlos zur Verfügung. Auch für Nichtbetroffene gibt es eine wichtige Regel: Vermeiden Sie es generell, in ein Katastrophengebiet zu reisen. „Katastrophentouristen“ behindern die Arbeit der Hilfsdienste und machen sich deshalb in vielen Fällen sogar strafbar. Reisende, die in Länder

Resignation in den Gesichtern der Betroffenen eines Erdbebens in Armenien. © Technisches Hilfswerk



Rechts: Wenn ein Unwetter naht, sollten entsprechende Vorsorge-Maßnahmen getroffen werden.
© Harald Frater

Barrikaden aus Sandsäcken und Pumpen können die Schäden durch ein Hochwasser mildern.
© Harald Frater



fahren, die bekanntermaßen häufig von Naturkatastrophen heimgesucht werden, sollten sich zudem vorher grundsätzlich bei Reiseunternehmen oder Behörden über drohende Risiken informieren, um in entsprechenden Fällen vorbereitet zu sein. Auch vor Ort gibt es Möglichkeiten, sich in den Medien über Gefahrensituationen zu informieren.

Versicherung von Naturkatastrophen

Egal ob Schäden am eigenen Haus oder am Auto: Gegen alle finanziellen Folgen von Naturkatastrophen gewappnet zu sein, ist nicht möglich, obwohl es auch Versicherungen für diese Art von Schadensereignissen gibt. Damit Erdbeben, Stürme oder Hochwasser überhaupt versicherbar bleiben, existiert ein internationaler Risikoausgleich durch die so genannten Rückversicherer – die „Versicherer der Versicherer“. Sie übernehmen Teile des Risikos der „normalen“ Versicherungsgesellschaften und bieten umfangreiche Beratungen an. Die Rückversicherungen, wie zum Beispiel die Münchener Rück, versichern sich jedoch auch untereinander. Nur durch diese Kooperation in einem weltumspannenden Netz verteilen sich die finanziellen Risiken und eine gewisse Absicherung von Katastrophen bleibt möglich. Denn die auszuzahlenden Summen können bei großen Naturkatastrophen schnell ins Unermessliche steigen.

Von den verheerenden Schäden, für die der Hurrikan „Andrew“ im Jahr 1992 in Florida sorgte, waren beispielsweise 17 Milliarden US-Dollar versichert. Zur teuersten Naturkatastrophe aller Zeiten entwickelte sich 2005 aber der Hurrikan „Katrina“. 61,6 Milliarden US-Dollar musste die Versicherungswirtschaft damals berappen, die volkswirtschaftlichen Schäden lagen sogar mehr als doppelt so hoch. Vergleichsweise überschaubar blieben im Vergleich dazu die finanziellen Folgen beim Tsunami in Südostasien im Jahr 2004. Versicherte Schäden in Höhe von „nur“ einer Milliarde Euro wurden bei dieser Naturkatastrophe registriert. Ein Grund dafür: Die Versicherung gegen Naturereignisse ist in vielen Entwicklungsländern weder erschwinglich noch üblich. Angesichts solcher Schadenssummen ist es kaum verwunderlich, dass die Untersuchungen der Versicherer über Naturkatastrophen mit zu den sorgfältigsten gehören, es geht schließlich um viel Geld. Da Versicherungen keine Wohlfahrts-, sondern Wirtschaftsunternehmen sind, müssen sie zudem extreme Schadenspotenziale ausschließen.

Ein Beispiel hierfür ist die Kölner Altstadt, die sich wegen des enormen Hochwasserrisikos schlichtweg nicht versichern lässt. Gleich zwei Jahrhunderthochwasser in zwei Jahren (1993 und 1995) sind hier ein eindrucksvolles Beispiel. Was Versicherungen, aber auch Wissenschaftlern zudem Sorgen macht: Offenbar ereignen sich große Naturkatastrophen mit steigender Häufigkeit. So haben beispielsweise zahlreiche verheerende tropische Wirbelstürme und das Erdbeben in der zentralchinesischen Provinz Sichuan das Jahr 2008 zu einem der schlimmsten Naturkatastrophenjahre überhaupt gemacht. Weltweit kamen nach Angaben der Münchener Rück nicht nur mehr als 220.000 Menschen durch die Naturereignisse ums Leben, die gesamtwirtschaftlichen Schäden betrugen auch rund 200 Milliarden US-Dollar.

Was tun bei schweren Stürmen?



Ob zu Hause, unterwegs oder im Urlaub: Von einem heftigen Sturm kann man überall überrascht werden. Wie man sich bei einem Orkan oder Tornado richtig verhält, das verrät das Deutsche Komitee Katastrophenvorsorge in seiner Broschüre „Unwetter über Europa“.

Selbsthilfe und Verhalten

- Nehmen Sie lose Gegenstände ins Haus oder befestigen sie diese (zum Beispiel Sonnenschirme, Fensterläden, Rollläden).
- Schließen Sie alle Fenster und Türen.
- Bleiben Sie möglichst in geschlossenen Räumen.
- Bei Tornados suchen Sie das unterste Geschoss im Innern des Hauses auf.
- Von Bäumen geht eine große Gefahr aus, meiden Sie diese nach Möglichkeit.
- Passen Sie Ihre Fahrweise den Windverhältnissen an.
- Halten Sie sich von Gerüsten fern.
- Bleiben Sie fern von herabhängenden Stromleitungen.
- Wohnwagen bieten keinen Schutz vor diesen Wetterereignissen, suchen Sie möglichst Schutz in festen Gebäuden.
- Denken Sie an Menschen in Ihrer Umgebung, die hilfsbedürftig sind oder die kein Deutsch verstehen. Sie benötigen Ihre Unterstützung.

Was kann man zur Vorbeugung tun?

Regelmäßige Prüfung

- der Funktionsfähigkeit einer Taschenlampe,
- der Funktionsfähigkeit eines batteriebetriebenen Radios,
- von Dachbedeckung sowie Kaminen (Beschädigungen beseitigen),
- von Antennen, Satellitenschüsseln sowie Solaranlagen,
- der Stabilität von Vordächern und Vorbauten,
- von Fassadenverkleidungen und Fensterladenarretierungen,
- des Baumbestandes auf Ihrem Grundstück auf morsche und lose Äste.

Für den Fall einer Evakuierung halten Sie bereit:

- Einen Trinkwasservorrat für einige Tage
- Radio mit UKW und Mittelwelle
- Taschenlampe
- Erste-Hilfe-Material
- Wichtigste Dokumente in wasserdichter Mappe
- Verpflegung und Wasser (1,5 Liter je Person für 2 Tage)
- Dosenöffner, Essgeschirr
- Feuerzeug, Decke oder Schlafsack
- Kleidung und Hygieneartikel
- Kerzen („Friedhofslampen“)

– nur geringfügig weniger als im Rekordjahr 2005 (232 Milliarden US-Dollar). Zudem stiegen die versicherten Schäden 2008 im Vergleich zum Vorjahr um 50 Prozent auf 45 Milliarden US-Dollar. Das ist erstaunlich, da die Anzahl der schadenrelevanten Ereignisse im Vergleich zum Vorjahr insgesamt zurückging (von 960 auf 750). Einzelne Katastrophen trieben aber die Opferzahlen und die Schäden deutlich nach oben. Gemessen an den versicherten Schäden, war Hurrikan „Ike“ nach den Berechnungen der Münchener Rück das teuerste Einzelereignis im Jahr 2008. Während in den beiden Vorjahren das US-Festland von schweren Wirbelstürmen weitgehend verschont geblieben war, sorgten Hurrikans in diesem Jahr für erhebliche Schäden auch für die Versicherungswirtschaft.

Gleich sechs tropische Wirbelstürme nacheinander – „Dolly“, „Edouard“, „Fay“, „Gustav“, „Hanna“ und „Ike“ – erreichten 2008 die US-amerikanische Küste. Der schwerste davon war „Ike“, der als Kategorie-2-Hurrikan bei Galveston (Texas) aufs Festland zog. Die Sturmflut, die Ike auslöste, setzte große Abschnitte der Küste von Texas und Louisiana unter Wasser. Auch auf seinem weiteren Weg über Land verursachte der Sturm nach Angaben der Münchener Rück durch extreme Niederschläge größere Schäden, sodass bisher von einem versicherten Schaden von 15 Milliarden US-Dollar (ohne die Schäden, für die das National Flood Insurance Program aufkommt) ausgegangen wird. Der gesamtwirtschaftliche Schaden durch „Ike“ beträgt demnach sogar rund 38 Milliarden US-Dollar.

50 Prozent weniger Treibhausgase bis 2050? Ein wichtiger Schritt ... © Public domain



„Damit setzt sich der von uns beobachtete langfristige Trend fort: Der Klimawandel hat bereits eingesetzt und trägt mit großer Wahrscheinlichkeit zu immer häufigeren Wetterextremen und dadurch bedingten Naturkatastrophen bei. Diese wiederum richten immer größere Schäden an, da weltweit auch die Wertekonzentration in risikoexponierten Gegenden, etwa an den Küsten, weiter steigt“, kommentierte Torsten Jeworrek, Vorstandsmitglied der Münchener Rück, die neuen Zahlen. „Mit großer Wahrscheinlichkeit sind die vom Menschen emittierten Treibhausgase die Ursache für die fortschreitende Erwärmung der Atmosphäre. Die Logik ist klar: Steigende Temperaturen bedeuten mehr Verdunstung und eine höhere Aufnahmekapazität der Atmosphäre für Wasserdampf und damit einen größeren Energieinhalt. Die Wettermaschine läuft auf höheren Touren, es kommt zu intensiveren Unwetterereignissen mit entsprechenden Folgen auf der Schadenseite“, ergänzte Professor Peter Höppe, Leiter der GeoRisikoForschung der Münchener Rück.

Und weiter: „Für die zunehmenden Starkniederschlagsereignisse in vielen Regionen der Erde, die Hitzewellen und die Hurrikans im Nordatlantik ist der Zusammenhang bereits heute wahrscheinlich. Die Schadenstatistik des Jahres 2008 passt in das Muster, das man aus den Berechnungen der Klimamodelle erwarten muss.“ Der Klimawandel ist nur einer der Gründe dafür, dass Naturkatastrophen in Zukunft noch mehr Todesopfer und noch gewaltigere Sachschäden verursachen könnten. Ein weiterer ist das ungebremste Bevölkerungswachstum, besonders in Entwicklungsländern. Es zwingt viele Menschen immer

wieder dazu, gefährdete Gebiete zu besiedeln. An dem Hochrisikovulkan Merapi auf Java leben zum Beispiel 70.000 Menschen in der äußerst riskanten „verbotenen Zone“. Rund zwei Millionen sind es sogar in der näheren Umgebung des Vulkans Mount Pinatubo auf den Philippinen. Und auch die vielerorts boomenden Megastädte erhöhen das Katastrophenpotenzial, da die Städte über sich hinaus wachsen und in katastrophengefährdete Gebiete, wie Überschwemmungs- und Waldbrandzonen, drängen. Ist der Kampf gegen Naturkatastrophen angesichts dieser Tendenzen überhaupt zu gewinnen? Wohl kaum. Dennoch werden Wissenschaftler, Versicherungsexperten, Hilfsorganisationen und mobile Katastrophen-Einsatzkommandos heute und in Zukunft alles daran setzen, Menschenleben zu schützen und die Schäden durch Erdbeben, Stürme oder Überschwemmungen so gering wie möglich zu halten.

Was tun bei einem Erdbeben?

Erdbeben treten meist unplötzlich und unerwartet auf und können große Gefahren mit sich bringen. Was also sollte man tun, wenn dort, wo man sich gerade aufhält, ein schwerer Erdstoß zu spüren ist? Hilfreiche Tipps hat das Deutsche GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) in seinem Merkblatt „Erdbeben“ zusammengestellt.

Bei Aufenthalt im Gebäude:

- Bleiben Sie ruhig! Keine Panik! Springen Sie nicht aus dem Fenster oder vom Balkon!
- Suchen Sie sofort Schutz unter einem schweren stabilen Möbelstück (z. B. Tisch) und halten Sie sich fest, solange die Erschütterung dauert, auch wenn sich das Möbel bewegt. Ist das nicht möglich, flüchten Sie unter einen stabilen Türrahmen oder legen Sie sich auf den Boden nahe einer tragenden Innenwand und weg von Fenstern und schützen Sie Kopf und Gesicht mit verschränkten Armen.
- Bleiben Sie im Haus, solange die Erdbebenerschütterungen anhalten! Am gefährlichsten ist der Versuch, das Gebäude während des Bebens zu verlassen. Man kann durch fallende Gegenstände oder Glassplitter verletzt werden. Ausnahme: Sie befinden sich bei Beginn der Erschütterung im Erdgeschoss in Nähe einer Außentür, die direkt ins Freie führt (Garten oder offener Platz, nicht enge Straße). Kein Treppenhaus begehen! Keinen Fahrstuhl benutzen!

Bei Aufenthalt im Freien:

- Suchen Sie schnellstmöglich einen freien Platz auf, entfernt von Gebäuden, Straßenlampen und Versorgungsleitungen – bleiben Sie dort, bis die Erschütterungen abgeklungen sind.
- Wenn Sie Auto fahren, steuern Sie es sofort an den Straßenrand, weg von Gebäuden, Bäumen, Überführungen und Versorgungsleitungen. Bleiben Sie im Fahrzeug, solange die Erschütterungen anhalten. Schalten Sie das Autoradio ein. Befahren Sie keine Brücken, Kreuzungen oder Unterführungen! Nach dem Beben fahren Sie mit größter Vorsicht weiter (vermeiden Sie dabei Brücken und Rampen, die durch das Beben beschädigt sein könnten) oder lassen Sie das Auto ganz stehen.
- Befinden Sie sich bei Beginn der Erschütterungen am Fuße eines Steilhangs, dann bewegen Sie sich umgehend von diesem weg (Gefahr von Erdrutschen oder Steinschlag!).
- Verspüren Sie Erdbebenerschütterungen an einer flachen Küste, dann rennen Sie so schnell wie möglich landeinwärts auf möglichst höheres Niveau. Das Erdbeben kann (u. U. bis zu 30 m hohe) Meereswellen auslösen (Tsunami). Diese treffen manchmal erst lange nach Abklingen der Bebenerschütterungen ein. Auch kann eine zweite Woge wesentlich später folgen. Deshalb verlassen Sie Ihren erhöhten Zufluchtsort erst, wenn offizielle Tsunami-Entwarnung gegeben wird.

Ablagerung

Ablagerung (oder Sedimentation) ist der Prozess des Absetzens von Materialien. Sedimentiert werden z. B. verwitterte Gesteine, abgestorbene Organismen oder vulkanische Aschen. Auch das Absetzen von chemischen Substanzen (Kalk, Gips, Salz) wird der Ablagerung zugerechnet.

Abrasion

Abrasion (Brandungserosion) ist die Abtragungsarbeit der Brandung an Meeresküsten und an Seen. Durch diesen Erosionstyp entstehen u. a. Kliffs. Die marine Abrasion ist auf die Abtragungsarbeit an den Meeresküsten beschränkt.

Abrasionsplattform

Eine Abrasionsplattform (auch Schorre) ist der sich meerwärts vor einer Steilküste anschließende relativ flache Bereich.

Absorption

Aufnahme von Strahlungsenergie durch einen gasförmigen, flüssigen oder festen Stoff und ihre Umwandlung in z. B. Wärmeenergie oder chemische Energie. Die Erdoberfläche absorbiert die kurzwellige Sonnenstrahlung und wandelt sie in langwellige Wärmestrahlung um.

Abtragung

Die Abtragung (oder Erosion) umfasst Prozesse, die durch die Verlagerung von Materialien zur Zerstörung oder Veränderung der Landschaftsformen führen. Fließendes Wasser, Meeresbrandung, Wind und Eis sind die Hauptakteure dieser Prozesse. Abtragsprozesse werden vom Klima gesteuert, die Art und Geschwin-

digkeit dieser Vorgänge sind u. a. abhängig von den Gesteinen und Böden, der Hangneigung und der Vegetationsbedeckung.

Aerosol

Feste und/oder flüssige Teilchen in der Atmosphäre, wie z. B. Staub, Rauch oder Salzkristalle. Diese Partikel können Strahlung absorbieren, streuen und emittieren. Die Teilchenzahl differiert in unterschiedlichen Gegenden sehr stark (in Großstädten oder in der Nähe von Industrieansiedlungen mehrere Mio./cm³, in der Arktis weniger als 10).

Akkumulation

Ansammlung von Verwitterungs- und Abtragungsmaterial, z. B. von Asche, Geröll oder Gesteinsschutt.

Albedo

Albedo wird der Anteil der Lichteinstrahlung genannt, der von einem Körper oder der Erdoberfläche reflektiert wird. Dabei gibt es große Unterschiede hinsichtlich der Albedo verschiedener natürlicher Oberflächen. Während Schnee bis zu 90 % der Lichteinstrahlung reflektieren kann, werden z. B. von Ackerböden nur 10–20 % wieder abgestrahlt. Die Albedo ist ein wichtiger Faktor für den Strahlungshaushalt der Erde.

Allgemeine

atmosphärische Zirkulation

Die allgemeine atmosphärische Zirkulation beschreibt und erklärt großräumige Windsysteme auf der Erde. Dies sind die Nordost- und Südost-Passatwinde in den Tropen, Westwinde in mittleren Breiten und Ostwinde in der Polarregion (am Boden). Unterschied-

liche Energiemengen, die von der Erde aufgenommen werden, werden durch den Luftmassenaustausch ausgeglichen.

Alphastrahlung

Teilchenstrahlung, die beim radioaktiven Alpha-Zerfall eines Elements freigesetzt wird. Der Kern eines bestimmten Atoms verändert sich spontan und sendet ein Alphateilchen aus, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht (entspricht einem Atomkern des Elements Helium).

Amplitude

Allgemein die Differenz zwischen einem niedrigsten und einem höchsten Messwert bzw. die Wellenhöhe einer Schwingung. In der Klimatologie ist z. B. die Differenz zwischen dem Tiefst- und Höchstwert der jährlichen Temperaturschwankungen eine Amplitude. In der Seismologie ist der maximale Ausschlag eines Seismographen die Amplitude. Sie ist ein Messwert, auf dessen Grundlage die Erdbebenstärke berechnet werden kann.

Andiner Typ

Bewegen sich ein ozeanischer und ein kontinentaler Erdkrustenbestandteil (Lithosphärenplatten) aufeinander zu, kommt es zu einer Ozean-Kontinent-Kollision bzw. zur Gebirgsbildung nach dem Andinen Typ. Ozeanische und kontinentale Erdkrusten unterscheiden sich in ihrer Dichte. Da die ozeanische Kruste schwerer ist, wird sie, wenn sie sich in Richtung einer kontinentalen Platte bewegt, untergetaucht oder subduziert. Die Platte wird in größeren Tiefen aufgeschmolzen und Magma steigt auf. Es entstehen

auf der kontinentalen Platte Vulkane. Zudem setzen Verformungen und Faltungen der Gesteine ein und Berge wölben sich auf. Ein typisches Beispiel für diesen Gebirgsbildungstyp sind die südamerikanischen Anden.

Arealeruption

Vulkanische Ausbruchstätigkeit, die auf eng begrenzten Flächen mit mehreren Austrittsstellen von Magma stattfindet. Im Gegensatz dazu stehen Lineareruptionen, bei denen die Ausbruchsstellen auf einer Linie angeordnet sind, und Zentraleruptionen, die von einem Punkt ausgehen.

Aridität

Meteorologischer Fachbegriff, der das Verhältnis von Verdunstung und Niederschlag beschreibt. Aridität liegt vor, wenn im jährlichen Mittel die Verdunstung höher ist als die Menge der gefallenen Niederschläge.

Aschen

Förderprodukte eines Vulkans. Sie sind keine Verbrennungsprodukte, sondern maximal sandkörngroße (kleiner als zwei mm) Gesteinsbruchstücke. Sie entstehen hauptsächlich, wenn Magma durch Gasausbrüche zerstört wird.

Aschenstrom

Heiße vulkanische Aschen, die bei einer Eruption den Berghang herunter fließen. Eine besondere Form der Aschenströme sind die pyroklastischen Ströme, die auch Gase und Gesteinsstücke enthalten. Besonders gefährlich für umliegende Ortschaften ist es, wenn sich Aschen mit Wasser (z. B. Schmelzwasser eines Gletschers) zu Schlammströme vermischen.

Aschenvulkan

Kegelförmiger Vulkan, der ausschließlich aus vulkanischem Lockermaterial besteht. Er entsteht, wenn bei einer Eruption keine Lava, sondern hauptsächlich Aschen ausgeschleudert werden. Aschenvulkane werden auch Lockervulkane genannt.

Aschenwolke

Vulkanische Aschen, die bei einer explosiven Eruption in die Atmosphäre geschleudert werden. Sie können bis in eine Höhe von 65 km gelangen und dort lange verbleiben. Aschenwolken können Witterung und Klima großräumig beeinflussen.

Asthenosphäre

Die Asthenosphäre ist der obere, zähplastische Teil des Erdmantels. Sie reicht an mittelozeanischen Rücken bis an die Erdoberfläche, liegt aber meist zwischen 30 und 200 km Tiefe. Auf der Asthenosphäre verschieben sich die starren Lithosphärenplatten.

Atmosphäre

Die gesamte Lufthülle der Erde. Ihre Dichte nimmt nach oben hin exponentiell ab. Das bedeutet, dass etwa die Hälfte ihrer Gesamtmasse unterhalb von ca. 5,5 km Höhe liegt. Die Atmosphäre besteht aus Gasen und gasartigen Elementen wie Stickstoff (ca. 78 %), Sauerstoff (ca. 21 %), Argon (ca. 0,9 %), verschiedenen anderen Edelgasen und Kohlenstoffdioxid (zusammen ca. 0,1 %), Wasserdampf und Aerosolen in veränderlichen Anteilen. Man unterteilt die Atmosphäre in verschiedene Stockwerke: Troposphäre (bis 17 km), Stratosphäre (10–50 km), Mesosphäre (50–80 km), Thermosphäre (80–700 km).

Atmosphärische Zirkulation

Die atmosphärische Zirkulation (auch allgemeine atmosphärische Zirkulation) beschreibt großräumige Windsysteme auf der Erde. Dies sind die Nordost- und Südost-Passatwinde in den Tropen, Westwinde in mittleren Breiten und Ostwinde in der Polarregion (am Boden). Der Luftmassenaustausch gleicht unterschiedliche Energieverhältnisse auf der Erde aus.

Atom

Kleinster Baustein eines Elements, der auf chemischem Weg nicht weiter zerlegbar ist. Ein Atom besteht aus einer Atomhülle, die negativ geladen ist und von Elektronen gebildet wird, sowie einem Atomkern, der positiv geladen ist und aus Protonen und Neutronen besteht. Atomkern und -hülle werden durch elektrische Anziehungskräfte zusammengehalten.

Aue

Die Aue ist der tiefer liegende Bereich des Talbodens. Sie wird oft von Hochwassern überschwemmt und besteht aus feinkörnigen Sedimenten, die dort von den Flüssen abgelagert werden. Auen sind Feuchtgebiete, die – vom Fluss aus gesehen – in die gehölzfreie Aue, die Weichholz- und Hartholzaue gegliedert werden.

Auenwald

Pflanzengesellschaften aus feuchtigkeits- und nährstoffliebenden Bäumen, Sträuchern und Kräutern. Sie sind die natürliche Vegetation der Auen und lassen sich grob in die von Weiden und Erlen dominierten Weichholzauen sowie die von Ulmen, Eichen, Eschen und Pappeln dominierten Hartholzauen gliedern.

Badland

Badlands entstehen in meist wenig verwitterungsresistenten Gesteinen in einem semiariden bis wechsel-feuchten Klima. Es sind von Kerbtälern und Erosionsrinnen tief zerschnittene Gebiete, die von scharfen Kämmen getrennt werden. Sie sind deshalb nicht mehr vom Menschen nutzbar. Die klimabedingte Vegetationsarmut begünstigt in den Badlands die Abtragung der Gesteine und Böden durch Niederschläge und Flüsse.

Basalt

Basalt ist ein vulkanisches Gestein, das aus Magmen stammt, die nah unter oder an der Erdoberfläche relativ schnell erstarren. Sie haben viele kleine Kristalle, die mit dem Auge nur teilweise erkennbar sind. Der feinkörnige, dunkle und siliziumarme Basalt entsteht hauptsächlich an mittelozeanischen Rücken. Er besteht aus den Mineralen Plagioklas (Feldspat), Olivin und Augit und ist das häufigste Gestein der Erdkruste.

Basaltisch

Basaltische Magmen, Laven oder Schmelzen besitzen einen geringen Anteil an Kieselsäure (SiO_4). Sie werden auch als basische Magmen (Laven etc.) bezeichnet. Sie stehen damit im Gegensatz zu kieselsäurereichen (sauren) Magmen, aus denen sich z. B. der Granit bildet. Der Kieselsäureanteil von Magmen entscheidet über die Zähflüssigkeit und über die Farbe (je mehr, desto zäher und heller).

Baumgrenze

Die Baumgrenze ist ein Grenzsaum, in dem selbst einzelne Bäume aufgrund von widrigen Standortfaktoren nicht

langfristig überleben können. Die montane Baumgrenze (in Gebirgen) ist bedingt durch niedrige Temperaturen und starke Winde, die polare ergibt sich ebenfalls durch niedrige Temperaturen und die kontinentale durch fehlende Niederschläge.

Beaufort-Skala

Einteilung der Windgeschwindigkeit in 12 Windstärken (0 = Windstille, 2 = leichte Brise, 8 = stürmische Winde, 12 = Orkan). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts vom englischen Admiral Sir Francis Beaufort entwickelt.

Bergrutsch

Rutschungen verlaufen eher gleitend als stürzend und die Gesteinsmassen bleiben während der Bewegung mehr oder weniger im Zusammenhang. Besonders auf tonigen Schichten beginnen Gesteinsblöcke im Verband zu gleiten.

Bergsturz

Bei Bergstürzen lösen sich Gesteine an Klüften und Schichtfugen aus dem Gesteinsverband und fallen oft im freien Fall hinab. Der Abbruch von mehr oder weniger großen Blöcken führt mit der Zeit zu großen Schutt-halden vor dem Hang.

Biosphäre

Besteht aus Pedosphäre (Boden), Hydrosphäre (Wasser) und Atmosphäre (Luft) und bezeichnet den Raum, der von Pflanzen, Tieren und sonstigen Lebewesen bewohnt wird.

Blizzard

Bezeichnung für einen Wintersturm in Nordamerika, der große Mengen Schnee mit sich führt. Der starke

Wind lagert den Schnee ungleichmäßig ab und türmt auf der Leeseite von Strömungshindernissen meterhohe Verwehungen auf. Dauern Blizzards länger an, kann dies katastrophale Folgen für die betroffene Region haben.

Blocklava

Blocklava entsteht aus gasarmer, langsam fließender Lava, die beim Erstarren Blöcke und Schollen ausbildet.

Blöcke

Der Begriff Block (Blöcke) beschreibt die Bodenart und teilt Sedimentgesteine anhand der Korngröße ein. Sowohl bei der Bodenart als auch bei den Sedimentgesteinen gilt, dass die Durchmesser der mineralischen Bestandteile über 20 cm liegen. Ton ist die feinste Korngröße (< 0,02 mm), darauf folgen Schluff (0,02 bis 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Kies (2 bis 63 mm) und Steine (63 bis 200 mm).

Boden

Boden ist der mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte oberste Bereich der Erdkruste. Böden bestehen aus Mineralen (z. B. Sand, Ton) sowie organischen Stoffen (Humus). Nach unten werden sie durch festes oder lockeres Gestein begrenzt, nach oben durch eine Vegetationsdecke oder die Atmosphäre. Mit ihren Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften erfüllen sie als Ausgleichsmedium eine bedeutende Rolle in den Ökosystemen.

Bodendegradierung

Auch als Degradation bezeichnete Veränderung des Bodens und seiner

Eigenschaften. Sie ist meistens gleichbedeutend mit einem fortschreitenden Funktionsverlust und einer Verschlechterung der Bodenfruchtbarkeit. Die Bodenerosion ist dabei nur der bekannteste Prozess. Überdüngung oder Verdichtung durch schwere Landmaschinen können eine chemische bzw. physikalische Degradierung bewirken. Bei der Desertifikation schreitet die Degradierung der Böden bis zur Wüstenbildung vor.

Bodenerosion

Bodenerosion ist die Abtragung des Bodens durch Wasser und Wind. Von Bodenerosion wird im Allgemeinen erst dann gesprochen, wenn durch menschliche Eingriffe die Abtragung über das natürliche Maß der Erosion hinausgeht. Ursachen für Bodenerosion sind vor allem Überweidung, intensiver Ackerbau und Entwaldung. In Kombination mit steilen Hängen, feinem Bodenmaterial und dem Grad der Pflanzenbedeckung wird großflächig Boden abgetragen. Bei Regen wird die fruchtbare Krume vom abfließenden Wasser weggeschwemmt, bei Trockenheit und starkem Wind wird der Boden ausgeblasen. Etwa zwei Drittel des Bodens gehen weltweit durch Wasser, ein Drittel durch den Wind verloren. In den gesamten USA werden jährlich 2 Mrd. t Mutterboden erodiert. Aber nur 1 Mrd. bildet sich in dieser Zeit neu.

Bodenfließen

Bodenfließen (auch Erdfließen) ist eine Massenbewegung von lockeren, feinkörnigen Böden oder Gesteinen, die Geschwindigkeiten bis zu mehreren km/h erreichen kann. Die hangabwärts gerichteten Bewegungen finden

meist im flüssigen Zustand statt, wenn Böden wassergesättigt sind und Reibungswiderstände überschritten werden. Die Solifluktion ist ebenfalls eine Form des Erdfließens. Hierbei bewegen sich Böden und Lockergesteine in Gebieten mit oberflächlich aufgetauten Permafrostböden.

Bodenkriechen

Sehr langsame, fließende Bewegung von Lockermaterial. Zäune und Masten neigen sich in Richtung der Bodenbewegung, Gebäude ohne Fundament verziehen sich. Diese Bewegung kann fast zerstörungsfrei verlaufen, wenn der Hang in sich stabil bleibt.

Bodenverdichtung

Zusammenpressen des Bodens durch den Einsatz schwerer Maschinen, vor allem in der Landwirtschaft. Dies führt zu einer Verschlechterung der Durchlüftung, der Durchwurzelbarkeit und der Wasserdurchlässigkeit des Bodens.

Bodenversalzung

Anreicherung von Salzen in den oberen Bodenschichten oder an der Bodenoberfläche durch Verdunstung. In ariden Gebieten, in denen der durchschnittliche Niederschlag geringer ist als die Verdunstung, ist dies ein natürlicher Prozess. Durch übermäßige oder falsche Bewässerung kann die Versalzung so stark werden, dass Anbauflächen nicht mehr nutzbar sind.

Bodenversiegelung

Bedeckung der Bodenoberfläche mit Bauwerken, Straßenbelägen oder sonstigen wasserundurchlässigen Materialien. Der Boden verliert

dadurch seine Funktion als Wasserspeicher und -filter.

Böe

Zufällige und kurzzeitige Schwankungen der Windgeschwindigkeit bei starkem Wind. Eine Böe (auch: Bö) entsteht durch Reibung verschieden schneller Luftströmungen untereinander und an der Erdoberfläche, wodurch Turbulenzen in der Windströmung bewirkt werden.

Brandungserosion

Brandungserosion (Abrasion) ist die Abtragungsarbeit der Brandung an Meeresküsten und an Seen. Durch diesen Erosionstyp entstehen u. a. Kliffs.

Bruch

Gesteine: An Brüchen wurden Gesteinsschichten aus ihrer ursprünglichen Lagerung gebracht. Minerale: Der Bruch von Mineralen dient ihrer Einordnung und Klassifizierung. Brüche in Mineralen verlaufen nicht an ihren Kristallflächen. Sie finden an unregelmäßigen Flächen statt. Beispiele von Bruchflächen sind u. a. der muschelige oder faserige Bruch. Vegetation: Von Niederungswäldern bestandene Feuchtgebiete, z. B. Erlenbruchwald.

Bruchfaltung

Bruchfaltungen gibt es in Gesteinen, die zuerst gefaltet werden und später durch nochmalige tektonische Beanspruchung in einzelne Schollen zerfallen.

Bruchstufe

Bruchstufen sind durch vertikale Verschiebungen von Gesteinschichten

entstandene treppen- oder stufenartig ausgebildete Flächen und deren zugehörige Steilabfälle.

Bruchtektonik

Die Bruchtektonik beschreibt die Auswirkungen von tektonischen Bewegungen, die zu Brüchen in Gesteinen führen.

Bruchzone

Bruchzonen sind überregionale Brüche (Verschiebungen von Gesteinsschichten) in der Erdkruste.

Buschlagenbau

Biologische Maßnahme zur Verhinderung von Massenbewegungen, wenn an Hängen schon kleinere Rutschungen aufgetreten sind. Dabei sollen hangparallel verlaufende Reihen von Holzpföcken und Reisigwällen frisch gesetzte Jungpflanzen vor Auswaschung schützen.

C14-Methode

Die C14- oder Radiokarbonmethode ist eine Technik zur Bestimmung des Alters von kohlenstoffhaltigen Materialien (Holz, Knochen, kalkhaltige Fossilien etc.). Die Methode basiert auf dem Vergleich des radioaktiven C14-Isotops und C12. In der Atmosphäre herrscht ein konstantes Verhältnis von C14 zu C12. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in Materialien und Lebewesen wider, denn der Kohlenstoff wird genau in diesem Verhältnis in die Organismen eingebaut. Wird eine weitere Kohlenstoffaufnahme verhindert (z. B. durch Tod des Lebewesens), nimmt das Verhältnis von C14 zu C12 ständig ab, da das C14 zerfällt. Die Halbwertszeit des C14 beträgt dabei 5.730

Jahre. Wird durch eine C-Isotopen-Messung das Verhältnis der verschiedenen Kohlenstoffe ermittelt, wird der Zeitpunkt bestimmt, an welchem die Aufnahme des atmosphärischen Kohlenstoffs endete. Auf diese Weise können Materialien bis zu einem Alter von etwa 50.000 Jahren datiert werden.

Caldera

Beim Einsturz des Daches einer Magmakammer oder durch eine Explosion, die einen Vulkankrater zum Einstürzen bringt, entsteht oft eine beckenartige Vertiefung im Vulkan, die Caldera. Diese Hohlform kann sich mit Wasser füllen und ein Kratersee entsteht.

Corioliskraft

Die Corioliskraft ist eine Beschleunigung, die auf alle frei beweglichen Körper in einem rotierenden Bezugssystem wirkt (Erde). Da sie eine Bewegung von Körpern voraussetzt, gehört sie zu den Scheinkräften. Durch die ablenkende Wirkung der Corioliskraft werden Strömungen senkrecht zur Stromrichtung abgelenkt. Auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links. Die Corioliskraft ist die Ursache für die Ablenkung der Passatwinde. Statt eines Südwinds entsteht durch die Corioliskraft auf der Nordhalbkugel ein Südostwind.

Dauerfrostboden

Siehe → Permafrostboden.

Deckenerguss

Beim Austreten von sehr flüssigen basaltischen Laven können sich keine Vulkankegel bilden, da sich die Lava

sehr schnell zu den Seiten ausbreitet. Die Laven treten häufig an Spalten aus und bilden dann vulkanische Deckenergüsse aus, die Plateaubasalte. Sie nehmen in Indien im Dekkantrapp eine Fläche von über 1 Mio. km² ein.

Deckenvulkan

Andere Bezeichnung für Schildvulkan.

Deflation

Deflation ist die Abtragung des Untergrundes oder der Gesteinoberfläche durch den Wind. Vergleichbar ist dieser Vorgang mit dem Effekt eines Sandstrahlgebläses.

Deformation

Gesteinsschichten besitzen je nach Zusammensetzung eine gewisse Druckfestigkeit. Wird diese Festigkeit überstiegen, kommt es bei plastischen (duktilen) Gesteinsschichten zu Verformungen. Die Deformation kann so stark sein, dass es zum Bruch in der Gesteinsschicht kommt.

Deformationsmessung

Methode zur Vorhersage von Vulkanausbrüchen. Durch Magmenbewegungen im Inneren eines Vulkans verändert sich auch dessen Oberfläche. Diese Hebungen, Senkungen oder Neigungen sind so gering, dass sie nur von sehr empfindlichen Messgeräten registriert werden. Zusammen mit anderen Messmethoden (z. B. Magnetfeldmessung oder Gasmessung) können Anzeichen einer Eruption rechtzeitig erfasst und Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

Dehnungsmesser

In der Erdbebenvorhersage eingesetztes Gerät zur Messung von

kleinsten Dehnungen im Gestein. Vor einem Erdbeben führt die Bewegung der Erdplatten zu erhöhter Spannung und dadurch zu Dehnungen im Gestein. Zusammen mit anderen Messmethoden wird so versucht, Erdbeben rechtzeitig vorherzusagen.

Deklination

Die Abweichung von der magnetischen Nordrichtung zu der geografischen wird (magnetische) Deklination genannt. Dieser Winkelbetrag ist für jeden Ort auf der Erde verschieden. Da das Magnetfeld der Erde um etwa 11° von der Rotationsachse der Erde abgewinkelt ist, liegen die geografischen und die magnetischen Pole nicht an demselben Ort.

Delta

Dreiecks- oder fächerförmige Aufschüttung von Schwebstoffen eines Flusses mit hoher Feststofffracht vor seiner Mündung. Im Mündungsbereich verliert ein Fluss seine Transportkraft und lagerte die mitgeführten Feststoffe ab, das Delta wächst allmählich in das Meer oder den See hinein.

Desaster Preparedness

„Auf den Katastrophenfall vorbereitet sein“. Schlagwort im Katastrophenmanagement, mit dem deutlich gemacht werden soll, dass man durch Vorbereitung, Frühwarnung und richtige Verhaltensweisen das Ausmaß der von Naturkatastrophen angerichteten Schäden erheblich reduzieren kann.

Desertifikation

Durch menschliche Eingriffe verursachter Prozess der Wüstenbildung. Als Folge einer Übernutzung wird in

Trockengebieten der Wasser- und Bodenhaushalt stark beansprucht und die Böden degradieren. Desertifikation ist eine Folge sozialer, wirtschaftlicher oder politischer Entwicklungen, die zu Änderungen in traditionellen Wirtschaftsweisen geführt haben. Der Desertifikation steht die natürliche Wüstenbildung (Desertation) gegenüber.

Dichte

Dichte ist Gewicht pro Volumen. Sie wird z. B. in g/cm³ ausgedrückt. Wasser hat eine Dichte von 1, Quarz etwa 2,6 und Gold über 15 g/cm³. Dichteunterschiede der verschiedenen Erdkrustenbestandteile sind bei plattentektonischen Prozessen von besonderer Bedeutung.

Diskontinuität

Diskontinuitäten sind Grenzflächen, an denen sich chemische und/oder physikalische Eigenschaften von Materialien sprunghaft ändern. Im Erdaufbau gibt es drei wichtige Diskontinuitäten: Conrad-D. trennt Ober- von Unterkruste (ca. 10 km Tiefe), Mohorovicic-D. (Moho) ist Kruste/Mantel-Grenze in ca. 30–40 km Tiefe, Wiechert-Gutenberg-D. ist Kern/Mantel-Grenze in 2.900 km Tiefe.

Distickstoffoxid

Siehe → Lachgas.

Divergierende Plattengrenze

Auch als Divergenzzone oder Riftzone bezeichnete Grenze zwischen zwei Kontinentalplatten, die sich voneinander weg bewegen. Effusiver Vulkanismus ist eine typische Erscheinungsform an divergierenden Plattengrenzen. In ozeanischer Kruste

markieren mittelozeanische Rücken divergierende Plattengrenzen. Kontinentale Grabenbrüche sind divergierende Plattengrenzen in kontinentaler Kruste.

DKKV

Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge. Ein aus der Internationalen Dekade zur Vorbeugung von Naturkatastrophen (IDNDR) hervorgegangener Verein, der als Zielsetzung eine nachhaltige Katastrophenvorsorge im internationalen Verbund verfolgt. Effektives Katastrophensmanagement wird vom DKKV als ein Ineinander greifen von Vorsorge, humanitärer Hilfe und Wiederaufbaumaßnahmen verstanden.

Dobson-Unit

Einheit zur Angabe der Ozonkonzentration in der Ozonschicht. Eine Dobson-Einheit (DU) ist definiert als eine unter Standardbedingungen (15 °C und 1.013 hPa) 0,01 mm dicke Schicht von Ozonmolekülen.

Dopplerradar

Radargerät, das besonders in der Meteorologie Verwendung findet. Unter Ausnutzung eines physikalischen Effekts (Doppler-Effekt) sind diese Geräte in der Lage, die Geschwindigkeit von herannahenden oder sich entfernenden Objekten zu bestimmen. Mit ihrer Hilfe können z. B. charakteristische Wolkenformen von Wirbelstürmen oder Tornados erkannt und ihre Geschwindigkeit ermittelt werden.

Dürre

Längerfristige und außergewöhnliche Trockenperiode mit hohen Tempe-

raturen, in der sonst übliche Niederschläge ausbleiben. Aufgrund der hohen Verdunstung können Dürren zu erheblichen Ernteausfällen führen.

Drift

Allgemeine Bezeichnung für Bewegungen in bzw. mit Wasser oder Luft. Der Begriff hat unterschiedliche Bedeutungen: 1. Oberflächliche, von konstanten Winden verursachte Meeresströmung, die auch Treibeis transportieren kann. 2. Tektonische Plattenbewegung (Kontinentaldrift). 3. Gerichteter Transport von kleinen Teilchen in der Troposphäre oder im Meer.

Ebbe

Die Ebbe beschreibt den Zeitabschnitt des sich zurückziehenden Wassers bei den Gezeitenströmungen (Tiden).

Effusiver Vulkanismus

Sammelbezeichnung für Eruptionsarten, bei denen Lava eher fließend austritt. Voraussetzung für effusiven Vulkanismus ist eine dünnflüssige Lava, die nach der Eruption noch weit fließen kann. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Vulkanismus Hawaiis. Der daher auch „hawaiianischer Typ“ genannte Eruptionstyp bildet flache und großflächige Schildvulkane. An den mittelozeanischen Rücken überwiegt ebenfalls effusiver Vulkanismus. Im Gegensatz zum effusiven steht der explosive Vulkanismus. Zwischen diesen Extremformen existieren zahlreiche Übergänge.

Einzugsgebiet

Einzugsgebiete von Flüssen sind durch Wasserscheiden abgrenzbare Räume, in denen Fließgewässer

Niederschlagswasser aufnehmen und abführen. An Wasserscheiden trennen sich die Niederschläge, indem sie entweder dem einen oder anderen Fluss-System zugeführt werden. Die oberirdischen Wasserscheiden sind meist Berge, Kämme oder Bergrücken.

Eis

Eis ist gefrorenes Wasser. Es hat ein etwa 10 % größeres Volumen als flüssiges Wasser. Mehr als 75 % des Süßwassers auf der Erde sind als Eis in den gefrorenen Gebieten der Antarktis und Grönlands oder in den Gebirgs-gletschern gespeichert. Die Erdoberfläche wird zu etwa 10 % vom Eis bedeckt.

Eisen

Eisen ist das vierhäufigste Element der Erdkruste (5,1 Volumenprozent). Als leitendes und magnetisierbares Metall sorgt es im äußeren Erdkern (gesamter Kern: 79,4 Volumenprozent) für die Entstehung des Erdmagnetfeldes. Im Erdmantel ist der Eisengehalt nur wenig höher als in der Erdkruste.

Eisschild

Eisschilde sind kleinere Inlandvereisungen. Der Vatnajökull auf Island (Europas größter Gletscher) gehört diesem Gletschertyp an.

Eiszeiten

Siehe → Kaltzeit.

Ekliptik

Ekliptik ist der Fachausdruck für die Erdbahnebene. Es ist eine gedachte Ebene, auf der sich die Erde um die Sonne dreht. Da die Erdachse um etwa 23,5° von dieser Ebene geneigt

ist, spricht man von der Schiefe der Ekliptik. Denn im Vergleich zu einer Ebene, die durch den Erdäquator gelegt wird, ist die Ekliptik um 23,5° geneigt.

El Niño

Temperaturanomalie des Oberflächenwassers im Ostpazifik und warme Phase der ENSO. Vor der Küste Südamerikas und entlang des Äquators sind die Ozeantemperaturen deutlich höher als normal. Dies hat heftige Regenfälle in den pazifischen Küstenregionen Südamerikas und einen Rückgang der dortigen Fischbestände aufgrund der ausbleibenden Zufuhr von nährstoffreichem Tiefenwasser zur Folge. Südostasien und Ostaustralien werden dagegen von Dürren heimgesucht. El-Niño-Phasen stehen im Zusammenhang mit einer bestimmten Luftdruckverteilung der Southern Oscillation. Der gegenteilige Zustand wird auch als La Niña bezeichnet.

Elektron

Negativ geladene Teilchen eines Atoms. Sie bilden die Atomhülle und sind nach einer vereinfachten Modellvorstellung dort in Schalen angeordnet, die nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen aufnehmen können und von innen nach außen aufgefüllt werden. Die Anzahl der Elektronen in der äußeren Schale bestimmt das chemische Verhalten eines Atoms.

Emissionen

Abgabe von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen, Strahlen, Wärme, Lärm oder elektromagnetischen Wellen von einer Quelle in die Umwelt. Die Einwirkungen der teilweise chemisch oder physikalisch

veränderten Emissionen auf Lebewesen oder Gegenstände bezeichnet man als Immission.

Emissions-Handel

Streitpunkt bei der Verabschiebung internationaler Klimaschutzabkommen, die Höchstwerte für den Kohlendioxidausstoß der beteiligten Länder festzuschreiben. Länder mit hohen Emissionswerten (z. B. die USA) wollen die Möglichkeit, Ländern mit Emissionswerten unter den Höchstgrenzen (z. B. Entwicklungsländer) nicht beanspruchte Kontingente abkaufen zu können.

EMS-Skala

Europäische Makroseismische Skala. Eine 1998 veröffentlichte Skala, die in zwölf Stufen die Intensität eines Erdbebens angibt. Ähnlich der Mercalli-Skala orientiert sie sich an den Auswirkungen der Erschütterungen, wie z. B. Schäden an Bauwerken, Veränderungen der Landoberfläche oder an den Berichten von Beobachtern. Die EMS-Skala basiert aber auf wesentlich umfassenderen und exakt kategorisierten Beobachtungen und Auswertungen der Erdbebenfolgen. Sie findet hauptsächlich in Nord- und Zentraleuropa Verwendung.

Endogen

Endogen bedeutet innenbürtig. In der Geologie werden die Kräfte aus dem Erdinneren als endogene Kräfte bezeichnet. Endogene Prozesse sind z. B. Magmatismus und Tektonik.

ENSO

„El Niño Southern Oscillation“. Der Begriff beschreibt die großräumige

Wechselbeziehung zwischen der pazifischen El-Niño-/La-Niña-Zirkulation und den atmosphärischen Luftdruckschwankungen der Southern Oscillation. El Niño bzw. La Niña gehen mit einer bestimmten Luftdruckverteilung der Southern Oscillation einher. Die kurzzeitigen Klima- und Zirkulationschwankungen der ENSO können weltweite Auswirkungen auf das Wettergeschehen haben.

Entwicklungsland

Umstrittener Begriff für ein Land, das weniger weit entwickelt ist als ein Industrieland. Eine einheitliche und international verbindliche Liste der Entwicklungsländer existiert nicht. Sie weisen aber eine Reihe von gemeinsamen Merkmalen auf, die auch zu der Bewertung ihres Entwicklungslands herangezogen werden. Dazu gehören u. a. ein niedriges Pro-Kopf-Einkommen und Bruttoinlandsprodukt sowie ein hohes Bevölkerungswachstum und eine schlechte Grundversorgung.

Epizentrum

Ein Epizentrum ist der Ort auf der Erdoberfläche, der sich senkrecht über einem Erdbebenherd befindet. Im Epizentrum treten die stärksten Erdbebenwellen auf.

Erdachse

Gedachte Linie durch die Pole und den Erdmittelpunkt. Sie ist die Rotationsachse, um die die Erde sich dreht.

Erdbeben

Erdbeben sind natürliche Erschütterungen der Landoberfläche. Bricht Gestein an einer tektonischen Störung unter dem Druck der aufgestauten

Spannung, wird die freiwerdende Energie in Form von Wellen abgegeben – die Erde bebt. Etwa 90 % der jährlich auftretenden Erdbeben (circa 800.000) haben diesen (tektonischen) Ursprung. 3 % entstehen durch Einstürze von Gesteinsdecken in Gebieten mit Kalkgesteinen, Salz oder Gips und die verbleibenden 7 % stehen in engem Zusammenhang mit dem Vulkanismus. Die meisten Bebenherde liegen in Tiefen von 0 bis 70 km. Weitaus seltener sind Tiefbeben, die unterhalb von 70 km bis in eine Tiefe von 700 km auftreten. Das Auftreten von Erdbeben konzentriert sich an Plattengrenzen.

Erdbebenherd

Erdbebenherde (Hypozentren) sind die Entstehungsorte von Erdbeben. Hypozentren von Erdbeben liegen meist zwischen 0 und 70 km (Flachbeben). Weitaus seltener sind Tiefbeben, die unterhalb von 70 km bis in eine Tiefe von 700 km auftreten. Senkrecht über dem Hypozentrum auf der Erdoberfläche liegt das Epizentrum eines Bebens. Es ist in den meisten Fällen auch der Ort der größten Erdbebenstärke.

Erdbebenintensität

Beschreibung der Auswirkungen eines Erdbebens an Gebäuden, der Landoberfläche oder sonstigen beobachtbaren Objekten. Zur Angabe der Erdbebenintensität werden verschiedene Skalen verwendet. Verbreitet sind die zwölfstufige Mercalli-Skala und die EMS-Skala.

Erdbebenmagnitude

Die Stärke eines Erdbebens. Sie wird aus dem maximalen Ausschlag eines

Seismographen, der Amplitude und dem Zeitintervall zwischen Eintreffen der Primär- und Sekundärwellen berechnet. Die Werte werden in Magnituden-Skalen, z. B. der Richter-Skala, angegeben. Die Intensität eines Erdbebens ist dagegen kein Messwert, sondern gibt die sichtbaren Auswirkungen in mehreren Stufen an.

Erdbebenwellen

Erdbebenwellen unterscheiden sich u. a. in der Art ihrer Auswirkungen an der Oberfläche, ihrem Verhalten im Erdinneren sowie durch ihre Geschwindigkeiten. Vier Erdbebenwellen werden unterschieden: Primärwellen und Sekundärwellen, die sich räumlich ausdehnen, sowie Love- und Rayleigh-Wellen, die sich nur an der Oberfläche fortsetzen.

Erdkern

Der Erdkern besteht zu etwa 80 % aus Eisen. Die restlichen 20 % werden wahrscheinlich hauptsächlich von Nickel, Silizium, Sauerstoff und Schwefel eingenommen. Er wird in einen äußeren und inneren Bereich gegliedert. Die Grenze zum Erdmantel liegt in 2.900 km Tiefe, die Grenze zum inneren Kern bei 5.100 km. Insgesamt hat er einen Durchmesser von fast 7.000 km. Im äußeren Erdkern liegt höchstwahrscheinlich die Ursache für die Entstehung des Erdmagnetfeldes.

Erdkruste

Die Erdkruste ist, der menschlichen Haut vergleichbar, nur ein dünner, spröder Überzug auf dem oberen Erdmantel. Die Grenze zwischen Kruste und Mantel liegt zwischen zehn und 65 km unter der Erdoberfläche (Mohorovicic-Diskontinuität). Unter

hohen Gebirgen erreicht die Erdkruste die größte Mächtigkeit, unter den Ozeanen ist sie am dünnsten. Sie wird in die kontinentale und ozeanische Kruste gegliedert. Diese Krustenbestandteile unterscheiden sich deutlich in Dichte, Gesteinsvorkommen, Dicke sowie in Alter und Herkunft. Ozeanische Kruste wird ausschließlich an den mittelozeanischen Rücken gebildet. Sie besteht hauptsächlich aus basaltischen Gesteinen, die von Tiefseesedimenten überlagert werden. Die leichtere kontinentale Kruste setzt sich vorwiegend aus Graniten zusammen. Mit dem oberen Mantelbereich bildet sie die Lithosphäre, die mit zwölf großen Lithosphärenplatten die gesamte Erdoberfläche bedeckt. Der Übergang von der Litho- zur Asthenosphäre schwankt zwischen 30 und 100 km.

Erdmantel

Der Mantel nimmt 82 % des Erdvolumens in Anspruch und wird hauptsächlich aus Siliziumdioxid (SiO_2), Magnesium, Kalzium und Eisen aufgebaut. Er umschließt in einer Tiefe von 2.900 km den Erdkern und reicht bis maximal 10 km unter die Erdoberfläche. In ihm befindet sich der „Motor“ für die Bewegung der Lithosphärenplatten. Heiße Magmaströmungen, die sich im Mantel auf und ab bewegen, verschieben die Platten und sorgen für Vulkanismus, Erdbeben und Gebirgsbildungen. Der obere Mantelbereich (Asthenosphäre) ist zumindest teilweise aufgeschmolzen. An den Mittelozeanischen Rücken reicht die Asthenosphäre bis an die Oberfläche, ihre Obergrenze liegt aber sonst zwischen 30 und 100 km Tiefe. Zur Lithosphäre gehören neben ozea-

nischer und kontinentaler Kruste auch die obersten Mantelmaterialien.

Erdrevolution

Die Erdrevolution ist der jährliche Umlauf der Erde um die Sonne.

Erdrotation

Nahezu gleichförmige Drehung der Erde von West nach Ost um ihre eigene Achse innerhalb von nicht ganz 24 h. Sie bildet die Grundlage für die Abfolge von Tag und Nacht, beeinflusst aber auch klimatische Faktoren, wie Windsysteme und Meeresströmungen.

Erdrutsch

Eine gleitende Massenbewegung ähnlich einem Bergrutsch, an dem eher erdiges Lockermaterial beteiligt ist.

Erdumlaufbahn

Ellipsoide Bahn, auf der die Erde ihren jährlichen Umlauf um die Sonne vollzieht. Ein vollständiger Umlauf legt unser Kalenderjahr fest und dauert 365 Tage, 5 Stunden, 48 Minuten und 46 Sekunden.

Erosion

Erosion ist der Vorgang der Abtragung von Böden und Gesteinen. Obwohl der Begriff für sehr viele Abtragungsvorgänge verwendet wird, bezeichnet er im engeren Sinne die lineare Abtragung durch das fließende Wasser. Flächenhafte Abtragung, z. B. durch Wind, wird Deflation genannt.

Erosionsbasis

Die Erosionsbasis eines Flusses ist das Niveau, bis zu dem die Erosion wirksam werden kann. Die absolute

Erosionsbasis sind Meere oder Binnenseen, denn an diesen Orten geht die Fließgeschwindigkeit gegen Null, die Ablagerung ersetzt die Abtragung. Von Fließgewässern durchflossene Seen, Stauseen oder Schwellen sind die lokale Erosionsbasis eines Fließgewässers.

Erstarrungsgestein

Siehe → magmatische Gesteine.

Eruption

Bezeichnung für vulkanischen Ausbruch. Die Art der Eruption (u. a. ausfließend, auswerfend) ist abhängig von der Zähflüssigkeit und dem Gasgehalt der Magmen sowie dem Vorhandensein von Wasser im Untergrund oder an der Oberfläche. Es können unterschiedliche Eruptionsarten entstehen.

Eruptionssäule

Bei explosiven Vulkanausbrüchen weit sichtbare Säule aus Dampf, Asche und Gesteinsbrocken. Eine Eruptionssäule kann bis zu 20 km in die Atmosphäre reichen und dort vulkanische Aschen verteilen. Diese können bis in die Stratosphäre aufsteigen und durch die Absorption des Sonnenlichts klimatische Veränderungen verursachen.

Eruptionstyp

Nach der Lage der Eruptionen werden Zentraleruption (z. B. Stratovulkan), Lineareruption (z. B. Spaltenvulkanismus) und großflächige Arealeruptionen unterschieden. Unterschiedliche Eruptionstypen werden häufig nach einem für diesen Typ charakteristischen Vulkan benannt, z. B. peleanischer Typ, Krakatau-Typ oder strombolianischer Typ.

European Macroseismic Scale

Europäische Makroseismische Skala, abgekürzt EMS-Skala. Eine 1998 veröffentlichte Skala, die in zwölf Stufen die Intensität eines Erdbebens angibt. Ähnlich der Mercalli-Skala orientiert sie sich an den Auswirkungen der Erschütterungen, wie z. B. Schäden an Bauwerken, Veränderungen der Erdoberfläche oder an den Berichten von Beobachtern. Die EMS-Skala basiert aber auf wesentlich umfassenderen und genau kategorisierten Beobachtungen und Auswertungen der Erdbebenfolgen. Sie findet hauptsächlich in Nord- und Zentraleuropa Verwendung.

Eutrophierung

Übersättigung von Still- und Fließgewässern mit Nährstoffen. Häufige Ursache ist die Einleitung von Abwässern oder der Eintrag von Düngern aus der Landwirtschaft. Die darin enthaltenen Nitrate und Phosphate bewirken eine übermäßige Vermehrung des Planktons. Dies führt zu einem erhöhten Sauerstoffverbrauch und zu Fäulnisprozessen. Die Eutrophierung kann letztendlich zum Absterben der Lebewesen im Wasser führen: Das Gewässer kippt um'.

Exogen

Exogen bedeutet außenbürtig. In der Geologie werden die Kräfte, die von außen auf die Erdoberfläche wirken als exogene Kräfte bezeichnet. Exogene Prozesse sind z. B. Verwitterung, Abtragung und Transport.

Exogene Kräfte

Zu den exogenen Kräften zählen: Wasser, Wind, Eis, Temperaturgegensätze, Schwerkraft sowie die mensch-

lichen Aktivitäten und Meteoriteneinschläge. (Der Begriff Kraft ist in diesem Zusammenhang nicht streng physikalisch zu verstehen. Die exogenen Kräfte steuern die exogenen Prozesse, wie z. B. Verwitterung, Abtragung und Transport.

Explosiver Vulkanismus

Sammelbezeichnung für Eruptionstypen, deren Fördermechanismus vorwiegend explosiv ist. Explosive Eruptionen können sehr unterschiedlich verlaufen und werden nach bekannten Vulkanen und deren Ausbruchstyp benannt, z. B. „Krakatau-Typ“ oder „Peleanischer Typ“. Im Gegensatz zum explosiven steht der effusive Vulkanismus. Zwischen diesen Extremformen existieren zahlreiche Übergänge. Aus dem Wechsel von explosiver Asche- und effusiver Lavaförderung entstehen z. B. die Stratovulkane.

Exzentrizität

Die Exzentrizität ist das Ausmaß der Abweichung der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne von einer exakten Kreisbahn. Innerhalb von 92.000 Jahren verändert sich die Erdbahn von einer elliptischen hin zu einer fast kreisförmigen Umlaufbahn. Diese Schwankungen nehmen zusammen mit der Präzession und den Veränderungen der Erdneigung Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Erde – und bei bestimmten Konstellationen können dadurch auch extreme Kälteperioden wie Kaltzeiten eingeleitet werden.

Falte

Eine Falte entsteht durch die seitliche Einengung einer Gesteinsschicht

(Faltung). Sie wird in Sattel (konvex) und Mulde (konkav) gegliedert. In Abhängigkeit der Stärke der Faltung können die Falten weiter unterteilt werden: stehende Falte, schiefe Falte, überkippte/liegende Falte.

Faltung

Faltungen von Gesteinen oder auch von ganzen Gebirgen sind auf Kompressionskräfte zurückzuführen, die die Gesteinspakete zusammendrücken (komprimieren). Sofern ein Gestein verformbar ist, bilden sich durch eine seitliche Einengung Sättel und Mulden. Die Sättel sind die nach oben gewölbten Bereiche, die Mulden die nach unten gerichteten. Werden die auf die Gesteine einwirkenden Kräfte stärker, neigen sich die Falten immer weiter zu einer Seite, was schließlich zum Überkippen führt. Senkt sich die Faltenachse an einem Ort ab, spricht man von einer abtauchenden Falte.

Faunenschlitt

Faunenschlitt ist eine andere Bezeichnung für Massenaussterben. Als Ursachen für Massenaussterben werden u. a. Meteoriteinschläge, Eiszeiten, Verluste von Lebensräumen und veränderte Salzgehalte der Meere diskutiert. In der Erdgeschichte sind öfter über 75 % aller Tier- und Pflanzenarten ausgestorben. Faunenschlitt fanden in folgenden geologischen Epochen statt: Kambrium, Ordovizium, Devon, Perm, Trias/Jura, Kreide/Tertiär.

FCKW

FCKW ist die Abkürzung für Fluor-chlorkohlenwasserstoffe. Lange Zeit, zum Teil heute noch, als Treibgase

z. B. in Haarsprays, Rasier- und Dämm-schäumen verwendet, schreibt man ihnen eine die Ozonschicht zerstörende Wirkung zu. Sie tragen aber auch durch die Absorption der Wärmestrahlung der Erde zum Treib-hauseffekt bei. Sie absorbieren 16.000 mal effektiver als CO₂ und sind in der Atmosphäre extrem langlebig (bis zu 400 Jahre).

Felssturz

Felsstürze gehören zu den Massenbe-wegungen, die stürzend, also mehr oder weniger im freien Fall, stattfinden. Sie erreichen jedoch nicht die Ausmaße von Bergstürzen.

Fernwelle

Wellen, die von Stürmen und Tief-druckgebieten auf dem offenen Meer verursacht werden. Die von ihnen erzeugten „Wasserberge“ erreichen als so genannte Fernwellen die Küsten und erhöhen den Wasserstand. Sie können das Ausmaß einer Sturmflut verschärfen.

Festgestein

Zu den Festgesteinen zählen die Magmatite, Metamorphe (Umwand-lungsgesteine) und Sedimentgesteine. Festgesteine werden den Lockerge-steinen gegenübergestellt. Bei Locker-gesteinen handelt es sich um noch nicht verfestigte (unkonsolidierte) Sedimente oder um verwitterte Fest-gesteine.

Feuersturm

Durch starke Winde angefachte Verbreitung großer Waldbrände. In hügeligen Regionen beeinflussen sich z. B. abwärts gerichtete Föhnwinde und aufsteigende Luftmassen. Die

entstehenden Turbulenzen wirbeln die Glut in die Luft oder fachen das Feuer wie mit einem Blasebalg an.

Firn

Firn ist eine Schneiform, die durch Antauen und erneutes Gefrieren von feinstrahligen Schneekristallen entsteht. Es bilden sich dann kleine, klumpige Schneekörner, der Firnschnee. Er ist etwa doppelt so schwer wie Neuschnee (0,4 g/cm³) und sein Luftanteil beträgt nur noch 40 %. Wird Firnschnee durch Auflast weiter verdichtet, wird er in Firneis und dies wiederum zu Gletschereis umgewan-delt.

Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit (in m/s angegeben) ist die Geschwindig-keit des Wassers in einem Gerinne. Sie nimmt in Fließgewässern von der Oberfläche zur Sohle ab. In Flusskurven ist sie am Außenufer höher als am Innenufer.

Fluss

Flüsse sind Fließgewässer mit einer Wasserführung von über 10 m³/s. Diese nicht allgemeingültige Abgren-zung bildet die Untergrenze zu Bächen. Die Überleitung zu Strömen liegt bei einer Wasserführung von mehr als 2.000 m³/s.

Flussbegradigungen

Bei Flussbegradigungen werden Mäanderbögen oder Fluss-Schlingen durchstochen, also vom Flusslauf abgetrennt. Der Flusslauf wird auf diese Weise verkürzt und begradigt. Höhere Abflussgeschwindigkeiten vor allem bei Hochwassern und die Vertie-fung des Flussbettes sind die Folge.

Flussbett

Das Flussbett ist der Bereich, in dem sich ein Fluss bewegt.

Flut

Die Flut ist das landwärts zuströmende Meerwasser einer Gezeit.

Frühwarnsystem

Frühwarnsysteme sind ein wichtiges Element der Katastrophenvorsorge. Durch die ständige Beobachtung und Auswertung unterschiedlichster Messdaten und ihr Einfließen in computergestützte Simulationsmodelle kann die betroffene Bevölkerung rechtzeitig vor einer Katastrophe gewarnt und evakuiert werden.

Fujita-Skala

Skala zur Angabe der Intensität von Tornados. Die Intensität wird anhand der verursachten Schäden eingeschätzt. Sie reicht von Windstärken unter Orkanstärke (F0, leicht) bis über 420 km/h (F5, verwüstend).

Fumarole

Fumarolen sind vulkanische Ausgusungen mit einem hohen Anteil an Wasserdampf und Temperaturen zwischen 200 und 1.000 °C.

Gasmessung

Methode zur Vorhersage von Vulkanausbrüchen. Die Zusammensetzung und Menge der austretenden Gase bieten Vulkanologen Anhaltspunkte für die Vorgänge im Inneren des Bergs. Zusammen mit anderen Messmethoden (z. B. Magnetfeldmessung oder Deformationsmessung) können Anzeichen einer Eruption rechtzeitig erfasst und Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

Gebirgsbildung

Gebirgsbildungen oder Orogenesen sind Gesteinsdeformationen, bei denen Falten- und Bruchtektonik auftreten und hohe Gebirge gebildet werden. Die Lagerungsverhältnisse der Gesteine werden bei diesem geologisch gesehen schnell ablaufenden Prozess völlig verändert. Der Ablauf von Gebirgsbildungen wird heute mit plattentektonischen Prozessen erklärt. Folgende Typen der Gebirgsbildung werden unterschieden: Inselbogen-Typ, Andiner-Typ, Kollisionstyp. Der Orogenese steht die Epigenese gegenüber. Hierbei handelt es sich um langsame Aufwölbungen (oder Einsenkungen) der Erdkruste, ohne dass die Lagenverhältnisse gestört werden.

Gemäßigte Breiten

Die gemäßigteten Breiten (oder Mittelbreiten) befinden sich auf der Nordhalbkugel zwischen dem 40. Breitengrad und dem Polarkreis. Auf der Südhalbkugel liegen nur Patagonien, Neuseeland und einige Inseln innerhalb dieser Klimazone, die durch Temperaturen zwischen 0 und 12 °C im Jahresmittel definiert wird. Die Mittelbreiten sind durch starke jahreszeitliche Wechsel und über das ganze Jahr verteilte Niederschläge charakterisiert. In Meeresnähe sind die Sommer kühl und die Winter mild, im Inneren der Kontinente jeweils heiß und kalt. Die sich fast über 30 Breitengrade erstreckende Klimazone wird in eine südliche warmgemäßigte und eine nördliche kühlgemäßigte Zone gegliedert. Da die Erdoberfläche gemäßigter Regionen normalerweise durch eine geschlossene Pflanzendecke überzogen ist, wird die mecha-

nische Verwitterung behindert, die chemische durch humide Verhältnisse dagegen begünstigt.

Geofaktoren

Geofaktoren bestimmen die Ausprägung einer Landschaft. Es sind u. a. der geologische Untergrund, Böden, Klima, die hydrologischen Verhältnisse, die Vegetation. Alle Faktoren beeinflussen sich in dem offenen System der Landschaft gegenseitig.

Geoid

Ein Geoid ist ein mathematischer Körper, der die wahre, durch Unregelmäßigkeiten der Dichte und Massenanziehung gewellte und gewölbte Figur der Erde darstellt.

Geologie

Die Geologie (griech.: Erdlehre) ist die Wissenschaft von der Entstehung und dem Aufbau der Erde. Die allgemeine Geologie behandelt die dynamischen geologischen Kräfte, wie z. B. die Tektonik und Vulkanologie (endogene Kräfte), die für Veränderungen der Erdkruste verantwortlich sind. Angewandte Geologie beschäftigt sich mit Baugrunduntersuchungen, Wasserversorgung und der Erkundung von Bodenschätzen. Die Rekonstruktion der Umweltverhältnisse (z. B. Gesteinsablagerungen, Aussterben von Lebewesen) in der Erdgeschichte ist wissenschaftlicher Forschungsgegenstand der historischen Geologie.

Geologische Gefahren

Sammelbezeichnung für Naturereignisse, die ihre Ursache im Erdinneren oder nahe der Erdoberfläche haben und zu Naturkatastrophen anwachsen können. Erdbeben oder vulkanisch

aktive Gebiete fallen unter diesen Begriff.

Geomorphologie

Die Geomorphologie ist ein Teilgebiet der physischen Geographie und beschäftigt sich mit den Oberflächenformen der Erde. Diese werden aufgrund ihrer Erscheinung (Morphographie), Entstehung (Morphogenese) und Verbreitung (regionale Geomorphologie) untersucht.

Geophysik

Wissenschaft, die sich mit allen die Erde betreffenden physikalischen Erscheinungen befasst. Sie untersucht den Aufbau des Erdinneren und alle seismischen, elektrischen, thermischen und magnetischen Phänomene der Erde. Ein wichtiges Teilgebiet ist die Seismologie, aber auch die Meteorologie und die Hydrologie sind geophysikalische Disziplinen.

Georelief

Das Georelief zeigt die Höhengestaltung der Erdoberfläche.

Geosphäre

Die Geosphäre umfasst die oberste Erdkruste, die Landoberfläche und die darüber liegende Lufthülle. In der Geosphäre überschneiden sich Land (Pedosphäre), Wasser (Hydrosphäre), Luft (Atmosphäre) sowie Pflanzen- und Tierwelt (Biosphäre).

Geothermik

Die Geothermik ist ein Teil der angewandten Geologie und beschäftigt sich mit den Wärmeströmen der Erde.

Geowissenschaften

Bezeichnung für die Naturwis-

senschaften, die sich u. a. mit den Prozessen auf und in der Erde befassen. Zu den Geowissenschaften gehören Geologie, Geographie, Geophysik, Gesteinskunde, Mineralogie, Paläontologie, Ozeanographie, Hydrologie und Meteorologie. Auch Geochemie, Geobotanik, Geomedizin und Völkerkunde werden zu den Geowissenschaften gezählt.

Geoökologie

In der Geoökologie werden Funktionsweisen, Verbreitung und Zusammenhänge der Ökosysteme der Erde untersucht. Forschungsgegenstände sind z. B. Bodenerosion oder die Quantifizierung von Stoffkreisläufen im Landschaftshaushalt.

Geröll

Geröll besteht aus Gesteinsbruchstücken, die durch bewegtes Wasser (Bäche, Flüsse oder Meere) transportiert und abgelagert werden. Je nachdem, wie stark das Geröll an anderen Steinen oder dem Untergrund an- oder aufschlägt, sind die Kanten der Gesteinsbrocken eher stark oder schwach abgerundet.

Gestein

Gesteine sind feste oder lockere Verbindungen aus verschiedenen Mineralien. Es gibt jedoch auch Gesteine, die nur aus einem Mineral bestehen (monomineralische Gesteine). Magmatische Gesteine bestehen aus erkaltetem Magma und sind daher ungesichtet und ohne Fossilien, wie z. B. Granit. Sedimentgesteine sind geschichtete Ablagerungsgesteine aus verschiedenen Gesteinsmaterialien, wie z. B. Sand- oder Kalkstein. Metamorphe Gesteine

entstehen nach der Umwandlung von Gesteinen aufgrund von hohen Drücken/Temperaturen, Stoffaustausch oder Umkristallisation, wie z. B. Quarzit.

Gesteinshärte

Die Gesteinshärte wird in der Geomorphologie durch die Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegenüber exogenen Prozessen, wie Verwitterung oder Abtragung, gemessen. Granit ist z. B. widerständig („hart“) gegenüber mechanischer Verwitterung, aber anfällig gegen chemische Verwitterung.

Geysir

Ein Geysir ist eine heiße Quelle, die in periodischen Abständen springbrunnenartig und mit hohem Druck Wasser ausstößt. Der Ausstoß erfolgt durch Überhitzung des Wassers im Untergrund. Geysire sind eine typische Erscheinung jungvulkanischer Gebiete.

Gezeiten

Gezeiten (oder Tiden) sind durch Anziehungskräfte von Mond und Sonne (und durch Fliehkräfte der Erde) entstehende Änderungen des Wasserstandes der Meere. In einem etwa 12,5-stündigen Wechsel treten Ebbe (abfließendes Wasser) und Flut (auflaufendes Wasser) auf. Die Wasserstandsunterschiede zwischen Ebbe und Flut sind überall auf der Welt unterschiedlich. Im pazifischen Ozean beträgt der Unterschied nur 0,5 m, an der Nordseeküste etwa 2 m. An der Bay of Fundy in Kanada sind es über 16 m. Nipptiden sind Gezeiten mit geringen, Springtiden mit sehr großen Schwankungen.

Glazial

Der Begriff glazial bedeutet als Adjektiv „durch die Wirkung eines Gletschers“. Z. B. glaziale Erosion = Abtragung durch das Gletschereis. Das Glazial (Substantiv) ist der Fachbegriff für eine Kaltzeit. Glaziale werden von Interglazialen (Warmzeiten) getrennt.

GPS

Abkürzung für Global Positioning System, ein satellitengestütztes und sehr exaktes Verfahren zur Positionsbestimmung. Von den GPS-Satelliten, deren Position immer bekannt ist, werden Funksignale ausgesendet. Ihre Laufzeiten werden von den Empfangsgeräten zur Entfernungsberechnung herangezogen. Für eine exakte Positionsbestimmung werden die Entfernungen zu mindestens drei Satelliten benötigt.

Graben

Ein Graben ist eine abgesunkene, lang gestreckte, keilförmige Scholle, dessen seitliche Begrenzungen zur Tiefe hin zusammenlaufen. Dadurch, dass die angrenzenden Gesteinsschollen ihre Lage behalten, entsteht eine deutliche Hohlform. Gräben werden an ihren Seiten durch Verwerfungen begrenzt.

Granit

Granit ist ein magmatisches Gestein. Es wird in der Tiefe in einem 1.000 bis 100.000 Jahre dauernden Erstarrungsprozess aus Magma gebildet und zählt daher zu den Plutoniten. Da die Kristalle des Granits während der Bildung ausreichend Zeit haben zu wachsen, ist der Granit grobkörnig. Granite bestehen aus Feldspat, Quarz und Glimmer. Kommtln der Erdkruste häufig vor.

Gravitation

Gravitation ist die wechselseitige Anziehung von zwei Körpern. Die Schwerkraft (Gravitation der Erde) beträgt ungefähr $9,8 \text{ m/s}^2$.

Grundwasser

Grundwasser ist in der Erde versickertes Wasser aus Niederschlägen oder Flüssen und Seen. Es sammelt sich oberhalb einer wasserundurchlässigen Schicht im Erdreich oder in Höhlen im Gestein und stellt ca. 70 % des Trinkwassers. Die Oberfläche des Grundwassers ist der Grundwasserspiegel.

Halbwertszeit

Im physikalischen Sinn der Zeitraum, in dem die Hälfte der Atomkerne eines Radionuklids durch spontanen radioaktiven Zerfall umgewandelt sind. Die Halbwertszeit kann je nach Element zwischen Sekundenbruchteilen und mehreren Mrd. Jahren liegen. Die Halbwertszeit bestimmter Isotope liegt auch der Altersbestimmung von Fossilien zugrunde.

Halbwüste

Als Halbwüste wird das Übergangsgebiet von Steppe zur Wüste bezeichnet. Halbwüsten zeichnen sich durch eine spärliche Vegetation (kleine Sträucher, Sukkulanten oder Gräser) und wenig Niederschlag aus.

Halligen

Als Halligen werden die nordfriesischen Inseln zwischen Föhr und Nordstrand bezeichnet, z. B. Langeneß, Oland, Grönende oder Hooge. Sie haben keinen Winterdeich und werden daher bei Hochwasser in der Regel überflutet, daher liegen

die Häuser auf künstlichen 4 bis 5 m erhöhten Erdhügeln.

Halone

Chemische Verbindungen, die sich von Methan und Ethan ableiten und ein Brom-Atom im Molekül besitzen. Halone gehören wie die FCKWs zu den die Ozonschicht zerstörenden Substanzen. Sie wurden vor ihrem Verbot in Feuerlöschern und Löschanlagen als Brandbekämpfungsmittel eingesetzt.

Hangabtragung

Die Hangabtragung fasst alle Prozesse der Erosion an Hängen zusammen. Sie beinhaltet sowohl die Ergebnisse von Massenbewegungen als auch die abtragende Tätigkeit von Wasser, Wind und Eis.

Hangrutschung

Siehe → Rutschung.

Harsch

Schneedecke, deren Oberfläche mehr oder weniger dick vereist ist. Harsch bildet sich durch kurzfristiges Antauen und erneutes Gefrieren der Schneoberfläche.

Hektar

Flächenmaß, das besonders für landwirtschaftliche Nutzflächen verwendet wird. Ein Hektar (1 ha) entspricht 10.000 m^2 .

Hintergrundstrahlung

Strahlung, die auf natürlichen Zerfallsprozessen beruht. Die Hintergrundstrahlung ist sowohl irdischen als auch kosmischen Ursprungs und macht den größten Teil der Strahlenbelastung unserer Umwelt aus. In einigen

Extremgebieten in Indien und Brasilien ist sie so hoch, dass die Menschen einer gesundheitsschädlichen Jahresbelastung ausgesetzt sind.

Hochgebirge

Umfassende Bezeichnung für hohe Gebirgstypen mit bestimmten Eigenschaften. In der Regel spricht man bei einem Gebirge von einem Hochgebirge, wenn es sich mehr als 1.500 m über der Umgebung erhebt, es ein Steilrelief mit Hangneigungen über 30 ° besitzt und Spuren von gegenwärtiger oder ehemaliger Vereisung zeigt.

Hochrisikovulkan

Vulkan, bei dem die Kombination von Schäden und ihrer geschätzten Auftretenswahrscheinlichkeit als besonders hoch einzustufen ist.

Holozän

Das Holozän umfasst die vor 10.000 Jahren beginnende und damit letzte geologische Epoche, in der wir uns auch heute noch befinden. Das auf die so genannte „Eiszeit“ (Pleistozän) folgende Holozän ist durch eine zunehmende Klimaerwärmung, den endgültigen Rückzug der Inlandeismassen und eine Wiederbesiedlung vorher eisbedeckter Gebiete durch Pflanzen gekennzeichnet.

Horst

Ein Horst ist ein herausgepresstes oder herausgehobenes Gesteinspaket, das an seinen Seiten durch Verwerfungen begrenzt wird. Die seitlichen Begrenzungen laufen zur Tiefe auseinander.

Hot Spot

Hot Spots („heiße Flecken“) sind

aufgeschmolzene Bereiche des oberen Erdmantels, die sich an der Erdoberfläche durch Vulkanismus bemerkbar machen. Sie werden von Manteldiapiren, heißen Magmenaufstiegskanälen, gespeist. Da sich über einem Hot Spot, der seine Position über Millionen von Jahren nicht verändert, die Lithosphärenplatten hinweg bewegen, bildet er im Laufe der Zeit eine ganze Kette von Vulkanen.

Humidität

Meteorologischer Fachbegriff, der das Verhältnis von Verdunstung und Niederschlag beschreibt. Humidität liegt vor, wenn im jährlichen Mittel die Menge der gefallenen Niederschläge höher ist als die Verdunstung. Unter diesen Bedingungen fließen überschüssige Wassermengen oberflächlich als Flüsse ab.

Hurrikan

Bezeichnung für einen tropischen Wirbelsturm, der sich meistens über der Karibik, dem Golf von Mexiko oder dem tropischen Nordatlantik bildet und bis in den Südwesten der USA schwere Verwüstungen anrichtet. Die Windstärken eines Hurrikans liegen mit 120 bis über 250 km/h immer über denen eines Orkans der Windstärke 12 (Beaufort-Skala). Die Stärke eines Hurrikans wird mit der Saffir-Simpson-Skala angegeben.

Hydrologie

Die Lehre vom Wasser. Die Hydrologie befasst sich mit dem Vorkommen von Wasser, seinen Erscheinungsformen, Eigenschaften, dem Wasserhaushalt und den im Wasser transportierten Materialien und darin lebenden Organismen.

Hydrosphäre

Die Wasserhülle der Erde, bestehend aus den Ozeanen, Nebenmeeren, Seen, Flüssen, Grundwasser, Eis und Schnee.

Hypozentrum

Das Hypozentrum ist der Entstehungsort eines Erdbebens, der auch als Erdbebenherd bezeichnet wird.

IDNDR

International Decade for Natural Disaster Reduction. Von den Vereinten Nationen wurde der Zeitraum von 1990 bis 1999 zur „Internationalen Dekade zur Vorbeugung von Naturkatastrophen“ ausgerufen. Zusammen mit Wissenschaftlern und Hilfsorganisationen sollten auf nationaler und internationaler Ebene Verbesserungen in der Katastrophenvorsorge verwirklicht werden. Als ein Ergebnis wurden auf globaler, nationaler, regionaler und lokaler Ebene Pläne zur Katastrophenvorbeugung einschließlich umfangreicher Warnsysteme entwickelt und umgesetzt.

Impakt

Ein Impakt ist der Einschlag eines Meteoriten auf der Erde. Dabei werden typische, oft vulkanähnliche Strukturen (Krater) erzeugt, so genannte Impaktstrukturen wie z. B. das Nördlinger Ries.

Industrielle Revolution

Der in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts durch den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt bewirkte Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft. Die industrielle Revolution nahm von England ihren Ausgang. Voraussetzungen waren

dort u. a. die Erfindung der Dampfmaschine, die Verfügbarkeit von Erz und Kohle und die Macht über Kolonien.

Infrarotstrahlung

Auch als Wärmestrahlung bezeichnete, langwellige elektromagnetische Strahlung. Die Wellenlängen infraroter Strahlen sind größer als die des gerade noch sichtbaren roten Lichts. Sie geht von jedem warmen Körper aus und kann wiederum selbst Materie erwärmen. Die einfallende Sonnenstrahlung wird von der Erdoberfläche absorbiert und als Infrarot- oder Wärmestrahlung wieder abgegeben.

Infrastruktur

Ausstattung eines Gebietes mit Einrichtungen, die zur Ausübung der menschlichen Grunddaseinsfunktionen (arbeiten, wohnen, sich versorgen, sich erholen, sich bilden, in Gemeinschaft leben) notwendig sind. Da für die Ausübung der Grunddaseinsfunktionen Verkehr und Kommunikation notwendige Voraussetzungen sind, gehören Verkehrsmittel, Verkehrswege und Kommunikationsmittel zu den sehr wichtigen Infrastruktureinrichtungen.

Ingression

Ingression bedeutet das Vorrücken des Meeres in flache Ufer-Becken durch Anhebung des Meeresspiegels oder Absinken des Festlandes. Es entstehen die so genannten Ingressionsmeere. Das Zurückweichen eines Meeres ist die Regression.

Inlandeis

Inlandeis ist eine großflächige, schildförmige Vereisung einer Landmasse.

Dieser Gletschertyp überdeckt das unter ihm liegende Gebiet fast völlig, wie z. B. in Grönland und Antarktika. Nur einzelne Gipfel (Nunatakker) schauen aus den Eismassen heraus. Weitere Gletschertypen: Talgletscher, Plateaugletscher und Eisschilde.

Inselbogen

Ein Inselbogen ist eine Kette von Vulkaninseln, die meist am Rand von Tiefseegräben liegen. Inselbögen entstehen an konvergierenden Plattengrenzen, wenn untergetauchte Platten aufschmelzen und Magma aufsteigt (Gebirgsbildung des Inselbogen-Typs).

Insolation

Insolation ist die direkte Sonnenbestrahlung der Erdoberfläche.

Interglazial

Als Interglazial werden die zwischen zwei Kaltzeiten (Glazialen) auftretenden wärmeren Perioden bezeichnet, in der ein Teil der Gletscher schmilzt und sich wärmeliebende Pflanzengesellschaften (z. B. Wälder) wieder ansiedeln.

IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change. Ein auf gemeinsame Anstrengung des UN-Umweltprogramms (UNEP) und der World Meteorological Organization (WMO) ins Leben gerufener Sachverständigenrat. Seine Aufgabe ist es, vorhandene wissenschaftliche, technische und sozio-ökonomische Informationen zum Verständnis des Risikos einer vom Menschen verursachten Klimaerwärmung zusammenzutragen und auszuwerten.

Intraplattenbereich

Bereich innerhalb großer Kontinentalplatten.

Intrusionen

Intrusionen entstehen durch das Eindringen von Magma in die feste Erdkruste.

Iridiumwert

Iridium ist ein Metall der Platingruppe, das in metallischen Meteoriten und Asteroiden sehr häufig vorkommt. Es ist in der Erdkruste sehr selten, da es bei der Erdentstehung zusammen mit Eisen in Richtung des Erdkernes abgesunken ist. In Gesteinsschichten an der Grenze von Kreide zu Tertiär (weltweit an über 100 Orten) wurden erhöhte Konzentrationen dieses Metalls festgestellt. Sie werden mit einem Meteoriteneinschlag vor 65 Mio. Jahren in Verbindung gebracht.

Isotop

Verschiedene Atomarten eines chemischen Elements. Sie unterscheiden sich in der Anzahl von Neutronen im Atomkern und haben dadurch auch ein unterschiedliches Atomgewicht. Der Zerfall des radioaktiven Kohlenstoffisotops C14 in das „normale“ Isotop C12 ist die Grundlage der Altersbestimmung mittels der Radiokarbonmethode.

Jahresniederschlag

Summe des innerhalb eines Jahres an einer Messstation gefallenen Niederschlags. In der Regel wird der Mittelwert einer längeren Beobachtungsperiode angegeben.

Kältewüsten

Kältewüsten umfassen die arktischen

und antarktischen Lebensräumen, die sich an die Tundra anschließen. Sie sind gekennzeichnet durch eine fehlende oder spärliche Vegetation. Die Verbreitung von Tieren ist vorwiegend auf die Küsten beschränkt.

Kaltfront

Vordere Grenze kalter Luftmassen und Rückseite des Warmluftsektors beim Durchzug einer Zyklone. Der Durchzug einer Kaltfront kann mit heftigen Gewittern verbunden sein. Engt die schneller vorrückende Kaltfront den Warmluftsektor bis zum Zusammenschluss mit der Warmfront ein, spricht man von einer Okklusion.

Kaltzeit

Kaltzeiten sind geologische Zeitschnitte, in denen die Temperaturen so weit absinken, dass sich Gletscher und Inlandeismassen bilden. Es gab mindestens vier bedeutende Eiszeiten (vor über 570, vor 440, vor 280 und vor 2,5 Mio. Jahren). Der Begriff Eiszeit wird oft sinngleich mit Kaltzeit verwendet. Da nicht immer eine Zeit mit niedrigen Temperaturen zwangsläufig mit Gletscherbildungen verbunden ist und es auch kalte, aber eisfreie Gebiete gibt, sollte statt „Eiszeiten“ der Begriff Kaltzeit verwendet werden.

Katastrophenmanagement

Zusammenfassender Begriff für alle Maßnahmen der Katastrophenvor- und -nachsorge. Effektives Katastrophenmanagement zielt auf Verhinderung von Naturkatastrophen, Schadensminimierung und Bewältigung der Folgen ab. Wichtiger Bestandteil sind Frühwarnsysteme und ausgearbeitete Katastrophenpläne für

Entscheidungsträger und die Bevölkerung.

Katastrophenvorbeugung

Einsatz technischer und nicht-technischer Maßnahmen zur Verminde rung des Risikos.

Klima

Das Klima ist der über einen längeren Zeitraum beobachtete mittlere Zustand der meteorologischen Erscheinungen. Das Klima eines Ortes wird durch Klimafaktoren (z. B. Breitenkreislage), Klimaelemente (z. B. Wind), kosmische Einflüsse sowie deren Wechselwirkungen beeinflusst.

Klimaelement

Klimaelemente sind die messbaren Erscheinungen, die in ihrer Gesamtheit das Klima bestimmen. Wichtige Klimaelemente: Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Wind, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Strahlung und Bewölkung.

Klimaerwärmung

Seit Ende des 19. Jahrhundert haben sich die globalen Temperaturen um etwa 0,3 bis 0,6 °C erhöht. Bei dieser globalen Temperaturerhöhung handelt es sich um eine Klimaschwankung. Von einer Klimaänderung spricht man erst ab einer Temperaturveränderung von 5 °C. Klimaschwankungen sind natürliche Prozesse, die Mitverantwortung des Menschen an der aktuellen Klimaerwärmung ist aber wissenschaftlich erwiesen.

Klimafaktoren

Klimafaktoren sind diejenigen Eigen schaften von Räumen, die in der Lage sind, das Klima zu beeinflussen.

Klimaformel

Klimaformeln beschreiben die klimatischen Verhältnisse einer Klimazone anhand von einfachen Buchstaben- und Zahlenkombinationen. Eine Klimaformel wird z. B. zusammengesetzt aus einer Kennung für die Klimazone (Tropen), die Klimaregion (Warmtropen) und den Wasserhaushalt (humid). In diesem Fall lautet die Formel Allh (nach Klassifikation von Lauer und Frankenberg).

Klimageomorphologie

Als Teilgebiet der Geomorphologie wird in der Klimageomorphologie versucht, die Entstehung von Landschaftsformen in Abhängigkeit vom Klima zu erklären. Ein Beispiel für den Zusammenhang zwischen Klima und formgebenden Prozessen ist die Verwitterung. In der Klimazone der Tropen herrscht aufgrund hoher Niederschläge und Temperaturen die chemische Verwitterung vor. In der polaren Zone ist sie dagegen aufgrund niedriger Temperaturen sehr gering.

Klimaschwankungen

Siehe → Klimaerwärmung.

Klimatische Schneegrenze

Untere Grenze der ganzjährig vom Schnee bedeckten Flächen in Gebirgen.

Klimazonen

Klimagürtel. Großräumige Gebiete auf der Erde, die ein ähnliches Klima aufweisen. Die theoretisch breitengradparallele Anordnung ist in der Realität wegen Inhomogenitäten der Erdoberfläche (Land-Meer-Verteilung, Gebirgskörper etc.) nicht streng verwirklicht.

Klinometer

Neigungsmesser zur Angabe der Hangneigung in Grad. Angegeben wird der Winkel zwischen der geneigten Fläche und der Horizontalen.

Kluft

Eine Kluft ist ein kaum geöffneter Riss, der Gesteine und Schichtungen durchsetzt. Klüfte entstehen durch Spannungen im Gestein infolge tektonischer oder physikalischer Zustandsänderungen.

Kohlendioxid

Geruchloses und ungiftiges Gas, das in geringen Mengen Bestandteil der atmosphärischen Luft ist. Kohlendioxid (chemisch korrekt: Kohlenstoffdioxid) entsteht bei Verbrennungsprozessen bzw. der Atmung und wird in der pflanzlichen Fotosynthese zum Aufbau von Kohlenhydraten verwendet. Der Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre seit der Industrialisierung gilt als ein Grund für die globale Klimaerwärmung durch den Treibhaus-Effekt.

Kohlendioxid-Senken

Pflanzen nehmen bei der Fotosynthese Kohlendioxid auf und fixieren es unter Abgabe von Sauerstoff in der Glucose (Traubenzucker). Wälder nehmen große Mengen an Kohlendioxid auf und werden daher auch als Kohlendioxid-Senken bezeichnet.

Kontinent

Ein Kontinent ist eine große zusammenhängende Landmasse. Im Allgemeinen werden Eurasien, Afrika, Amerika, Australien und die Antarktis als Kontinente bezeichnet.

Kontinent-Kontinent-Kollision

Kontinent-Kontinent-Kollisionen sind die Folge von konvergierenden (sich aufeinander zu bewegenden) kontinentalen Krustenbestandteilen. Da die kontinentalen Krusten (Lithosphärenplatten) die gleiche Dichte haben, stapeln sie sich bei einer Kollision übereinander. Dabei kommt es zu komplizierten tektonischen Prozessen mit Überschiebungen und Faltungen. Die Bildung der Alpen oder des Himalaya geht auf diesen Kollisionstyp zurück.

Kontinentale Kruste

Die kontinentale Kruste ist der Bestandteil der Erdkruste, der die Kontinente darstellt. Die kontinentale Kruste ist viel dicker als die ozeanische Kruste und auch leichter als diese. Die Dichte der kontinentalen Kruste beträgt 2,7 bis 2,8 g/cm³ (ozeanische K. 3,0 bis 3,1 g/cm³). Unter Hochgebirgen kann die kontinentale Kruste bis zu 60 km mächtig sein.

Kontinentalhang

Der Kontinentalhang ist der Übergang von den flachen Schelfbereichen (bis 200 m Wassertiefe) zu den Tiefseeböden (ab 2.400 m Wassertiefe). 6 % der Erdoberfläche werden von Kontinentalhängen eingenommen.

Kontinentalität

Einwirkungen auf das Klima bzw. Klimaeigenschaften, die sich aus der Lage auf dem Festland bzw. aus der Entfernung zum Meer ergeben. Man unterscheidet thermische Kontinentalität in Form großer Temperaturschwankungen zwischen Sommer und Winter bzw. Tag und Nacht sowie hygrische Kontinentalität mit der Abnahme der Niederschlagsmengen

im Inland. Gegenteil der Kontinentalität ist die Maritimität.

Kontinentalplatten

Siehe → Lithosphärenplatten.

Kontinentalschelf

Das Kontinentalschelf (kurz: Schelf) umfasst als relativ ebene Großform die flachen Meeresbereiche mit Wassertiefen bis maximal 200 m. An das Schelf schließt sich der Kontinentalhang an, der zu den Tiefseeböden überleitet.

Kontinentalverschiebung

Die Kontinentalverschiebung ist eine 1912 von Alfred Wegener aufgestellte Theorie, die von einer horizontalen Verdriftung der Kontinente ausgeht. Dabei wird angenommen, dass die gesamte Festlandmasse einmal in einem Urkontinent (Pangaea) vereint gewesen ist. Gleiche geologische und paläontologische Merkmale der Ost- und Westküsten des Atlantiks beweisen, dass eine Verschiebung der Kontinente stattgefunden haben muss. Die Kontinentalverschiebung wird mit der Theorie der Plattentektonik erklärt.

Konturpflügen

Hangparalleles Pflügen von Ackerflächen in hügeligem Gelände. Maßnahme zur Verhinderung der Bodenerosion.

Konvektionsströmung

Im Allgemeinen versteht man unter einer Konvektionsströmung die aufsteigende Bewegung eines Stoffes in plastischen Massen, Flüssigkeiten und Gasen. In den Geowissenschaften stellen die Konvektionsströmungen

Magmenbewegungen im zähplastischen Bereich der Asthenosphäre dar. Sie gehen auf Wärmeströme aus dem Inneren der Erde zurück und sind verantwortlich für Erdkrustenbewegung. Dabei werden Kontinentalplatten von dem strömenden Magma mitgeschleppt. Nicht nur im Erdmantel, sondern auch im äußeren Erdkern gibt es Konvektionsströmungen von geschmolzenem Material. Im Erdkern wird durch diese Bewegungen der Erdmagnetismus aufrechterhalten.

Konvergierende Plattengrenze

Übergangszone zwischen zwei Kontinentalplatten, die sich aufeinander zu bewegen. Es gibt zwei Typen konvergierender Plattengrenzen: 1. Kontinent-Kontinent-Kollisionen, an denen zwei Platten aus kontinentaler Kruste kollidieren. 2. Subduktionszonen, an denen eine ozeanische Platte unter eine andere Platte aus ozeanischer oder kontinentaler Kruste abtaucht.

Kriechlawine

Langsame Schneelawine, deren Bewegung kaum sichtbar ist. Kriechlawinen haben dennoch eine hohe Zerstörungskraft und können Bäume umreißen oder schlecht gebaute Häuser von ihren Fundamenten drücken.

Kruste

Siehe → Erdkruste.

Kryosphäre

Die Kryosphäre ist der Bereich der Erdoberfläche, in dem durchschnittliche Temperaturen herrschen, die den Gefrierpunkt von Wasser unterschreiten.

Kulturlandschaft

Kulturlandschaften sind vom Menschen beeinflusste Landschaften. Durch die agrarische oder wirtschaftliche Nutzung, die Besiedelung und die Erschließung der Landschaft werden Naturlandschaften zu Kulturlandschaften umgewandelt.

Kurzwellige Strahlung

Im klimatologischen Sinne Strahlen, deren Wellenlängen kleiner als 4 µm sind. Zur kurzweligen Strahlung gehören die von der Sonne auf die Erde treffenden Licht- und UV-Strahlen sowie die Gamma- und Röntgenstrahlen. Strahlen mit einer Wellenlänge größer als 4 µm sind langwellig.

Küste

Die Küste ist der Grenzraum zwischen dem Festland und dem Meer. Nach ihrem Erscheinungsbild werden sie in Steil- und Flachküsten gegliedert. Gezeitenabhängige Küstenformen sind die Wattküste im gemäßigten und die Mangroveküste im tropischen Klima. Während der letzten Kaltzeiten, die vor etwa 10.000 Jahren zu Ende gingen, bildeten sich durch die Wirkung von Gletschern die Fjord-, Schären-, Fördern- und Buchten- sowie die Boddenküste.

La Niña

Kalte Phase der ENSO und das Gegenstück zu El Niño. Vor der Küste Südamerikas und entlang des Äquators sind die Wassertemperaturen des Pazifiks niedriger als normal. Dies hat eine erhöhte Trockenheit in den Küstenregionen Südamerikas zur Folge. In Südostasien und Ostaustralien treten dagegen überdurchschnittlich hohe Niederschläge auf.

Lachgas

Andere Bezeichnung für Distickstoff-oxid. Lachgas entsteht durch Verbrennungsprozesse oder in der Landwirtschaft durch die Aktivität von Bodenbakterien in überdüngten Böden. Es ist ein wichtiges Treibhausgas, das zur globalen Klimaerwärmung beiträgt.

Lagerstätten

Lagerstätten sind eine natürliche Ansammlung von wirtschaftlich nutzbaren und abbauwürdigen Mineralen, Gesteinen, Erdöl, Erdgas oder andere Substanzen. Kleinere Lagerstätten, die aufgrund ihrer geringen Größe nicht abgebaut werden, sind Vorkommen.

Lahar

Schlamm- oder Schuttstrom aus wassergesättigtem vulkanischem Material (Pyroklastika) nach einer Eruption. Sie bilden sich, wenn vulkanische Förderprodukte auf einen Fluss oder ein Schneefeld bzw. einen Gletscher treffen. Lahare zählen zu den gefährlichsten vulkanischen Ereignissen, da sie häufig zahlreiche Opfer fordern.

Landsat

Satellitenprogramm der NASA. Zurzeit ist als jüngster der Satellit Landsat 7 in der Erdumlaufbahn. Die Satelliten übermitteln hochauflösende Bilder der Erdoberfläche und der Wolken schichten, die u. a. Grundlage für die Katastrophenvorsorge sind.

Langwellige Strahlung

Im klimatologischen Sinne Strahlen, deren Wellenlängen größer als 4 µm sind. Zur langwiegigen Strahlung gehören von der Erde zurückgestrahlte Infrarot- oder Wärmestrahlen

sowie die Mikro- und Radiowellen. Strahlen mit einer Wellenlänge kleiner als 4 µm sind kurzwellig.

Lava

Lava ist glutflüssige Gesteinsschmelze (Magma), die bei Vulkanausbrüchen aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche tritt. Temperaturen bis 1.300 °C und Lava-Fontänen mit mehreren 100 m Höhe sind möglich. Lava enthält im Gegensatz zu Magma kaum noch Gasanteile, da diese bei der Eruption eines Vulkans entweichen. Man unterscheidet saure und basische Lava. Saure Lava besitzt einen höheren Gehalt an Siliziumdioxid (SiO_2), ist daher zähflüssiger und fließt langsamer als basische Lava. Basische Lava kann Fließgeschwindigkeiten von mehrere m/s erreichen.

Lavadom

Siehe → Staukuppe.

Lawine

Lawinen sind Schnee- und Eisabgänge an Hängen. Lockerschneelawinen mit trockenem Schnee werden den Festschneelawinen (nasser Schnee) gegenübergestellt.

Lawinengalerie

Bauwerk als Lawinenschutz für besonders gefährdete Verkehrswegabschnitte.

Leeseite

Die Leeseite ist die dem Wind abgekehrte Seite. Die Luvseite ist die dem Wind zugeneigte Seite.

Lineareruption

Eine Lineareruption ist eine vulkanische Ausbruchstätigkeit, bei der sich

die Austrittsstellen von Lava auf einer Linie befinden (Spalteneruption). Die austretende Lava ist sehr dünnflüssig und verteilt sich sehr schnell auf der Fläche.

Lithosphäre

Die Lithosphäre umfasst die gesamte Erdkruste und die obersten Mantelbereiche. Sie hat eine ungefähre Mächtigkeit von 100 km. Unterhalb der starren Lithosphäre liegt zähplastisches Mantelmaterial, auf dem sich die Lithosphärenplatten langsam bewegen können. Die gesamte Erdoberfläche ist in zwölf große Platten zerbrochen. Die Dichte, Grenzen und Bewegungsrichtungen der einzelnen Platten bestimmen plattentektonische Vorgänge, wie Erdbeben, Gebirgsbildungen und Vulkanismus.

Lithosphärenplatten

Die Lithosphärenplatten nehmen die gesamte Erdoberfläche ein. Sie umfassen die Erdkruste und Teile des oberen Mantels mit einer Mächtigkeit von bis zu 100 km. Da die Lithosphäre in zwölf große Platten zerbrochen ist und unterhalb der Lithosphäre der Erdmantel teilweise aufgeschmolzen ist, bewegen sich die Platten langsam. Dichte, Grenzen und Bewegungsrichtungen der einzelnen Platten bestimmen plattentektonische Vorgänge, wie Erdbeben, Gebirgsbildungen und Vulkanismus. Beispiele für Lithosphärenplatten sind: Pazifische, Nordamerikanische, Eurasische, Südamerikanische Platte.

Lockergestein

Lockergesteine sind noch nicht verfestigte (unkonsolidierte) Sedimente oder verwitterte Festgesteine. Locker-

gesteine werden den Festgesteinen gegenübergestellt. Zu den Festgesteinen zählen die Magmatite, Metamorphe und Sedimentgesteine.

Lockerschneelawine

Lawine aus wenig verfestigtem Schnee mit punktförmigem Abriss. Lockerschneelawinen entstehen vor allem aus trockenem kaltem Neuschnee.

Lockersediment

Locker gelagerte, unverfestigte Sedimente.

Longitudinalwellen

Siehe → Primärwellen.

Love-Wellen

Erdbebenwellen mit hoher Zerstörungskraft. Love-Wellen verformen das Gestein in horizontaler Richtung. Durch ihre oft großen Amplituden gehören diese seitlichen Schwingungen des Bodens zu den zerstörerischsten Wellen eines Bebens, die besonders an Gebäuden enorme Schäden anrichten. Im Gegensatz zu den Primär- und Sekundärwellen setzen sich Love-Wellen nur an der Oberfläche fort.

Luftdruck

Gewicht der atmosphärischen Luftsäule, die auf der Erdoberfläche lastet. Der Luftdruck wird in Hektopascal (hPa) angegeben, die Einheit mbar ist veraltet. Der standardisierte Normalluftdruck beträgt 1.013 hPa.

Luvseite

Die Luvseite ist die dem Wind zugeneigte Seite. Die Leeseite ist die dem Wind abgekehrte Seite.

Mäander

Mäander sind Fluss-Schlingen mit charakteristisch geformten Ufern, den Prall- und Gleithängen. Die Pendelbewegung von Flüssen liegt im strömenden Wasser begründet. Sobald sich der Stromstrich, der Bereich der größten Fließgeschwindigkeit, zu einem Ufer hin verlagert, beginnt eine Abtragung am Außenufer – es entsteht ein Prallhang mit meist steiler Böschung. Dies wiederum beeinflusst die weitere Strömungsrichtung des Flusses. Die Pendelbewegung beginnt. Gegenüber dem Prallhang liegt der Gleithang, an dem die Strömungsgeschwindigkeiten niedriger sind und daher Sedimentation stattfindet. Der Gleithang ist durch ein flaches, meist sandiges Ufer gekennzeichnet. Durch die ständige Abtragung an den Prallhängen nähern sich diese immer weiter an. Mit der Zeit kann ein Mäanderbogen vom Fluss durchbrochen werden. Es entsteht ein nur noch selten durchflossener Altarm.

Maar

Ein Maar ist eine rundliche, kraterähnliche Hohlform, die durch explosive Vulkanismus entstanden ist. Für das Entstehen von Maaren ist das Zusammentreffen von Magma und Wasser in der Tiefe verantwortlich, da dies enorme Explosionen auslöst. Das anstehende Gestein wird bei der Explosion zerbrochen und zu einem flachen Wall angehäuft. In der Hohlform kann sich Wasser sammeln und es entsteht ein See.

Magma

Magma ist glutflüssige Gesteins schmelze. Kühlt sich Magma ab, entstehen Erstarrungs- oder magma-

tische Gesteine. Je nach chemischer Struktur und Abkühlungsgeschwindigkeit des Magmas bilden sich dann unterschiedliche Gesteine (z. B. Basalt, Granit, Trachyt). Dringt Magma bis an die Erdoberfläche, spricht man von Lava.

Magmenkammer

Magmenkammern (auch Vulkanherde) liegen innerhalb der Erdkruste und speisen mit ihrem aufgeschmolzenem Gesteinsmaterial die Vulkane. Unter den mittelozeanischen Rücken liegen die Magmenkammern in Tiefen zwischen 3 und 6 km. Dort sind es die „Quellen“ für die an die Meeresböden aufsteigenden basaltischen Schmelzen.

Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine, auch Magmatite oder Erstarrungsgesteine genannt, sind der Oberbegriff für alle Gesteine, die aus abgekühltem Magma entstanden sind. Je nach Ort der Abkühlung unterscheidet man Plutonite (Tiefengesteine), die in der Erdkruste abkühlen, und Vulkanite, die an der Erdoberfläche erstarren. Magmatite werden nach ihren mineralischen Bestandteilen klassifiziert. Dabei muss der Volumenprozentanteil von Quarz, Feldspäten und anderen Mineralen bestimmt werden. Im so genannten Streckeisendiagramm erfolgt darauf die Bestimmung anhand der Mineralverteilung im Gestein. Dem Plutonit Granit steht bei gleicher mineralischer Zusammensetzung der Rhyolith als Vulkanit gegenüber, dem Gabbro (Plutonit) der Basalt (Vulkanit). Je höher der Kieselsäuregehalt (SiO_2) magmatischer Gesteine ist, desto heller sind sie (z. B. Granit).

Dunkle Magmatite (basische) haben einen geringeren Kieselsäuregehalt (z. B. Peridotit).

Magmatismus

Unter Magmatismus werden alle geologischen Vorgänge verstanden, die im Zusammenhang mit der Entstehung und dem Aufdringen von Magma stehen.

Magmenintrusionen

Dringt Magma oder fließfähiges Material in andere Gesteinsverbände ein, spricht man von Intrusionen.

Magnetfeldmessung

Methode zur Vorhersage von Vulkanausbrüchen. Magmenbewegungen im Inneren eines Vulkans verursachen leichte Hebungen oder Senkungen der Oberfläche. Dabei verändert sich das Magnetfeld und die Bewegungen der Oberfläche werden von Magnetometern erfasst. Zusammen mit anderen Messmethoden (z. B. Deformationsmessung oder Gasmessung) können Anzeichen einer Eruption rechtzeitig erkannt und Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

Magnetometer

Messinstrument zur Bestimmung magnetischer Felder. Magnetometer werden in der Seismologie zur Überwachung erdbebengefährdeter Störungszonen eingesetzt. Schwankungen im Magnetfeld können Hinweise auf steigende Aktivität oder Spannung im Untergrund geben.

Magnitude

Die Stärke eines Erdbebens. Sie wird aus dem maximalen Ausschlag eines Seismographen, der Amplitude und

dem Zeitintervall zwischen Eintreffen der Primär- und Sekundärwellen berechnet. Die Werte werden in Magnituden-Skalen, z. B. der Richter-Skala, angegeben. Die Angabe der Intensität eines Erdbebens orientiert sich dagegen an den sichtbaren Auswirkungen.

Magnituden-Skala

Skalen, mit denen die Stärke oder Magnitude eines Erdbebens angegeben wird. Die bekannteste Magnituden-Skala ist die Richter-Skala.

Mangroveküste

Die Mangroveküste ist eine tropische Gezeiten- oder Wattküste, deren Vegetation (Mangrove) die Küste besonders durch das Festhalten von Schwebstoffen prägt. Die bis zu 10 m hohen Mangrovewälder mit ihren ausgedehnten Stelzwurzelsystemen sind nicht die Hauptursache für die Bildung der Wattgebiete, beschleunigen aber den Landzuwachs.

Marin

Marin bedeutet „zum Meer gehörend“, „im Meer gebildet“ oder „im Meer lebend“. Marine Sedimente sind z. B. in den Meeren abgelagerte Sedimente.

Maritimität

Maritimität bezeichnet relativ ausgewogene Klimaverhältnisse, meist in Bezug auf Temperaturschwankungen. Durch die gute Speicherfähigkeit für Wärme und die langsame Erwärmung bzw. Abkühlung der Ozeane beeinflussen diese das Klima angrenzender Landmassen. Es kommt zu einer ausgleichenden Wirkung auf die Temperatur. Meist sind sowohl die Windgeschwindigkeiten als auch die

Niederschlagsmengen höher als im Inland.

Massenbewegung

Sammelbegriff für die hangabwärts gerichtete Bewegung von Gesteinen oder Bodenmaterial. Je nach Art der Bewegung, ihrer Geschwindigkeit und dem Ausgangsmaterial werden unterschiedliche Arten von Massenbewegungen unterschieden, z. B. Bergrutsch, Bergsturz, Schuttlawine oder Schuttrutschung.

Massengestein

Siehe → magmatische Gesteine.

Meeresspiegelanstieg

Durch globale Klimaerwärmung verursachtes Ansteigen des Meeresspiegels. Aktuelle Szenarien des IPCC gehen von einem Anstieg zwischen 20 und 86 cm bis zum Jahr 2100 aus, wenn der Ausstoß an Treibhausgasen auf dem heutigen Stand stagniert. Die wesentliche Ursache für den Anstieg liegt in der Wärmeausdehnung des Wassers, das Abschmelzen des Eises über polaren Festlandmassen ist ein großer Unsicherheitsfaktor in den Prognosen.

Megacity

Ungenaue Bezeichnung für Riesenstädte mit großer Ausdehnung und hoher Einwohnerzahl (über 8 Mio. Einwohner). Besonders Entwicklungsländer sind von einer zunehmenden Verstädterung und einem unkontrollierten Wachstum ihrer Städte betroffen. Beispiele für Megacities sind Mexiko-Stadt, Delhi, Kairo und Tokyo.

Mercalli-Skala

Zwölfstufige Skala zur Angabe der

Intensität eines Erdbebens. Sie wurde 1902 von Giuseppe Mercalli entwickelt und später modifiziert. Die Skala basiert auf den Auswirkungen der Erschütterungen, wie z. B. Schäden an Bauwerken, Veränderungen der Landoberfläche und auf subjektiven Berichten von Beobachtern. Jedem Beben kann dadurch auch ohne Messinstrumente eine Intensität zugewiesen werden. Im Gegensatz dazu steht die Magnitude eines Bebens (z. B. Richter-Skala), die auf physikalisch messbaren Parametern beruht.

Meridian

Der Meridian verbindet im Gradnetz der Erde die geographischen Pole miteinander.

Meteorit

Meteoriten sind Himmelskörper, die die Erdatmosphäre durchdringen und bis zur Erdoberfläche gelangen. Sie sind im Gegensatz zu Kometen, die aus Stäuben und Eis bestehen, aus Gesteinen oder Eisen aufgebaut.

Meteorologie

Wissenschaft von den physikalischen Vorgängen in der Erdatmosphäre. Die Meteorologie befasst sich im Wesentlichen mit den Ursachen und Eigenschaften des Wettergeschehens und seinen Wechselwirkungen auf der Erde. Im Gegensatz zur Klimatologie stehen dabei kurzfristigere Betrachtungszeiträume im Vordergrund.

Methan

Gasförmiger und brennbarer Kohlenwasserstoff (CH_4). Methan wird zu den Treibhausgasen gerechnet, sein Treibhauspotenzial ist 32-fach höher als das von Kohlendioxid. Eine der wich-

tigsten Quellen ist die Nahrungsproduktion, da ein einzelnes Rind bis zu 300 l Methan pro Tag abgeben kann. Methan wird aber auch bei Brandrodungen und von Mülldeponien sowie schadhaften Erdgasleitungen freigesetzt.

Metropole

Stadt, die den Mittelpunkt des politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Lebens eines Landes darstellt. Metropolen sind in der Regel die Hauptstädte von weniger entwickelten Ländern (Kairo, Mexiko-Stadt) oder zentralistisch regierter Staaten (Paris), die alle anderen Städte des Landes weit an Bedeutung überragen.

Mexico-City-Effekt

Verstärkungseffekt bei Erdbeben. Benannt nach dem schweren Erdbeben von Mexico City im Jahre 1985. Obwohl der Erdbebenherd etwa 300 km entfernt lag, traten in der Stadt enorme Schäden auf. Besonders betroffen waren acht 15-stöckige Hochhäuser. Der Effekt entsteht beim Zusammentreffen energiereicher, langwelliger Erdbebenwellen mit einem „weichem“ Untergrund. Die zerstörerischen Schwingungen werden durch eine so genannte Resonanzkopplung von Bebenwellen, Untergrund und Gebäuden ausgelöst.

Mikrobeben

Erdbeben, die lediglich von Messinstrumenten registriert werden, aber auf der Erdoberfläche kaum spürbar sind.

Milankovitch-Zyklus

Der serbische Mathematiker Milankovitch berechnete 1930 Abweichungen

der Erdbahn und Veränderungen der Erdneigung (Obliquität). Drei Prozesse, die Exzentrizität, die Präzession und Obliquität finden demzufolge in einem bestimmten Rhythmus statt. Die Veränderungen führen zu Schwankungen der empfangenen Sonnenstrahlung auf der Erde und sind damit ein Teilprozess der Entstehung von Vereisungen.

Mineral

Minerale sind anorganische, natürlich gebildete Festkörper der Erdkruste. Sie besitzen eine spezielle chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur.

Mineralogie

Mineralogie ist die Lehre von den Mineralien. Diese Wissenschaft untersucht die Entstehung, Strukturen, Formen und die Zusammensetzung von Mineralien.

Mittellauf

Mittlerer Abschnitt eines Fließgewässers. Große Fließgewässer werden sehr grob in Ober-, Mittel- und Unterlauf eingeteilt. Der Mittellauf eines mittel-europäischen Flusses zeichnet sich durch eine mäßige Fließgeschwindigkeit, mittleren Sauerstoffgehalt, Temperaturen zwischen ungefähr 10 bis 18 °C und sandig-kiesigen Untergrund aus.

Mittelozeanischer Rücken

Ein mittelozeanischer Rücken ist eine großräumige, lang gestreckte Struktur am Meeresboden. Die Gesamtlänge kann zwischen 200 und 20.000 km betragen. Mittelozeanische Rücken findet man an divergierenden Plattengrenzen, an denen zwei Platten

auseinander driften, da hier ständig neue ozeanische Kruste gebildet wird (Seafloor-Spreading, Plattentektonik).

MM-Skala

Siehe → Mercalli-Skala.

Mofetten

Als Mofette bezeichnet man die Kohlendioxid-Aushauchung eines Vulkans. Mofetten findet man in altvulkanischen Gebieten (z. B. Eifel). Das austretende Kohlendioxid kann sich auch mit Wasser verbinden und an einer Quelle als Säuerling austreten.

Monokultur

Nutzung großer Flächen durch den Anbau nur einer Kulturpflanze über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Monokulturen entziehen dem Boden einseitig Nährstoffe und sind anfällig gegenüber Schädlingen. Sie sind zwar kostengünstiger zu bewirtschaften, müssen aber regelmäßig gedüngt und mit Pestiziden gespritzt werden.

Monsun

Windsystem in Süd- und Südostasien mit halbjährlichem Wechsel der vorherrschenden Windrichtung. Monsune haben ihre Ursachen sowohl in dem jahreszeitlichen Wechsel der innerasiatischen Luftdruckverhältnisse als auch in der jahreszeitlichen Verschiebung der globalen Windsysteme. Der sommerliche Südwest-Monsun bringt den betroffenen Ländern erhebliche Niederschläge und verursacht z. B. in Bangladesch regelmäßig Hochwasserkatastrophen.

Morphologie

Morphologie ist die Lehre von der

äußereren Gestalt von Körpern oder Formen.

Mure

Wenn sich nach Starkregen oder der Schneeschmelze wasserdurchtränkte Schuttmassen in Bewegung setzen, spricht man von Muren oder Murgängen. Diese breiartigen Schuttströme haben in Hochgebirgen teilweise verheerende Auswirkungen. Muren besitzen durch ihre große Masse und Geschwindigkeit von 300 km/h eine ungeheure Zerstörungskraft.

Nahrungskette

Lineare Abfolge von Lebewesen, die hinsichtlich ihrer Ernährung direkt voneinander abhängig sind. Am Anfang einer Nahrungskette stehen die grünen Pflanzen (Produzenten), die von Pflanzenfressern (Konsumenten 1. Ordnung) verzehrt werden, die wiederum Fleischfressern (Konsumenten 2. bis x. Ordnung) als Nahrung dienen. Die Abfolge einzellige Alge – Wasserfloh – kleiner Fisch – Raubfisch – Mensch ist ein Beispiel für eine einfache Nahrungskette. In einem Ökosystem stellt eine Nahrungskette immer nur einen Ausschnitt aus einem komplexen Nahrungsnetz dar.

Nanometer

Längenmaßeinheit, die sich von der Einheit m ableitet: 1 nm entspricht 10 hoch minus 9 bzw. 0,000000001 m.

National Hurricane Center

Siehe → NHC.

Naturkatastrophen

Naturkatastrophen sind außergewöhnliche Naturereignisse, wie z. B.

Erdbeben, Vulkanausbrüche, Dürren oder Meteoriteinschläge. Zu einer Katastrophe werden sie durch die beträchtlichen Folgen in Bezug auf Menschenopfer als auch auf direkte Sachschäden. Entscheidend für das Ausmaß einer Katastrophe ist neben dem Naturereignis besonders ein effektives Katastrophenmanagement in den gefährdeten Regionen.

Naturlandschaft

Naturlandschaften sind Gebiete, die wenig oder gar nicht vom Menschen beeinflusst werden. Sie stehen den Kulturlandschaften gegenüber.

Neigungsmesser

Siehe → Klinometer.

NHC

Abkürzung für National Hurricane Center. US-amerikanische, staatliche Organisation zur Hurrikanforschung und Katastrophenvorsorge.

Nichtregierungsorganisationen

Zusammenfassende Bezeichnung für entwicklungs- und umweltpolitische Organisationen, die nicht in staatlicher Trägerschaft sind. Die Träger der Nichtregierungsorganisationen sind meistens kirchlich oder privat.

Niederschlag

Sammelbezeichnung für Wasser, das in flüssiger oder fester Form aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche gelangt (Regen, Schnee, Hagel oder Tau).

Niedrigwasser

Niedrigwasser ist der niedrigste Wasserstand an einem Fließgewässer. Der mittlere Niedrigwasserstand

wird aus den Niedrigwasserständen in einem festgelegten Zeitraum berechnet. An den Meeren ist das Niedrigwasser der niedrigste Wasserstand, der bei Ebbe auftritt.

Nipptide

Gezeiten mit relativ geringem Unterschied des Wasserstandes zwischen Niedrigwasser und Hochwasser. Wenn Sonne, Mond und Erde nicht in einer Linie, sondern in Quadratur stehen (erstes und letztes Mondviertel), gibt es die Nipptiden.

Normalnull

Normalnull (NN) ist eine Bezugsgröße für Höhenangaben, die auf der mittleren Höhe des Meeresspiegels basiert.

Nullmeridian

Der Nullmeridian ist der Längenkreis, von dem die Zählung der Längenkreise beginnt. Er verläuft durch die englische Stadt Greenwich bei London. Seit 1911 ist der Nullmeridian international gültig.

Oberlauf

Oberer Abschnitt eines Fließgewässers. Große Fließgewässer werden sehr grob in Ober-, Mittel- und Unterlauf eingeteilt. Der Oberlauf eines mittel-europäischen Flusses (z. B. Rhein) zeichnet sich durch hohe Fließgeschwindigkeit, hohen Sauerstoffgehalt, Temperaturen zwischen ungefähr 5 bis 10 °C und einen gerölligen oder schotterigen Untergrund aus.

Offshorebereich

Offshorebereiche (engl. = küstennah) bezeichnen Gebiete, die in einiger Entfernung von der Küste, aber noch

im relativ flachen Wasser des Kontinentschelfs liegen. Für die Energieversorgung haben diese Areale eine besondere Bedeutung. Weit über ein Drittel der weltweiten Ölreserven liegen in den Schelfbereichen. Die Offshorebereiche sollen auch verstärkt als Standort für Windkraftanlagen genutzt werden.

Ökologie

Ökologie ist die Lehre von den Wechselbeziehungen zwischen Organismen untereinander und ihrer Umwelt.

Ökologisches Gleichgewicht

Eher theoretisch geforderter Zustand eines Ökosystems, bei dem sich die unterschiedlichen Wechselbeziehungen zwischen den biotischen (belebten) Faktoren in einem scheinbar stabilen Zustand befinden. Ökosysteme sind dennoch dynamische Gebilde und es handelt sich bei den „stabilen“ Wechselbeziehungen um Fließgleichgewichte.

Ökosystem

Funktionelle Einheit aus einem Lebensraum und den darin lebenden Organismen. In einem Ökosystem bilden alle biotischen (lebende Bestandteile) und abiotischen (nicht-lebende Bestandteile) Faktoren ein zusammenwirkendes Gefüge.

Ökotop

Ökotope sind kleinere Lebensräume, die eine funktionelle Einheit aus Lebensraum und den darin lebenden Organismen bilden.

Organische Böden

Organische Böden bestehen vollständig oder zu einem großen Teil aus

organischen Substanzen (z. B. Pflanzenreste). Es sind vor allem die Moore (Niedermoore, Hochmoore), die den organischen Böden zugerechnet werden.

Orkan

Bezeichnung für einen Wind der Stärke 12 (Beaufort-Skala).

Ozean-Kontinent-Kollision

Bewegen sich ein ozeanischer und ein kontinentaler Erdkrustenbestandteil (Lithosphärenplatten) aufeinander zu, kommt es zu einer Ozean-Kontinent-Kollision bzw. zur Gebirgsbildung nach dem Andinen-Typ. Ozeanische und kontinentale Erdkrusten unterscheiden sich in ihrer Dichte. Da die ozeanische Kruste schwerer ist, wird sie, wenn sie sich in Richtung einer kontinentalen Platte bewegt, untergetaucht oder subduziert. Die Platte wird in größeren Tiefen aufgeschmolzen und Magma steigt auf: Es entstehen auf der kontinentalen Platte Vulkane. Zudem setzen Verformungen und Faltungen der Gesteine ein und Berge wölben sich auf. Ein typisches Beispiel für diesen Gebirgsbildungstyp sind die südamerikanischen Anden.

Ozeanische Kruste

Die ozeanische Kruste ist Bestandteil der Erdkruste. Im Gegensatz zur kontinentalen Kruste ist die ozeanische Kruste wesentlich dünner und schwerer. Die Dichte der ozeanischen Kruste beträgt 3,0 bis 3,1 g/cm³ (kontinentale K. 2,7 bis 2,8 g/cm³). Der Erdmantel kommt im Bereich der ozeanischen Platten der Erdoberfläche am nächsten. Die ozeanische Kruste erreicht eine Mächtigkeit von 5 bis 10 km.

Ozon

Leicht stechend riechendes Gas, dessen Moleküle aus drei Sauerstoffatomen (O₃) aufgebaut sind. Ozon entsteht in der Erdatmosphäre unter der Einwirkung ultravioletter Sonnenstrahlung aus molekularem Sauerstoff (O₂). In 20 bis 50 km Höhe ist die Ozonkonzentration am höchsten und es bildet dort die Ozonschicht. Das aggressive Gas wird auch in bodennahen Schichten unter starker Sonneneinstrahlung aus Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen gebildet. Zu hohe Konzentrationen von Ozon in der Atemluft verursachen beim Menschen Atembeschwerden.

Ozonloch

Siehe → Ozonschicht.

Ozonschicht

Schicht der Stratosphäre in 20–50 km Höhe mit einer hohen Ozonkonzentration. Ozon entsteht dort unter Einwirkung ultravioletter Sonnenstrahlung aus Sauerstoff. Die Ozonschicht absorbiert gesundheitsschädliche UV-Strahlung und macht dadurch erst ein Leben auf der Erde möglich. FCKW-haltige Treibgase, Stickoxide und Halone bauen das Ozon ab. Die Konzentration in der Ozonschicht hat dadurch stetig abgenommen. Ihre Zerstörung zeigt sich besonders über der Antarktis, wo die Ozonkonzentration zeitweise um mehr als 50 % niedriger ist. Man spricht dort von einem Ozonloch.

P-Wellen

Siehe → Primärwellen.

Paläogeographie

Die Paläogeographie untersucht die

in geologischen Zeiträumen aufgetretenen Verteilungen von Land und Meer sowie die Entwicklung der Kontinente. Sie befasst sich mit dem geologisch-morphologischen Erscheinungsbild der Erde in der Erdgeschichte.

Paläoklimatologie

Die Paläoklimatologie ist die Wissenschaft von der Klimageschichte der Erde, die anhand von fossilen Klimazeugen das Klimageschehen der Vergangenheit rekonstruiert.

Paläomagnetismus

Paläomagnetismus ist der in Gesteinen erhalten gebliebene vorzeitliche Magnetismus. Wenn Gesteine entstehen, z. B. bei der Abkühlung von Lava, richten sich bestimmte Minerale und Atomgruppen in den Gesteinen nach dem aktuellen Magnetfeld aus. Da sich das Erdmagnetfeld oft umpolte, haben in unterschiedlichen Zeiten gebildete Gesteine auch eine unterschiedliche Magnetisierungsrichtung, die über Jahrtausende in den Gesteinen erhalten bleibt (remanenter Magnetismus). Anhand von Bestimmungen der Magnetisierungsrichtung und der Altersbestimmung von Gesteinen wurde eine Zeitskala der magnetischen Umpolungen erstellt.

Paläontologie

Paläontologie ist die Wissenschaft von den pflanzlichen und tierischen Organismen der erdgeschichtlichen Vergangenheit. Fossilien sind das Studienmaterial der Paläontologie.

Passat

Der Passat ist ein ganzjährig wehender, mäßiger Wind über den

tropischen Ozeanen. Auf der Nordhalbkugel weht er aus nordöstlicher Richtung zum Äquator, auf der Südhalbkugel aus südöstlicher Richtung (Corioliskraft). Passate sind trockene, niederschlagsfeindliche Winde, die zur Bildung von Wüsten (Passatwüste) führen.

Passatwüste

Passatwüsten liegen im Einflussbereich der Passatwinde. Da diese beständigen Winde keine ausreichenden Niederschläge bringen, bilden sich in diesen Regionen Wüsten.

Pazifischer Feuerring

Die Pazifische Kontinentalplatte wird überwiegend von Subduktionszonen begrenzt. An diesen Plattengrenzen wird die Pazifische Platte in tiefere Bereiche der Erde geschoben und dabei aufgeschmolzen. Es kommt zum Vulkanismus und zu Erdbeben. Die Form der Pazifischen Platte zeichnet sich im Pazifischen Feuerring ab – dort treten der Plattengrenze folgend Vulkane auf.

Pegel

Wasserstand eines Gewässers. Der Pegelstand wird mit einer fest installierten Messlatte oder einem bojenähnlichen Schwimmer bestimmt.

Periglazial

Der Begriff Periglazial wird im allgemeinen für Prozesse, Orts- und Zeitbeschreibungen im Zusammenhang mit dem eisfreien Gletscherumland verwendet. Weiter gefasst beschreibt periglazial aber auch Klimaregionen mit häufigem Frost und Frostwechsel. Zu den periglazialen Bildungen

gehören z. B. die Solifluktion, Frostspaltung, die Erosion von Schmelzwässern oder die ausblasende Wirkung des Windes.

Perihel

Der sonnennächste Punkt der Erde auf ihrer elliptischen Bahn um die Sonne. Wird am 3. Januar jeden Jahres erreicht. Der Punkt der größten Sonnenferne ist der Aphel.

Permafrost

Permafrost tritt vor allem in polaren Regionen auf, wo die Temperaturen nicht ausreichen, mehr als die obersten Bodenschichten aufzutauen. Die Böden sind die meiste Zeit des Jahres gefroren, nur in den Sommermonaten tauen einige Dezimeter bis wenige Meter des dann stark vernässten Bodens auf.

Permafrostboden

Böden, vor allem in polaren Regionen (Permafrostgebiete), die ständig gefroren sind und in den wärmeren Monaten nur oberflächlich bis wenige Meter tief auftauen. Da das Eis im Untergrund die Versickerung des Auftauwassers verhindert, sind die Böden dann stark vernässt und schlammig. In Hanglagen neigen Permafrostböden zur Solifluktion.

Permafrostgebiete

Permafrostgebiete liegen in den polaren Klimaten, in Nordamerika etwa auf der Höhe des nördlichen Polarkreises (etwa 66,5°), auf dem eurasischen Kontinent stellenweise weit darüber hinaus.

Pestizide

Zusammenfassende Bezeichnung

für chemische Substanzen, die in der Landwirtschaft zur Bekämpfung von so genanntem „Unkraut“ (Herbizide), von Insekten (Insektizide) oder Pilzen (Fungizide) eingesetzt werden.

Phreatomagmatische Eruption

Explosiver Eruptionstyp, für den Wasser im Untergrund oder an der Oberfläche vorhanden sein muss. Bei diesem durch den Kontakt von heißer Magma mit Wasser hochexplosiven vulkanischen Ereignis können Dampf, Wasser, Asche und Gesteinsbrocken kilometerhoch in die Atmosphäre geschleudert werden. Ein Beispiel ist der Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883 („Krakatau-Typ“).

Physische Geographie

Die Physische Geographie ist ein Teilgebiet der Allgemeinen Geographie. Die Wissenschaft Geographie befasst sich mit den Erscheinungen der Erdhülle in ihrem räumlichen Gefüge, ihren örtlichen Verschiedenheiten, zeitlichen Veränderungen und ursächlichen Wechselbeziehungen. Die physische Geographie legt dabei den Schwerpunkt auf die belebte (biotische) und unbelebte (abiotische) Umwelt mit folgenden Faktoren: Gesteine und Böden, Relief, Klima, Pflanzen- und Tierwelt und Wasser.

PIK

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (Potsdam Institute for Climate Impact Research).

Pillow-Lava

Die Pillow- oder Kissen-Lava ist eine spezielle Form der Lava, die im Wasser erstarrt. Durch eine schnelle Abkühlung im Wasser entstehen etwa 1 m

große kissen- oder blasenartige Strukturen mit glatter Oberfläche. Pillow-Laven bilden sich vornehmlich im Bereich mittelozeanischer Rücken.

Pilzfelsen

Pilzfelsen sind oft allein stehende Felsen, deren Basis durch die Schleifwirkung des Windes in ariden Gebieten dünner geschliffen wurde als die überhängenden Felsbereiche.

Plankton

Frei im Wasser schwebende, pflanzliche oder tierische Kleinorganismen, die keine oder nur eine geringe Eigenbewegung haben. Plankton wird mit Strömungen verfrachtet und ist unverzichtbarer Bestandteil mariner Nahrungsketten.

Plateaubasalte

Plateaubasalte (auch Trapp) sind mächtige, basaltische und vor allem flächenhafte Lavaergüsse, die aus Vulkanspalten austreten. Da die Lava sehr dünnflüssig ist, baut sie keine symmetrischen Kegel auf, sondern sie überdeckt das bestehende Relief. Infolge einer Aufeinanderlagerung mehrerer horizontaler Ergüsse ist der Plateaubasalt, der Ausdehnungen von mehreren 100 km² besitzen kann, in mehr oder weniger dünne Schichten gegliedert. Beispiele von Plateaubasalten: Dekkantrapp/Indien, Columbia-Plateau/Oregon, Island.

Platte

Siehe → Lithosphärenplatten.

Plattenbewegung

Bewegung der Kontinentalplatten durch Strömungsvorgänge im zähflüssigen Erdmantel. Die Plattenbewe-

gung ist Bestandteil der Plattentektonik-Theorie.

Plattengrenze

Eine Plattengrenze kennzeichnet den Übergangsbereich von einer Kontinentalplatte zu einer anderen. Hier kommt es zu Spannungen und Reibungen, die sich durch Erdbeben und Vulkanismus auszeichnen. Es gibt konvergierende Plattengrenzen (Platten bewegen sich aufeinander zu), divergierende Plattengrenzen (Platten bewegen sich voneinander weg) und konservative Plattengrenzen (Platten gleiten aneinander vorbei).

Plattentektonik

Auf der Lehre der Kontinentalverschiebung und der Unterströmung basierende Theorie über den Krustenbau der Erde und die Entstehung und Verlagerung der Kontinente und Weltmeere. Grundlage hierfür ist die Aufgliederung der festen Erdoberfläche in große, weitgehend starre Platten und deren allmäßliche passive Wanderung als Folge von Strömungsvorgängen im Erdmantel. Begleitende Prozesse sind u. a. die Meeresboden spreizung, Vulkanismus und Erdbebenaktivitäten.

Pleistozän

Geologischer Zeitschnitt (Epoche). Teil des Quartärs. Das Pleistozän, das vor etwa 1,8 Mio. Jahren beginnt, ist geprägt durch starke weltweite Temperaturrückgänge. In den Kaltzeiten (Glazialen) ist es zu Gletscher vorstößen von Skandinavien aus bis nach Mitteleuropa und zur Vergletscherung der Alpen gekommen. Die Eisdicke über Skandinavien betrug weit über 2.500 m. Weltweite Verei-

sungen (u. a. in Nordamerika, Asien, Nordschottland). Die Kaltzeiten mit Temperaturen bis zu 15 °C unter den heutigen wurden von wärmeren Phasen, den Interglazialen, unterbrochen. Da enorme Wassermengen im Gletschereis festgelegt waren, lagen die Meeresspiegelstände bis zu 150 m tiefer als heute. Ablagerungen aus dem Quartär haben weltweit die größte Verbreitung.

Polare Luftmassen

Kalte Luftmassen, die ihren Ursprung in den polaren Breiten haben und in den gemäßigten Breiten für niedrige Temperaturen sorgen.

Polarfront

Übergangsbereich zwischen tropischer Warmluft und polarer Kaltluft. Sie bildet einen Streifen zwischen ungefähr 30 ° und 50 ° Nord und Süd in der planetarischen Frontalzone und ist verantwortlich für die klimatischen Bedingungen in den gemäßigten Breiten.

Polder

Polder sind eingedeichte Gebiete in Meeresnähe oder in überschwemmungsgefährdeten Niederungen.

Pollenanalyse

Anhand von Pollenanalysen wird versucht, die Vegetations- und damit auch die Klimaverhältnisse der Vorzeit, besonders der letzten geologischen Epoche, zu ermitteln. Die in Sedimenten, Böden, Mooren oder Torfen konservierten Pollen werden dafür aus dem umlagernden Material freigelegt, ihre Art bestimmt und die Mengenverhältnisse ermittelt. In Pollendiagrammen werden die Pollen-

zahlen einzelner Arten im Vergleich zur Gesamtpollenzahl aufgetragen. Das Auffinden bestimmter Pollenarten und ihrer Menge liefert Anhaltspunkte für die ehemaligen Vegetations- und Klimaverhältnisse. Beispiel: Massenausbreitung der Hasel in einer Warmzeit (Boreal, 9.000 bis 7.500 Jahre vor heute).

Ponor

Ein Ponor ist ein Schluckloch im Karst, in dem das Wasser eines Flusses oder Sees in unterirdischen Hohlräumen verschwindet (auch Fluss-Schwinde). Oft fließt das Wasser dann unterirdisch mehrere Kilometer weiter, bevor es an einer Quelle wieder an die Oberfläche gelangt.

Postglazial

Das Postglazial (oder Holozän) umfasst die vor 10.000 Jahren beginnende und damit letzte geologische Epoche, in der wir uns auch heute noch befinden. Das auf die so genannte „Eiszeit“ folgende Postglazial ist durch eine zunehmende Klimaerwärmung, den endgültigen Rückzug der Inlandeismassen und eine Wiederbesiedlung vorher eisbedeckter Gebiete gekennzeichnet. Der Begriff postglazial wird häufig auch für „nacheiszeitlich“ verwendet.

ppm

ppm bedeutet „parts per million“. 1 ppm entspricht 1 Millionstel oder 0,0001 %. Die Angabe ist meist volumen- oder gewichtsbezogen.

Präglazial

Das Präglazial bezeichnet Zeitabschnitte vor Eis- oder Kaltzeiten. Oft wird der Begriff präglazial auch adjek-

tivisch für „voreiszeitlich“ verwendet.

Präzession

Die Präzession bezeichnet eine kreiselartige Bewegung der Erdachse. Eine volle Umdrehung dieser „Trudelbewegung“ dauert zwischen 19.000 und 23.000 Jahren. Die Präzession hat nur eine Auswirkung auf die Stellung der Erdachse, nicht auf die Neigung. In Kombination mit der Exzentrizität und Veränderungen der Erdachsenneigung wird das globale Klima beeinflusst.

Primärwellen

Die sich am schnellsten (6 bis 13 km/s) ausbreitenden Erdbebenwellen. Bei den Primärwellen schwingen die Gesteinspartikel senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, das Gestein wird wechselweise komprimiert und gedehnt. Sie können sich in Flüssigkeiten und fester Materie gleichermaßen fortpflanzen, richten aber meistens keine großen Zerstörungen an. Nach den Primär- folgen die Sekundärwellen.

Pyroklastika

Vulkanische Förderprodukte aus Aschen und Gesteinstrümmern. Sie entstehen vorwiegend bei explosiven Eruptionen. Sie können als pyroklastischer Strom in einer Glutwolke zu Tal stürzen.

Pyroklastischer Strom

Glutwolke aus heißen vulkanischen Gasen, Aschen und Gesteinsbruchstücken, die bei einer Eruption ähnlich einer Lawine mit hoher Geschwindigkeit talwärts fließt. Handelt es sich im Wesentlichen nur um heiße Asche, spricht man auch von einem vulkanischen Aschenstrom.

Radioaktive Elemente

Elemente, deren Atomkerne die Eigenschaft haben, ohne äußere Einwirkung und unter Abgabe von Teilchen und Strahlung zu zerfallen. Beispiele sind Radon, Radium und Uran. Von nicht-radioaktiven Elementen können auch radioaktive Isotope existieren, z. B. das für die Radiokarbonmethode relevante Kohlenstoffisotop C14.

Radioaktiver Zerfall

Eine auch Radioaktivität genannte Eigenschaft bestimmter Elemente. Sie besitzen die Fähigkeit, sich ohne äußere Einwirkungen in andere Atomkerne zu wandeln. Dabei wird Energie in Form von Teilchen und Strahlung (Kernstrahlung) freigesetzt. Beim radioaktiven Zerfall wird der Überschuss von Protonen oder Neutronen, der eine Instabilität der Atomkerne bewirkt, durch Strahlungsabgabe beseitigt.

Radioaktivität

Siehe → radioaktiver Zerfall.

Radiokarbonmethode

Siehe → C14-Methode.

Radon

Natürliches, gasförmiges radioaktives Element (chemisches Symbol Rn, Ordnungszahl 86). Es gehört zur chemischen Gruppe der Edelgase.

Randwüste

Als Randwüste (auch Halbwüste) wird oft das Übergangsgebiet von Steppe zur Wüste bezeichnet. Randwüsten zeichnen sich durch eine spärliche Vegetation (kleine Sträucher, Sukkulanten oder Büschelgräser) und wenig Niederschlag aus. Im Gegensatz zu

Kern- und Vollwüsten, die die inneren Bereiche der Wüsten beschreiben, besitzen die in den Außenbereichen liegenden Randwüsten jedoch mehr Niederschläge.

Rayleigh-Wellen

Erdbebenwellen mit hoher Zerstörungskraft. Während einer Rayleigh-Welle bewegen sich die Gesteinspartikel elliptisch auf einer vertikalen Ebene. Sie sind die Ursache für das bei einem Erdbeben typische Rollen des Bodens. Die Bodenschwingungen sind mit einer Wellengruppe vergleichbar, die über eine Wasseroberfläche läuft. Im Gegensatz zu den Primär- und Sekundärwellen setzen sich Rayleigh-Wellen nur an der Oberfläche fort.

Regeneration

Im ökologischen Sinne die Fähigkeit eines Ökosystems, nach einem menschlichen oder natürlichen Eingriff seinen Ausgangszustand wieder zu erreichen.

Regenwald

Der Regenwald bezeichnet das Waldökosystem oder die Vegetationsform der immerfeuchten Tropen mit Niederschlägen von mehr als 2.000 mm/Jahr und Jahresmitteltemperaturen von mehr als 18 °C. Der Regenwald besitzt einen enormen Reichtum an Tier- und Pflanzenarten. Charakteristisch ist der Stockwerkaufbau dieser Wälder (Baumriesen bis über 50 m). Regenwälder nehmen etwa ein Drittel der weltweiten Waldflächen ein.

Regression

Regression ist das Zurückweichen eines Meeres aus überfluteten kontinentalen Gebieten. Das Zurück-

weichen wird entweder durch eine Hebung des Landes oder durch globale Wasserhaushaltsänderungen hervorgerufen.

Relief

Das Relief bezeichnet in den Geo- und Biowissenschaften die Oberflächengestalt der Erde einschließlich der Meeresböden.

Reliefenergie

Die Reliefenergie ist ein häufig verwendeter Ausdruck zur Beschreibung von Höhendifferenzen oder Hangneigungen einer Landschaft. Hochgebirge haben eine hohe, Ebenen eine niedrige Reliefenergie. Sie entscheidet u. a. über das Ausmaß der Abtragung, denn je steiler ein Hang ist, desto größer ist die mögliche Abtragung.

Renaturierung

Künstliche Wiederherstellung eines annähernd natürlichen Zustands von Fließgewässern.

Retention

Retention ist das Zurückhalten von Niederschlagswasser. Durch die Speicherung in Böden, Pflanzen oder Seen wird der Abfluss verringert und somit eine mögliche Hochwasserwelle geschwächt.

Retrozession

Aus dem Lateinischen abgeleiteter Begriff der Versicherungswirtschaft. Zur Abfederung großer Schadensrisiken, wie sie bei Naturkatastrophen auftreten können, sichern sich Versicherungsunternehmen bei so genannten Rückversicherungen ab. Die gegenseitige Absicherung

verschiedener Rückversicherungen, die mit gewaltigen Zahlungsfordernissen konfrontiert sein können, bezeichnet man als Retrozession.

Richter-Skala

Die nach dem amerikanischen Seismologen benannte Richter-Skala gibt die Stärke (Magnitude) eines Erdbebens an. Sie wird aus dem Maximalausschlag von Seismographen und der Entfernung zum Erdbebenherd berechnet. Der höchste bisher gemessene Wert auf der nach oben offenen Skala betrug 8,6. Obwohl die Richter-Magnitude nach wie vor in der Öffentlichkeit und in den Medien sehr verbreitet ist, wird diese Skala in der seismologischen Forschung kaum noch verwendet.

Riff

Ein Riff entsteht durch Ablagerung koloniebildender Meeresorganismen (z. B. Korallen). Riffe reichen bis nahe an oder bis über die Meeresoberfläche (Atoll) und entstehen vorwiegend in warmen, tropischen Gewässern.

Riftzone

Riftzonen sind Bereiche, an denen tektonische Verschiebungen von Gesteinsschollen stattfinden. Es sind Senken, die sehr viel länger als breit sind. Ihre Bildung steht mit der Plattentektonik in Verbindung.

Risikoanalyse

Gefährdungs- oder Verletzlichkeitsbewertung: Methode zur Ermittlung eines numerischen oder qualitativen Wertes für das Risiko.

Rücken

Rücken ist ein unscharfer Begriff für

Erhebungen mit größerer Länge als Breite und einer oft abgerundeten Form auf dem Festland (z. B. Berggrücken). Der Begriff wird auch für die lang gestreckten Ozeanspreizungszonen verwendet (mittelozeanische Rücken).

Rückhaltebecken

Stauanlagen oder Auffangbecken, die bei starkem Niederschlag oder Schneeschmelze Wasser vorübergehend speichern. Rückhaltebecken sind aufgrund der Bodenversiegelung besonders im Umfeld großer Städte unverzichtbar, um das Risiko von Überschwemmungen oder Hochwasser zu verringern.

Rutschung

Rutschungen von Gesteinsmassen verlaufen im Gegensatz zu Stürzen (Bergsturz) eher gleitend als stürzend und die Gesteinsmassen bleiben während der Bewegung im Zusammenhang. Besonders auf tonigen Schichten und bei starker Durchfeuchtung beginnen Gesteinsblöcke und Böden im Verband zu gleiten.

S-Wellen

Siehe → Sekundärwellen.

Saffir-Simpson-Skala

Fünfstufige Skala zur Angabe der Stärke und Windgeschwindigkeit eines Hurrikans. Sie reicht von Kategorie 1 (sehr schwach) mit Windgeschwindigkeiten um die 120 km/h bis zu Kategorie 5 (verwüstend) mit Windgeschwindigkeiten über 250 km/h.

Salzwüste

Salzwüsten sind Wüsten, in denen stark salzhaltige Böden, Salzkrusten

oder Salzseen liegen. Es sind sowohl klimatisch als auch für Lebewesen besondere Extremstandorte.

Sandwüste

In Sandwüsten ist Sand das vorherrschende Substrat. Sandwüsten, wie Teile der Sahara oder die australische Wüste, werden von welligen Sandflächen oder Dünen geprägt.

Saures Magma

Saure Magmen, Laven oder Schmelzen besitzen einen hohen Anteil an Kieselsäure (SiO_2). Sie werden auch als granitische Magmen (Laven etc.) bezeichnet, da sich aus ihnen z. B. Granit bildet. Sie stehen damit im Gegensatz zu kieselsäurearmen (basischen) Magmen, aus denen sich z. B. der Basalt bildet. Der Kieselsäureanteil von Magmen entscheidet über die Zähflüssigkeit und über die Farbe (je mehr, desto zäher und heller).

Savanne

Die Savanne ist eine Vegetationsform der wechselfeuchten Tropen und Subtropen mit Regen- und Trockenzeiten. In Abhängigkeit der Niederschlagsmengen unterscheidet sich die Vegetation der Dorn-, Trocken- und Feuchtsavanne. Grasland ist vorherrschend, bei Niederschlagsreichtum auch Wälder.

Schelf

Siehe → Kontinentalschelf.

Schelfmeer

Schelfmeere sind die relativ flachen Meeresteile mit Wassertiefen bis etwa 200 m. Um den antarktischen Kontinent herum wird das seichte Schelfmeer vom Schelfeis bedeckt.

Scherwind

Böige Fall- und Seitenwinde, die besonders in der Luftfahrt gefürchtet sind. Leichte Scherwinde begünstigen die Bildung eines Hurrikans, starke Scherwinde verhindern ihn.

Schicht

Eine Schicht beschreibt in der Geologie einen tafelartigen Gesteinskörper, dessen Dicke im Vergleich zu seiner horizontalen Ausdehnung gering ist. Die Abgrenzung zweier Schichten ist die Schichtfuge, an der sich die verschiedenen Schichten gut teilen lassen. Unterschiedliche übereinander lagernde Schichten sind eine Schichtfolge. Der Begriff Schicht wird im engeren Sinne nur für Sedimentgesteine verwendet.

Schichtvulkan

Siehe → Stratovulkan.

Schiefe der Ekliptik

Ekliptik ist der Fachausdruck für die Erdbahnebene. Da die Erdachse um etwa 23,5° von dieser Ebene geneigt ist, spricht man von der Schiefen der Ekliptik. Denn im Vergleich zu einer Ebene, die durch den Erdäquator gelegt wird, ist die Ekliptik um 23,5° geneigt.

Schildvulkan

Schildvulkane entstehen durch mehrfache Ausflüsse von Lava-Strömen aus einem Zentralschlot (Aufstiegsstelle des Magmas). Da die ausfließende Lava dieses Vulkantyps sehr dünnflüssig ist, besitzt er eine flache bis buckelartige Form mit geringen Hangneigungen. Schildvulkane, die sich zu den Seiten ausbreiten und überlagern, sind die größten Vulkane

der Erde. Der Mauna Loa auf Hawaii hat seinen Ursprung 5.000 m unter der Meeresoberfläche, er reicht 4.170 m über das Meer hinaus.

Schlacken

Schlacken sind vulkanische Auswurprodukte. Sie sind ungerundet und oft scharfkantig. Auch Lavaströme werden als Schlacken bezeichnet, wenn diese stark porös oder blasig sind.

Schlammstrom

Schlammströme sind an Hängen herabfließende Ströme aus vulkanischen Aschen, Böden oder Sedimenten, die mit Wasser gesättigt sind.

Schlammvulkan

Schlammvulkane (auch Salse, Macaluba) fördern kein Magma, sondern sie sind Austrittstellen von Gasen, Grundwasser und aufgeweichten Bodenmaterialien.

Schlick

Schlick ist ein feinkörniges Sediment (Ton, Silt) mit einem hohen Anteil an organischen Substanzen (feinkörnige Tier- und Pflanzenreste). Häufig verwendeter Begriff im Zusammenhang mit den Sedimenten der Gezeitenküsten (Wattgebiete).

Schlipf

Ein Schlipf oder Erdschlipf ist eine schnelle Massenbewegung an Hängen. Böden und locker gelagerte Gesteine bewegen sich dabei auf tonigen Gleitbahnen oder wasserundurchlässigen Schichten hangabwärts. Sie bilden am oberen Hang eine halbkreisförmige Abrissnische und dort, wo sie zum Stehen kommen,

einen Wulst. Diese zungenartigen Gebilde verlieren ihre Bewegungsenergie entweder dadurch, dass sie in flacheres Gelände gleiten, oder wenn ihr Wassergehalt abnimmt.

Schlot

Schlote sind Aufstiegskanäle des Magmas in Vulkanen.

Schmelzwasser

Schmelzwasser ist das von Gletschern abgegebene Wasser, das als Gletscherbach wieder an die Oberfläche gelangt. Das Schmelzwasser der Gletscher ist ein wichtiger Faktor bei der Landschaftsformung. Durch die abtragende Wirkung der Schmelzwasser sowohl unter als auch vor den Gletschern entstehen z. B. Rinnenseen und Urstromtäler.

Schneebrettawine

Lawine mit breiter Abrisskante aus trockenem Fest-Schnee. Der Schnee gleitet in großen Schollen mit im Vergleich zu anderen Lawinen moderater Geschwindigkeit (8 bis 10 m/s) talwärts. Schneebrettawinen sind extrem gefährlich, da die Schneeschollen einen großen Druck ausüben und dadurch eine hohe Zerstörungskraft haben. Sie werden häufig durch Touren- oder Variantenskifahrer ausgelöst.

Schneegrenze

Oberhalb der Schneegrenze gelegene Gebiete werden ganzjährig vom Schnee bedeckt. Diese Höhengrenze schwankt in den unterschiedlichen Klimazonen (Tropen bei 5.000 m, Alpen bei 2.800 m) und in Abhängigkeit lokaler Klimaverhältnisse (Nord- oder Südhang).

Schneaprofil

Schneaprofile werden zur Einschätzung der Lawinengefahr angefertigt. Je nach Ausrüstung und Aufwand wird die Schneedecke hinsichtlich ihrer Schichtung und Stabilität untersucht und ggf. graphisch dargestellt. Wichtige Werte sind die Korngröße, Feuchtigkeit und Härte einer Schneeschicht.

Schneewächte

Einseitig überhängende Ansammlung von Schnee an der dem Wind abgekehrten Seite (Leeseite) eines Grates oder Kamms.

Schutt

Schutt ist kantiges Abtragungsmaterial, das u. a. durch Frostspaltung aus dem anstehenden Gestein gelöst und vor den Hängen abgelagert wird. Schutt ist generell unverfestigt und weist eine schlechte Sortierung auf (viele verschiedene Korngrößen). Der Begriff wird allgemein für mehr oder weniger kantige Gesteinsbruchstücke verwendet.

Schuttlawine

Schnelle, fließende Massenbewegung von Lockermaterial.

Schuttrutschung

Schnelle, gleitende Massenbewegung von Lockermaterial in einer mehr oder weniger geschlossenen Einheit.

Schuttstrom

Mäßig schnelle, fließende Massenbewegung aus Gesteinstrümmern und Schlamm.

Schuttwüste

Die Schuttwüste (auch Hamada, arab.: die Unfruchtbare) ist eine Felswüste

aus eckigem Schutt. Sie entsteht durch die ausblasende Wirkung des Windes, der das feinkörnige Material abtransportiert.

Schwellenland

Bezeichnung für ein weniger entwickeltes Land, das auf der Schwelle zum Industrieland steht. Die Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse ist dort mehr gewährleistet und die Produktivität und Industrialisierung sind weiter fortgeschritten als in einem so genannten Entwicklungsland. Beispiele für Schwellenländer sind Mexiko, Brasilien oder Singapur.

Schwemmfächer

Schwemmfächer sind fächerartige Ablagerungen von Flüssen. Da Fließgewässer, die in Bereiche mit geringerem Gefälle gelangen, aufgrund der abnehmenden Fließgeschwindigkeit ihre Transportkraft für Sedimente verlieren, lagern sie die vorher transportierten Materialien ab.

Schwerkraft

Schwerkraft ist die Gravitation der Erde. Gravitation ist die wechselseitige Anziehung von zwei Körpern. Auf der Erde beträgt diese Kraft ungefähr $9,8 \text{ m/s}^2$.

Seafloor-Spreading

Im Bereich von divergierenden (auseinanderdriftenden) Platten, an den mittelozeanischen Rücken, dringt durch aufsteigende Strömungen immer wieder Magma aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche. Dabei werden die Platten auseinander gedrückt und neuer Ozeanboden wird gebildet. Dieser Vorgang läuft mit wenigen Zentimetern pro Jahr ab.

Sediment

Sedimente sind Ablagerungen von verwitterten Gesteinsbruchstücken (klastische S.), aus einer Lösung ausgefällte (chemische S.) oder Ablagerungen von Pflanzen und Tierresten (biogene S.). Klastische Sedimente sind z. B. Konglomerate, Sand-, Silt- und Tonsteine. Biogene Sedimente sind hauptsächlich Kalksteine aus karbonathaltigen Schalenresten von Tieren. Chemische Sedimente, wie z. B. Salze, bilden sich häufig aus verdunstendem Meerwasser.

Sedimentation

Sedimentation ist der Prozess der Ablagerung von durch Wasser, Wind und Eis transportierten Materialien (z. B.: Aschen, Sand, Gesteinsbruchstücke).

Sedimentgestein

Sedimentgesteine sind verfestigte Sedimente. Charakteristisch ist die Schichtung dieser Gesteine, die besonders häufig Fossilien besitzen. Unterschieden werden: klastische Sedimente (Konglomerate, Sand-, Silt- und Tonsteine), biogene Sedimente (z. B. Kalksteine aus karbonathaltigen Schalenresten von Tieren) und chemische Sedimente (wie z. B. Salze, die sich häufig aus verdunstendem Meerwasser bilden). Der Prozess des Übergangs von einem Lockersediment zu einem Festgestein wird Diagenese genannt. Porenräume der Lockersedimente werden mit Bindemitteln aufgefüllt oder werden durch Druckwirkung geschlossen. Steigen die Temperaturverhältnisse, unter denen das Sediment verfestigt wird, über 200°C , spricht man von Metamorphose.

Seebenen

Seebeben sind Erschütterungen des Meeresbodens. Sie sind zu einem großen Teil die Auslöser von bis zu 30 m hohen Wellen in Küstenbereichen (Tsunamis).

Seismik

Die Seismik ist ein Verfahren, das zur Untersuchung der Wellenausbreitung in der Erdkruste angewendet wird. Mithilfe von künstlich erzeugten Erdstößen (Sprengseismik) und deren Messung mittels Seismographen wird dabei das Verhalten der Wellen erkundet. Da sich Wellen in unterschiedlichen Gesteinsschichten auch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortpflanzen, ist dies eine Möglichkeit, den Aufbau der Erde zu bestimmen. Allgemeiner wird der Begriff Seismik auch für Erdkrustenbewegungen oder Erdbebenkunde verwendet.

Seismisches Moment

Maß der mechanischen Krafteinwirkung auf eine geologische Störung bei einem seismischen Ereignis (z. B. Erdbeben). Die Höhe des seismischen Moments ist abhängig von der Bruchfläche, der Länge der Versetzung und der Elastizität des Gesteins. Es kann aus Seismogrammen und Feldmessungen ermittelt werden.

Seismogramm

Von einem Seismographen aufgezeichnete Messkurve aller Erschütterungen und Bewegungen der Erdoberfläche in einer Zeitperiode. Anhand der Seismogramme lassen sich sowohl die Magnitude als auch die ungefähre Lage des Epizentrums eines Erdbebens bestimmen. Der

Kurvenverlauf der Seismogramme von Erdbeben und anderen, auch künstlich verursachten Erschütterungen lässt Rückschlüsse auf ihre Entstehungsursachen zu.

Seismograph

Messgerät zur Aufzeichnung von Erdkrustenbewegungen (Erdbeben). Die vom Seismographen über eine Zeitperiode gesammelten Messwerte werden aufgezeichnet und bilden das Seismogramm.

Seismologie

Erdbebenkunde und Erdbebenforschung.

Sekundärwellen

Die nach den Primärwellen als zweite eintreffenden Erdbebenwellen. Bei den Schwingungen der Sekundärwellen bewegen sich die Bodenteilchen quer zur Ausbreitungsrichtung der Wellen. Das Gestein wird dadurch horizontal oder vertikal verformt und geschüttelt. Im Gegensatz zu den Primärwellen können die S-Wellen nur in festem Gestein wandern und werden daher von den flüssigen Bereichen des Erdinneren „geschluckt“.

Silikate

Silikate sind Minerale mit Verbindungen von SiO₄ und basischen Kationen. Silikat-Minerale werden von Tetraedern aufgebaut, bei denen ein Silizium-Ion von vier Sauerstoff-Ionen umgeben ist. Diese Tetraeder haben vier negative Ladungsplätze, die mit Kationen (Na, K, Mg usw.) aufgefüllt werden können. Zwei Tetraeder können sich auch ein Sauerstoff-Ion teilen, wodurch verschiedene Strukturen wie Ring-, Ketten-, Schicht- oder

Gerüstsilikate entstehen. Silikatische Mineralien sind z. B.: Pyroxen (Ketten-silikat), Kaolinit (Schichtsilikat), Feldspat (Gerüstsilikat).

Sinter

Sinter sind meist kalkhaltige Mineralausscheidungen an Quellen. Bei der Bildung von Sinter kommt es durch folgende Faktoren zu einer Ausfällung der Mineralien: Kohlendioxidabgabe des Wassers, Temperaturerhöhung, Druckerniedrigung.

Smog

Zusammengesetztes englisches Wort aus „smoke“ (Rauch) und „fog“ (Nebel) als allgemeine Bezeichnung für dunstige Luftmassen mit hoher Schadstoffkonzentration. Smog bildet sich vor allem über Großstädten und Industrieregionen mit hoher Luftscha-dstoffkonzentration. Die Entstehung des Sommersmogs (Los-Angeles-Typ) wird durch austauscharme, warme und trockene Wetterlagen begünstigt. Die Entstehung des Wintersmogs (London-Typ) wird dagegen durch austauscharme, feucht-kalte Wetterlagen begün-stigt. Der fehlende Austausch führt zu hohen Schadstoffkonzentrationen in der Atemluft, die Gesundheitsstö-rungen und Atemwegserkrankungen hervorrufen.

Smog-Index

Wert zur Angabe der Luftbelastung durch Smog. Er berechnet sich aus der Schwefeldioxid- und Staubkonzentra-tion. Wird in g/m³ angegeben.

Soforthilfemaßnahmen

Summe aller Maßnahmen, die unver-züglich nach einem Katastrophen-

ereignis eingeleitet werden, um die Grundbedürfnisse der Bevölkerung sicherstellen zu können und Folgeschäden zu vermeiden.

Solfatare

Solfatare sind vulkanische Ausgasungen. Sie besitzen einen hohen Gehalt an Schwefelverbindungen, die sich als reiner Schwefel neben den Austrittsstellen absetzen. Andere Ausgasungen sind die bis zu 1.000 °C heißen Fumarolen und die kohlendioxidhaltigen Mofetten.

Solifluktion

Massenbewegung von Böden und lockeren Gesteinen in Gebieten mit Permafrostböden. Durch ein oberflächennahes Auftauen der Böden beginnen sich die Bodenschichten gleitend auf einem gefrorenen Untergrund zu bewegen. Die Solifluktion kann schon bei Hangneigungen unter 5 ° auftreten.

Southern-Oscillation

Regelmäßige atmosphärische Schwankungen der Luftdruckverteilung über dem Südwestpazifik und Bestandteil der „El Niño Southern Oscillation“ (ENSO). Der Zustand der Luftdruckverteilung wird mit dem Southern Oscillation Index (SOI) angegeben, der aus der Druckdifferenz zwischen Darwin (Australien) und Tahiti errechnet wird. Bei einem negativen SOI ist der Luftdruck auf Tahiti niedriger als in Darwin. Dieser Zustand geht mit einer El-Niño-Phase einher, der umgekehrte Zustand (positiver SOI) mit einer La-Niña-Phase.

Spaltenerguss

Bezeichnung für Lineareruption.

Sperrwerk

Bauwerk in Flussmündungen, das auflaufende Sturmfluten zurückhält und somit Hochwasser im Unterlauf von Flüssen verhindert.

Springtide

Springtiden (Springfluten) sind Gezeiten mit einem erhöhten Wasserstand. Stehen Mond und Sonne bei Vollmond in Opposition oder bei Neumond in Konjunktion, addieren sich die Anziehungskräfte beider Himmelskörper. Sie wirken in die gleiche Richtung und verstärken einander in der Springtide.

Spätglazial

Das Spätglazial umfasst den Zeitraum von 14.000 bis 10.000 Jahre vor heute. Es ist der Abschnitt zwischen dem Hochglazial (stärkste Vereisung der letzten Kaltzeit, Weichsel-Kaltzeit) und dem Zerfall des nordischen Inlandeises. Im Spätglazial Mitteleuropas ist es zu mehreren Klima- und Vegetationsveränderungen gekommen. Die zuvor vom Eis bedeckten Gebiete wurden zuerst von einer baumarmen Tundra, später von Birken und Kiefern wiederbesiedelt. An das Spätglazial schließt sich der wärmere Zeitabschnitt des Holozäns an.

Spülfläche

Spülflächen bilden sich durch die flächenhafte Abtragung von meist tiefgründig verwitterten Böden. Häufig treten sie in Gebieten mit einem Wechsel von Trocken- und Regenzeiten auf. Spülfluten (mehr flächige, als lineare Abtragung) schwemmen das leicht erodierbare Material weg und sorgen für die Bildung von fast ebenen Flächen.

Spülrinne

Spülrinnen entstehen durch die Erosion des Wassers. Es sind im Dezimeterbereich liegende, meist geradlinig verlaufende Erosionsrinnen.

Stadiale

Stadiale sind Zeitabschnitte innerhalb von Kaltzeiten, die durch Gletschervorstöße gekennzeichnet sind. Die Stadiale werden von den wärmeren Interstadialen begrenzt.

Staffelbruch

Staffelbrüche sind stufen- oder treppenartig angeordnete Gesteinschollen, die meist durch Abschiebungen entstehen. Die Störungslinien, die Orte, an denen die Abwärtsbewegungen der einzelnen Schollen stattfinden, liegen parallel zueinander. Staffelbrüche finden sich oft an den Rändern von tektonischen Gräben.

Staublawine

Lawine mit punktförmigem Abriss aus trockenem, wenig verfestigtem Schnee. Durch Luftturbulenzen wird der Schnee aufgewirbelt und fein zerstäubt und rast mit hoher Geschwindigkeit (50 bis 100 m/s) bergab.

Staukuppe

Staukuppen (auch Quellkuppen) sind kugel- bis kuppelförmige Magmenmassen, die einen Vulkanischlot aufgrund ihrer Zähflüssigkeit ähnlich einem Korken in einer Flasche verschließen.

Staunässe

Auf einer wenig oder nicht wasser-durchlässigen Bodenschicht gestautes Niederschlagswasser. Staunässe

verschwindet während längerer Trockenperioden.

Steinschlag

Steinschlag bezeichnet aus einem Gesteinsverband (meist) durch Frostspaltung herausgelöste Gesteine, die im freien Fall Hänge herabstürzen.

Steinwüste

Unter Steinwüsten werden die Serir und die Hamada zusammengefasst und den Sandwüsten gegenübergestellt. Die Serir ist eine flache Geröllwüste, die Hamada (arab.: die Unfruchtbare) eine Felswüste aus eckigem Schutt. Beide Wüstentypen entstehen hauptsächlich durch die ausblasende Wirkung des Windes, der das feinkörnige Material abtransportiert.

Steppe

Steppen sind baumlose Graslandschaften, die sich häufig an Wüstengebiete (Subtropen) anschließen oder im kontinental geprägten Klima der Mittelbreiten liegen. In den Sommermonaten herrschen Trockenzeiten vor, die Jahresniederschläge sind aber auch insgesamt niedrig (um 500 mm). In Nordamerika werden diese Gebiete Prärie, in Südamerika Pampa genannt. Ein charakteristischer Steppenboden ist die Schwarzerde.

Stickoxide

Zusammenfassende Bezeichnung für Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2). Bei Verbrennungsprozessen wird vor allem das farblose NO gebildet, das an der Luft sofort zu dem braunen und stechend riechendem NO_2 oxidiert wird. Unter dem Einfluss

von Sonnenlicht bildet sich aus Stickoxiden das für den Sommersmog mitverantwortliche Ozon.

Strahlung

Strahlung ist die Ausbreitung von Energie in Form von Wellen und Teilchen. Licht-, Infrarot- und Röntgenstrahlung stehen als Wellenstrahlung der Alpha- und Beta-Strahlung (Teilchenstrahlung) gegenüber. In der Meteorologie und Klimatologie wird der Einstrahlung von Licht- und Wärmeenergie durch die Sonne die Ausstrahlung von Wärmeenergie von der Erdoberfläche gegenübergestellt. In diesem Sinne ist die Gegenstrahlung die von der Atmosphäre reflektierte Wärmestrahlung. Die Energie des kurzweligen Sonnenlichtes wird an der Erdoberfläche in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt.

Strahlungshaushalt

Rechnerische Gegenüberstellung der Energieaufnahme und -abgabe der Erde und der Erdatmosphäre. Sie wird in der Strahlungsbilanz von Ein- und Ausstrahlung bestimmt, deren Ergebnis Null sein muss (die Erde würde sonst auskühlen oder sich aufheizen).

Stratigraphie

Die Stratigraphie ist eine geologische Fachdisziplin, die sich mit der zeitlichen Einordnung von Gesteinschichten und der Aufstellung der geologischen Zeitskala beschäftigt. Die zeitliche Einordnung der Gesteine erfolgt zum einen durch Leitfossilien (Biostratigraphie), zum anderen anhand anorganischer Merkmale (Lithostratigraphie, z. B. Gesteinszusammensetzung). Für stratigraphische

Untersuchungen eignen sich besonders die Sedimentgesteine, da die horizontale Abfolge von Sedimentgesteinsschichten in vielen Fällen eine zeitliche Abfolge darstellt. Sedimentgesteine können im Vergleich zu magmatischen oder metamorphen Gesteinen Lebensspuren aufweisen. Ziel der Stratigraphie ist es, die Entwicklung der Erdkruste zu deuten.

Stratosphäre

Die Stratosphäre ist eine Schicht der Atmosphäre. Sie liegt oberhalb der Troposphäre, in der sich das Wettergeschehen abspielt. Die Untergrenze der Stratosphäre befindet sich am Äquator in 17 und über den Polen in 8 km Höhe. In durchschnittlich 50 km Höhe, an der Stratopause, liegt der Übergang zur Mesosphäre. Dort herrschen Temperaturen von etwa 0 °C. Im unteren Bereich der Stratosphäre liegen sie relativ konstant bei -55 °C. In einer Höhe von 25 bis 30 km sind die Ozonkonzentrationen am höchsten (Ozonschicht). In dieser Schicht absorbiert das Ozon die ultraviolette Strahlung.

Stratovulkan

Explosionsartige Ausbrüche von Staub, Asche und anderem Lockermaterial führen zur Bildung von Schicht- oder Stratovulkanen. Dabei baut sich ein steiler Vulkankegel aus einer Wechselfolge von Lavaschichten und Aschenablagerungen auf. Zu den Stratovulkanen gehören z. B. der Ätna, der Vesuv oder der Fujiyama.

Sturmflut

Sturmfluten entstehen, wenn Springflut und starke aufländige Winde gleichzeitig auftreten. Die Höhe der

Wasserstände und der Brandung ist in diesen Fällen extrem. Es kann zu katastrophalen Folgen kommen (Deichbrüche, Überschwemmungen, Todesopfer; Beispiel: Nordsee, Februar 1962).

Störung

Siehe → Verwerfung.

Subduktion

Subduktion bezeichnet den Vorgang des Absinkens einer ozeanischen Platte unter eine andere Lithosphärenplatte.

Subduktionszone

Eine Subduktionszone ist der Bereich, in dem eine ozeanische Platte unter eine andere Platte abtaucht und dabei in großer Tiefe schmilzt. Subduktionszonen sind durch hohe seismische Aktivität gekennzeichnet.

Sublimation

Sublimation ist der direkte Übergang eines festen Stoffes in seine gasförmige Form (und auch umgekehrt). Die Sublimation ist ein Prozess, der während der Bildung von Gletscher-eis abläuft.

Subpolare Zone

Die subpolare Zone ist der klimatische Übergangsbereich zwischen den kühl-gemäßigten Mittelbreiten und der polaren Zone.

Subtropen

In den Subtropen liegen die Temperaturen im Jahresschnitt zwischen 12 und 20 °C. Sie schließen sich nördlich und südlich an die Tropen an und reichen über den 40. Breitengradenkreis auf der Nord- und Südhalbkugel hinaus. Nach der jährlichen Temperaturschwankung werden sie in drei verschiedene Zonen eingeteilt. Die maritimen Subtropen haben einen ausgeglichenen Jahresgang der Temperatur mit Schwankungen der Monatsmittelwerte zwischen 10 und 20 °C. In den kontinentalen und hochkontinentalen Subtropen können die Temperaturschwankungen bis über 40 °C betragen. Zu den hochkontinentalen ariden Subtropen zählen bekannte Wüstengebiete, wie die nördliche Sahara, Teile Saudi-Arabiens und des Irans.

Zusammenleben von Tier- oder Pflanzenarten, die untereinander über besondere Wechselbeziehungen verbunden sind.

Symbiose

Regionale Bezeichnung für tropische Wirbelstürme, die über dem Nordwestpazifik entstehen und in Ostasien (Japan, China) schwere Verwüstungen anrichten können.

Taifun

Der Talhang ist der Übergangsbe-reich zwischen dem Talboden und der oberen Begrenzung des Tals.

Tektonik

Tektonik ist die Lehre vom Aufbau der Erdkruste, den Bewegungsvorgängen von Erdplatten und den Kräften, die zu diesen Bewegungen führen.

Tektonische Störung

Allgemeine Bezeichnung für eine durch die Bewegungsvorgänge der Erdplatten verursachte Trennlinie in der äußeren Erdkruste. An ihr hat eine Versetzung oder Verlagerung von Gesteinspaketen stattgefunden.

Tephra

Tephra ist die Sammelbezeichnung für alle lockeren vulkanischen Auswurfprodukte.

Terrestrisch

Terrestrisch bedeutet „auf der Erde“ (Landoberfläche) entstanden oder auf ihr vorkommend (griech.: terra = Erde). Der Begriff wird für Vorgänge und Formen verwendet.

Tide

Siehe → Gezeiten.

Tidenhub

Tidenhub ist die Wasserstandsschwan-kung, die während der Gezeiten oder Tiden entsteht.

Tiefdruckgebiet

Oberbegriff für alle atmosphärischen Phänomene tiefen Luftdrucks. Tiefdruckgebiete werden relativ definiert, in ihnen herrscht ein geringerer Luftdruck als in der Umgebung. In den mittleren Breiten ist ein bodennaher Luftdruck von 990 hPa in der Regel ein Tiefdruck-, ein Luftdruck von 1.020 hPa ein Hochdruckgebiet.

Tiefengestein

Tiefengesteine, auch Plutonite genannt, entstehen in der Tiefe der Erdkruste. Dabei dringt Magma in den unteren Teil der Erdkruste ein und erstarrt dort allmählich zu einem relativ grobkörnigen magmatischen Gestein.

Tiltmeter

Präzisionsneigungsmesser, der auch

zur Messung seismischer Aktivität und der Vorhersage von Vulkanausbrüchen eingesetzt wird. Ein Tiltmeter kann geringste Neigungsveränderungen anhand der Lageveränderung des Schwererektors registrieren und wird zum Schutz vor Fremdeinflüssen in der Regel in ein Bohrloch eingeführt.

Tornado Alley

Region im Süden und mittleren Westen der USA, die häufig von Tornados heimgesucht wird. In diesem ca. 1.000 km breiten Streifen zwischen Texas und North Dakota werden bis zu 800 Tornados jährlich registriert.

Tornado

Auch Trombe oder Windhose genannter, kleinräumiger Wirbelsturm mit großer Zerstörungskraft. Ein Tornado kann sich bei heftigen Gewittern über dem Festland bilden. Charakteristisch ist der von der Gewitterwolke bis zum Boden reichende, rotierende Schlauch. Sein Durchmesser beträgt 10 bis wenige 100 m, die Windgeschwindigkeit in seinem Inneren bis zu 400 km/h.

Transformstörung

Horizontale Verschiebung von Gesteinspartien mit teilweise erheblichen Weiten. Als Transformstörungen werden besonders die senkrecht zu den mittelozeanischen Rücken verlaufenden Verschiebungen bezeichnet. Große Transformstörungen wie die Nordanatolische Störung oder die San-Andreas-Störung werden auch als konservative Plattengrenzen bezeichnet. An ihnen wird weder Erdkruste aufgeschmolzen noch neue gebildet, sie sind aber extrem erdbebengefährdet.

Transgression

Transgression ist das Vordringen des Meeres in Bereiche des Festlands. Der Grund für eine Transgression kann entweder die Senkung des Landes oder ein Anstieg des Meeresspiegels sein.

Transversal

Quer zur Längsrichtung.

Transversalwellen

Siehe → Sekundärwellen

Treibhaus-Effekt

Kurzwellige Strahlung der Sonne wird an der Erdoberfläche in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Die langwellige Strahlung wird von Wasserdampf, Kohlendioxid und Spurengasen (Treibhausgasen) teilweise reflektiert oder absorbiert und daher nicht wieder in das All abgegeben. Ohne diesen Effekt wäre die Mitteltemperatur der Erde nicht bei ca. 15 °C, sondern bei –18 °C. Dieser Treibhaus-Effekt ist ein natürlicher Prozess und ein wichtiger Bestandteil für den Wärmehaushalt der Erde. Bei einem gesteigerten Ausstoß von Treibhausgasen wird mehr langwellige Energie absorbiert als unter natürlichen Bedingungen und die globalen Temperaturen steigen.

Treibhausgas

Treibhausgase sind Gase, die zu einer Erwärmung des globalen Klimas beitragen (Treibhaus-Effekt). Es sind u. a. Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Ozon und zahlreiche schwefel- und fluorhaltige Gase.

Triebsschnee

Vom Wind verfrachteter Schnee, der

an dem Wind abgewandten Lagen (Lee-Lagen) abgelagert wurde.

Trombe

Siehe → Windhose.

Tropen

Die Tropen können klimatisch oder auch über die Lage zwischen den Wendekreisen definiert werden. In Bezug auf das Klima liegen die Tropen innerhalb eines Bereichs mit Jahresdurchschnittstemperaturen von über 20 °C. In Äquatornähe fallen noch über 5.000 mm Niederschlag, in Richtung der Wendekreise nehmen die Niederschläge aber so weit ab, dass nur noch während maximal zwei Monaten im Jahr die Niederschläge höher sind als die Verdunstung. In den humiden Tropen liegt der tropische Regenwald. In den semiariden und semihumiden Tropen (mit drei bis fünf und sechs bis neun humiden Monaten) finden sich ganz unterschiedliche Vegetationsformen. Je nach Anzahl der Trockenmonate gibt es sowohl regengrüne tropische Feucht- als auch Trockenwälder, die Trocken- und Dornsavannen. Wechselfeuchte Tropen haben in ihrem Sommer Regenzeiten – ansonsten herrschen trockene Passatwinde vor. In den ariden Tropen liegt an über zehn Monaten die Verdunstung höher als die Niederschläge.

Tropischer Wirbelsturm

Wirbelsturm in tropischen Regionen, der sich über dem Meer bildet und schwere Verwüstungen anrichtet. Bekannte regionale Bezeichnungen sind: Hurrikan, Taifun, Zyklon oder Willy-Willy. Ihre Energie erhalten sie aus der Verdunstung über tropischen Meeren. Sie benötigen zur Entste-

hung eine Mindestwassertemperatur von annähernd 27 °C. Die Windstärken tropischer Wirbelstürme sind mit 120 bis über 250 km/h immer höher als ein Orkan mit Windstärke 12 der Beaufort-Skala, ihre Wirbel haben eine Ausdehnung von 200 bis 500 km.

Troposphäre

Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre, in der das Wettergeschehen stattfindet. Sie reicht am Äquator bis in 17 und an den Polen bis in 8 km Höhe. Die Temperaturen in dieser Schicht nehmen pro 100 m Höhe um etwa 0,6 °C ab. Über der Äquatorregion herrschen an der Grenze von Tropo- zur Stratosphäre Temperaturen von –80 °C und über den Polen –50 °C. Der Luftdruck verringert sich von durchschnittlich 1.013 hPa auf Meereshöhe auf 100 hPa (über dem Äquator) und 400 hPa (über den Polen). Der Übergang von Tropo- zur Stratosphäre ist die Tropopause.

Tsunami

Durch untermeerische Vulkanausbrüche, Erdbeben oder Erdrutsche verursachte Flutwelle. Tsunamis können sich über tausende Kilometer ausdehnen, bis zu 30 m hoch werden und ganze Küstenstreifen verwüsten. Tsumamis treten besonders an den Küsten des Pazifiks auf, ihre Entstehung wird dort von einem Tsunami-Warn-System überwacht.

Überkipfung

Überkippungen sind über 90 ° steilgestellte Gesteinsschichten. Die älteren Gesteinsschichten eines überkippten Gesteinsblockes liegen dann über den jüngeren.

Überschiebung

Eine Überschiebung ist eine Aufwärtsbewegung einer Gesteinsscholle relativ zu einer anderen. Im Gegensatz zu Auf- oder Abschiebungen liegen dabei aber die Neigungen der Bruchflächen, an denen die Gesteinspakete verschoben werden, flacher als 45 °. Überschiebungen entstehen bei tektonischen Einengungen.

Überweidung

Zerstörung der Vegetation besonders in Trockengebieten durch zu starke Beweidung bzw. zu hohen Tierbesatz. Überweidung führt zu Bodenerosion und Desertifikation.

UNEP

United Nations Environment Program. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen koordiniert alle Umweltschutzprojekte, an denen die UNO beteiligt ist, z. B. das IPCC.

Ultraviolettrahlung

Strahlen mit einer Wellenlänge zwischen 0,01 µm und 380 nm. Je nach Wellenlänge wird in UV-A, UV-B, UV-C und Extrem-UV unterschieden. UV-C und Extrem-UV sind für lebende Gewebe äußerst schädlich. Der in den Sonnenstrahlen enthaltene Anteil wird größtenteils von der Ozonschicht absorbiert. Die auf die Erde treffenden UV-A- und UV-B-Strahlen sind wichtige Energielieferanten, aber auch die Ursache für Sonnenbrand und Sonnenallergien.

Umweltfaktoren

Umweltfaktoren sind Organismen beeinflussende Faktoren, wie z. B. Klima, Boden, Wasser, Relief, Mensch, Tier und Pflanzen.

Unterlauf

Unterer Abschnitt eines Fließgewässers. Große Fließgewässer werden sehr grob in Ober-, Mittel- und Unterlauf eingeteilt. Der Unterlauf eines mittel-europäischen Flusses (z. B. Rhein) zeichnet sich durch niedrige Fließgeschwindigkeit, niedrigen Sauerstoffgehalt, Temperaturen zwischen ungefähr 18 bis 20 °C und schlammigen Untergrund aus. Der Unterlauf bildet ausge-dehnte Mäander.

Unterschiebung

Eine Unterschiebung ist das Untertauchen einer ozeanischen Kruste unter eine andere ozeanische oder kontinentale Kruste. Dieser Vorgang (Subduktion) findet an konvergierenden, sich aufeinander zu bewegenden Platten statt (Plattenkolli-sion). Die Zone einer solchen Unter-schiebung wird als Subduktionszone bezeichnet.

Unterschneidung

Natürliche oder künstliche Ausräu-mung von Material an einem Hang oder Ufer, die zum Abbrechen der unteren und Nachrutschen darüber liegender Hang- und Uferbereiche führen kann.

Vegetation

Gesamtheit aller Pflanzen, die in einem bestimmten Gebiet wachsen bzw. es bedecken.

Versalzung

Unter dem Begriff Versalzung versteht man alle Prozesse, die zu einem stei-genden Salzgehalt in Böden führen. In ariden Gebieten kommt es durch hohe Verdunstungsraten zum Aufsteigen von Grundwasser, wobei in Oberflä-

chennähe die Salze ausfallen. Salzanreicherungen treten aber ebenso in humiden Klima auf (z. B. durch Meerwasser).

Verstädterung

Prozess der Vergrößerung städtischer Räume nach Flächengröße und Einwohnerzahl bzw. der absoluten Zunahme an städtischen Siedlungen. Verstädterung ist ein in fast allen Staaten der Erde zu beobachtendes Phänomen.

Verwerfungen

Verwerfungen sind Trennfugen in Gesteinen oder Gesteinsschollen, an denen eine Verschiebung oder Verstellung stattgefunden hat. Verwerfungen liegen im Bereich von Zentimetern bis hin zu Kilometern. Ein anderer Ausdruck für Verwerfung ist Störung.

Verwitterung

Die Verwitterung ist der chemische, physikalische oder biologische Prozess, bei dem Gesteine, Mineralien und Böden aufbereitet, umgewandelt oder zerstört werden.

Vorfluter

Vorfluter sind natürliche oder künstliche Abflussbahnen. Vorfluter nehmen das Wasser kleinerer Flüsse auf und leiten es ihrerseits zu einem größeren Vorfluter ab.

Vorsorgemaßnahmen

Summe vorbeugender und vorbereitender Maßnahmen, die zur Verminderung eines Risikos und seiner Auswirkungen ergriffen werden.

Vorzeitklima

Das Vorzeitklima bezeichnet Klimaver-

hältnisse, die sich von den heutigen deutlich unterscheiden.

Vulkan

Ein Vulkan ist eine Stelle der Erdoberfläche, wo Magma aus dem Erdinneren an die Oberfläche tritt. Die austretenden Stoffe können fest, flüssig oder gasförmig sein.

Vulkanische Asche

Siehe → Aschen.

Vulkanismus

Vulkanismus ist die Bezeichnung für alle mit der Förderung von Magma an die Erdoberfläche verbundenen Vorgänge. Seine wichtigsten sichtbaren Erscheinungsformen sind die Vulkane.

Vulkanit

Vulkanite (Ergussgesteine, Effusivgesteine) sind eine Gruppe der magmatischen Gesteine. Sie entstehen, wenn Magma bis an die Erdoberfläche dringt und dort schnell abkühlt. Vulkanite besitzen daher immer ein sehr feinkörniges Gefüge, da für die Bildung großer Minerale keine Zeit besteht. Der häufigste Vulkanit ist der Basalt.

Vulkanschlot

Schlote sind die Aufstiegskanäle der Magmen in Vulkanen.

Waldbrandgefahrenstufe

US-amerikanische Einteilung der regionalen Waldbrandgefahr in fünf Gefahrenstufen (gering bis extrem). Die Waldbrandgefahrenstufen werden in einer täglich aktualisierten Karte eingetragen. Ihre Bestimmung basiert auf den Wetterprognosen von 1.500

Wetterstationen, die mit weiteren regionalen Faktoren verknüpft werden.

Waldbrandmonitoring

Weltweite Beobachtung der Ausbreitung und Auswirkung von Waldbränden mit Hilfe von Satelliten.

Waldgrenze

Grenzaum, in dem sich geschlossene Baumbestände (Wälder) aufgrund von widrigen Standortfaktoren auflösen. Die alpine Waldgrenze (in Gebirgen) ist bedingt durch niedrige Temperaturen und starke Winde, die polare ergibt sich ebenfalls durch niedrige Temperaturen und die kontinentale durch fehlende Niederschläge. Die Waldgrenze ist heute oft keine natürliche Linie mehr, sondern stark vom Menschen und der Nutzung durch den Menschen bestimmt. Die Waldgrenze leitet zur Baumgrenze über.

Waldsterben

Vom Menschen verursachtes oder mitverschuldetes Erkranken und Absterben von Wäldern. Das Waldsterben ist keine Folge direkter Beschädigung der Bäume, sondern einer Störung des Nährstoff- und Wasserhaushaltes bzw. der Bodenverhältnisse. Ursache ist im Wesentlichen die Luftverschmutzung. Verschiedene Hypothesen stellen dabei die dauernde Belastung mit geringen Mengen zahlreicher Schadstoffe, die Veränderung des Bodenhaushalts durch Säureniederschlag (saurer Regen) oder die giftige Wirkung des Ozons in den Vordergrund.

Warft

Auch Wurt genannter, künstlich angelegter Hügel in überschwemmungs-

oder flutgefährdeten Gebieten. Warften dienen als Siedlungsplatz für Einzel- oder Gruppensiedlungen. Die Siedlungen auf den Halligen im norddeutschen Wattenmeer sind auf Warften errichtet.

Wärmestrahlung

Siehe → Infrarotstrahlung.

Warmfront

Vordere Grenze warmer Luftmassen bzw. Vorderseite des Warmluftsektors beim Durchzug einer Zyklone. Der Durchzug einer Warmfront ist mit länger anhaltendem, feintropfigem Regen verbunden. Engt eine schneller vorrückende Kaltfront den Warmluftsektor bis zum Zusammenschluss mit der Warmfront ein, spricht man von einer Okklusion.

Warmzeit

Warmzeiten (oder Interglaziale) sind Zeitabschnitte, die zwei Kaltzeiten voneinander trennen. Sie besitzen ein wärmeres Klima, und es kommt in diesen Zeiten zu einem Abschmelzen des Eises.

Warven

Eine Warve ist eine aus hellen und dunklen Lagen bestehende Sedimentschicht in einem See. Die hellen Schichten enthalten Kalzitkristalle, die im Sommer abgelagert werden. Die Ablagerung der dunklen Schichten, die aus organischen Substanzen bestehen, findet im Winter statt. Eine Warve umfasst also den Zeitraum eines Jahres. Zählt man alle Warven aus, kann das Alter des Sedimentes bestimmt werden. Warven werden besonders in eiszeitlich geprägten Seen abgelagert.

Warvenchronologie

Warvenchronologie ist die Altersbestimmung anhand von geschichteten Seesedimenten (Warven).

Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt eines Gebietes wird durch die Einzelfaktoren Niederschlag, Verdunstung, Abfluss, Rücklage (z. B. Speicherung im Boden) und Verbrauch beschrieben.

Wasserkreislauf

Beschreibt schematisch die Bewegungen des Wassers zwischen den Kontinenten, Ozeanen und der Atmosphäre. Der Kreislauf beinhaltet Niederschlag, Verdunstung und Abfluss.

Wasserscheide

Die Wasserscheide ist die ober-, aber auch unterirdisch verlaufende Grenze zwischen zwei Einzugsgebieten von Flüssen. An der Wasserscheide trennen sich die Niederschläge, indem sie entweder dem einen oder anderen Fluss-System zugeführt werden. Die oberirdischen Wasserscheiden sind meist Berge, Kämme oder Berggrücken.

Watt

Das Watt ist der flache, phasenweise trockene Meeresbereich einer Gezeitenküste. Während der Ebbe fallen die Wattgebiete trocken, während der Flut werden sie wieder überschwemmt. Ebbe und Flut treten jeweils zwei Mal am Tag auf. Das Watt besteht aus einem 10 bis 20 m mächtigen Sedimentkörper aus Sand und Schlick, der nach der letzten Kaltzeit auf den Gletscherablagerungen abgelagert wurde.

Westwinddrift

Großräumige, globale Westwindströ-

mung, die für das vorherrschende Wandern der Zyklen in den mittleren Breiten nach Osten verantwortlich ist. Die Westwinddrift ist eingebettet in das erdumspannende Windsystem der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation.

Wetter

Das Wetter beschreibt die kurzfristigen Ereignisse und Veränderungen der meteorologischen Erscheinungen. Die Witterung hingegen ist die sich im jahreszeitlichen Rhythmus wiederholende charakteristische Abfolge dieser Erscheinungen. Das Klima ist der über einen längeren Zeitraum beobachtete mittlere Zustand der meteorologischen Erscheinungen.

Willy-Willy

Regionale Bezeichnung für tropische Wirbelstürme in Australien, die über dem Süd-West-Pazifik entstehen.

Windablagerung

Windablagerungen entstehen, wenn die Windgeschwindigkeit nicht mehr ausreicht, Materialien zu transportieren. Zu den Windablagerungen gehören die Dünen der Küstenbereiche und Trockengebiete, Flugsanddecken und Lössablagerungen. Generell haben Ablagerungen des Windes eine gute Sortierung.

Windabtragung

Die Windabtragung umfasst die Deflation und die Korrasion. Deflation ist die (meist flächenhafte) Abtragung des Untergrundes oder der Gesteinsoberflächen durch den Wind. Die Korrasion bezeichnet die mechanische Schleifwirkung des Sandes an Gesteinoberflächen.

Windhose

Deutsche Bezeichnung für einen Tornado. Auch in Deutschland bilden sich zwar selten, aber regelmäßig Tornados.

Windschliff

Der Windschliff oder die Korrasion bezeichnet die mechanische Schleifwirkung des Sandes an Gesteinoberflächen. Sie ist neben der Deflation (Abtragung durch Wind) eine Form der Windabtragung.

Wirbelsturm

Starke Luftwirbel unterschiedlicher Größe, die je nach Ausdehnung und Entstehung als tropische Wirbelstürme oder Tornados bezeichnet werden.

Witterung

Witterung ist die sich im jahreszeitlichen Rhythmus wiederholende charakteristische Abfolge meteorologischer Erscheinungen.

Worst-Case-Szenario

Ein Worst-Case-Szenario ist ein Berechnungsmodell, das von den schlimmsten Folgen ausgeht.

Wurt

Auch Warft genannter, künstlich angelegter Hügel in überschwemmungs- oder flutgefährdeten Gebieten. Warften dienen als Siedlungsplatz für Einzel- oder Gruppensiedlungen.

Wüsten

Wüsten sind vegetationslose oder vegetationsarme Gebiete, in denen Wassermangel (Trockenwüsten) oder ein Mangel an Wärme (Kälte-wüsten) herrscht. Für die Wüstenbildung gibt es sowohl klimatische als auch reliefbedingte Ursachen. Man unterscheidet deshalb Passatwüsten, Küstenwüsten, Reliefwüsten und kontinentale Wüsten. Nach den vorherrschenden Substrattypen werden Sandwüsten, Hamada und Serir unterschieden.

Zentraleruption

Eine Zentraleruption ist eine vulkanische Ausbruchstätigkeit, die von einem Punkt ausgeht. Im Gegensatz dazu stehen Lineareruptionen, bei denen die Ausbruchsstellen auf einer Linie angeordnet sind, und Arealeruptionen, die auf eng begrenzten

Flächen mit mehreren Austrittsstellen stattfinden.

Zweifarbg-Geodimeter

Messgerät in der Erdbebenvorhersage zum Erfassen schleichend langsamer Erdbewegungen, die als Warnhinweise für drohende Erdbeben gelten. Mithilfe zweier verschiedenfarbiger Laser können auf einer Strecke von 1 bis 12 km Verformungen auf 0,5 mm genau ermittelt werden.

Zyklon

Regionale Bezeichnung für tropische Wirbelstürme (Bengalen-Zyklon oder Mauritius-Zyklon), die über dem indischen Ozean entstehen.

Zyklone

Wandernder Tiefdruckwirbel in den mittleren Breiten. Sie sind für das wechselhafte Wetter in Mitteleuropa ausschlaggebend und bilden sich an der Grenze kalter und warmer Luftmassen. Der Durchzug einer Zyklone beginnt in kälteren Luftmassen mit einer Warmfront und anschließendem Warmluftsektor, gefolgt von einer Kaltfront mit anschließender Kaltluft.

“This page left intentionally blank.”

A	Elemente 5 Aktionsplan 232 Allerheiligenflut 124 Anatol 92 Arche 6 Armada 89 Aschenstrom 39 Aschenvulkan 34 Atmosphäre 155, 158, 160 Auenwälder 144 Aufforstung 72 Azoren 89	Großbritannien 141 El Niño 157, 172, 175, 180, 187 Emission 159, 166 Emissionshandel 167 Energieverbrauch 170 Hamburg-Flut 122 ENSO-Phänomen 173, 186 Entwicklungsländer 120, 143, 149, 170 Epizentrum 22, 26 Erdachse 155 Erdbeben 16, 18, 48, 56, 62, 215, 239 Erdbebenintensität 23 Bam 21 Bangladesch 120, 137, 189 Bauland 64 Beaufort-Skala 93 Bergrettung 78 Bergrutsch 63 Besiedlung 71, 135 Bewässerung 192 Blanker Hans 122 Blizzard 98 Boden 63, 192 Bodenkriechen 63 Bodennutzung 143 Bodenversatz 28	Grote Mandränke 124 H Halligen 128 Halligflut 124 Hangneigung 79 Hangstabilität 64, 72 Hawaii 33, 41, 56 Helgoland 128 Hitzewelle 152, 190, 197, 238 Hochdruckgebiet 89, 92, 182 Hochwasser 134, 143, 215, 224 Bauen 31 Hochwasserschutz 122, 143, 146, 149, 232 Hochwasserwarnung 149 Erdbebenzone 17 Erdrutsch 62, 177, 216 Erosion 64 Eruption 5, 38 Eruptionsäule 39 Evakuierung 46, 108, 109, 133, 224, 234	Landwirtschaft 138, 159, 161, 195 La Niña 173 Laufzeit 22 Lava 33, 39 Linearvulkan 34 Lawine 68, 74, 81, 177, 216 Lawinen-Airbag 75 Lawinengefahr 79, 82 Lawinenhund 78 Lawinenrettung 75 Lawinenschutz 81 Lawinenwarnung 75 Lissabon 55 Liquefaktion 26 Lockerschneelawine 77 Lothar 92, 96, 215, 229 Love-Wellen 22 Luciaflut 124 Luftdruck 90, 102, 106, 109, 174, 182 Luftmassen 92, 113, 185	Missernten 181, 195 Mississippi 136 Mitch 71 Mittelmeer 58, 202 Mittelozeanische Rücken 17, 33 Moment-Magnitude 25 Monsun 6, 172, 176, 183 Monsunregen 185, 191 Mount St. Helens 36, 40 Multivortex-Tornado 114	
B	Ballungsräume 9, 28, 143 Bam 21 Bangladesch 120, 137, 189 Bauland 64 Beaufort-Skala 93 Bergrettung 78 Bergrutsch 63 Besiedlung 71, 135 Bewässerung 192 Blanker Hans 122 Blizzard 98 Boden 63, 192 Bodenkriechen 63 Bodennutzung 143 Bodenversatz 28	Erdbeben 16, 18, 48, 56, 62, 215, 239 Erdbebenintensität 23 Hochwasser 134, 143, 215, 224 Bauen 31 Hochwasserschutz 122, 143, 146, 149, 232 Hochwasserwarnung 149 Erdbebenzone 17 Erdrutsch 62, 177, 216 Erosion 64 Eruption 5, 38 Eruptionsäule 39 Evakuierung 46, 108, 109, 133, 224, 234	Kanalisierung 135 Kaschmir 18 Katastrophe 9, 48, 68, 125 Katastrophenschutz 11, 199, 226 Katastrophentourismus 235 Katastrophenvorsorge 31, 226, 230 Katrina 102, 105, 108 Kipppunkte 165 Kleine Eiszeit 155, 156, 188 Klima 154, 166, 205 Klimgeschichte 155 Klimakatastrophe 152 Klimamodell 161, 163, 183 Klimaprognoze 163 Klima-Risiko-Index 153 Klimaschutz 165, 169, 170 Klimawandel 73, 93, 102, 121, 132, 139, 154, 166, 188, 195 I Indien 185 Indischer Ozean 55, 58 Fernwelle 121, 129 Feuerökologie 208 Feuerwehr 206, 226 Feuchtgebiete 160 Fluss 134 Flussau 135, 145 Flussbegradigung 135 Flut 121 Fossile Brennstoffe 163 Frühwarnsystem 45, 56, 72, 100, 146, 226 Fujita-Skala 114 Fujiyama 34 G Galtür 82, 83 Galveston 125, 238 Gansu 21	Kanalisierung 135 Kaschmir 18 Katastrophe 9, 48, 68, 125 Katastrophenschutz 11, 199, 226 Katastrophentourismus 235 Katastrophenvorsorge 31, 226, 230 Katrina 102, 105, 108 Kipppunkte 165 Kleine Eiszeit 155, 156, 188 Klima 154, 166, 205 Klimgeschichte 155 Klimakatastrophe 152 Klimamodell 161, 163, 183 Klimaprognoze 163 Klima-Risiko-Index 153 Klimaschutz 165, 169, 170 Klimawandel 73, 93, 102, 121, 132, 139, 154, 166, 188, 195 I Indien 185 Indischer Ozean 55, 58 Fernwelle 121, 129 Feuerökologie 208 Feuerwehr 206, 226 Feuchtgebiete 160 Fluss 134 Flussau 135, 145 Flussbegradigung 135 Flut 121 Fossile Brennstoffe 163 Frühwarnsystem 45, 56, 72, 100, 146, 226 Fujita-Skala 114 Fujiyama 34 G Galtür 82, 83 Galveston 125, 238 Gansu 21	Kanalisierung 135 Kaschmir 18 Katastrophe 9, 48, 68, 125 Katastrophenschutz 11, 199, 226 Katastrophentourismus 235 Katastrophenvorsorge 31, 226, 230 Katrina 102, 105, 108 Kipppunkte 165 Kleine Eiszeit 155, 156, 188 Klima 154, 166, 205 Klimgeschichte 155 Klimakatastrophe 152 Klimamodell 161, 163, 183 Klimaprognoze 163 Klima-Risiko-Index 153 Klimaschutz 165, 169, 170 Klimawandel 73, 93, 102, 121, 132, 139, 154, 166, 188, 195 I Indien 185 Indischer Ozean 55, 58 Fernwelle 121, 129 Feuerökologie 208 Feuerwehr 206, 226 Feuchtgebiete 160 Fluss 134 Flussau 135, 145 Flussbegradigung 135 Flut 121 Fossile Brennstoffe 163 Frühwarnsystem 45, 56, 72, 100, 146, 226 Fujita-Skala 114 Fujiyama 34 G Galtür 82, 83 Galveston 125, 238 Gansu 21	N Nachhaltigkeit 11 Naturereignisse 5, 234 Naturkatastrophe 125, 229 Nevado del Ruiz 36, 46, 68 New Madrid 19 New Orleans 103, 108 Niederlande 121 Niederschlag 135, 140, 185, 189 Nordatlantikstrom 165 Nordatlantische Oszillation (NAO) 182 Nordsee 122, 124, 128, 132 Notstand 202
D	Deccan Trapp 35 Deich 123, 129, 131, 134, 140, 145 Desertifikation 196 Deutschland 214 Dopplerradar 117 Dürre 172, 176, 190	Fluss 134 Flussau 135, 145 Flussbegradigung 135 Flut 121 Fossile Brennstoffe 163 Frühwarnsystem 45, 56, 72, 100, 146, 226 Fujita-Skala 114 Fujiyama 34 G Galtür 82, 83 Galveston 125, 238 Gansu 21	Korallen 179 Krakatau 35, 37, 49 Island 32, 33, 40, 89 Isobaren 90 Izmit 28	Korallen 179 Krakatau 35, 37, 49 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Intensität 17 (Erdbeben) 23 IPCC 160, 163, 170, 200 Island 32, 33, 40, 89 Isobaren 90 Izmit 28	Korallen 179 Krakatau 35, 37, 49 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Intensität 17 (Erdbeben) 23 IPCC 160, 163, 170, 200 Island 32, 33, 40, 89 Isobaren 90 Izmit 28	
E	Eifelvulkane 47 Eisvulkan 38 Eiszeit 154 Elbe 137, 143 Elbeflut 139, 140	Fujiyama 34 J Jahrhundertflut 139, 140, 141, 236 Jahrtausendflut 137 Japan 27, 33, 59 Jetstream 90, 103, 177 Julianenflut 124, 128	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39	
F	Fernwelle 121, 129 Feuerökologie 208 Feuerwehr 206, 226 Feuchtgebiete 160 Fluss 134 Flussau 135, 145 Flussbegradigung 135 Flut 121 Fossile Brennstoffe 163 Frühwarnsystem 45, 56, 72, 100, 146, 226 Fujita-Skala 114 Fujiyama 34 G Galtür 82, 83 Galveston 125, 238 Gansu 21	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39	Kohlendioxid 158, 161, 166, 167 Kollision 19 Kontinentalplatte 17, 54 Konvektionsströme 17 Korallen 179 Kriechlawine 77 Küste 55, 106, 120, 125, 135, 149 Küstenschutz 128, 132 Kyoto-Protokoll 167, 169 Kyrill 88, 94, 99, 215, 228 Lahar 39		
O	Oberflächenwellen 22, 121 Oberrheingraben 20 Oder 137 Orkan 89, 99, 122, 227 Ozeanische Platte 17	Oberflächenwellen 22, 121 Oberrheingraben 20 Oder 137 Orkan 89, 99, 122, 227 Ozeanische Platte 17	Oberflächenwellen 22, 121 Oberrheingraben 20 Oder 137 Orkan 89, 99, 122, 227 Ozeanische Platte 17	Oberflächenwellen 22, 121 Oberrheingraben 20 Oder 137 Orkan 89, 99, 122, 227 Ozeanische Platte 17		
P	Parkfield 29 Pazifik 172, 176 Pazifischer Feuer-	Parkfield 29 Pazifik 172, 176 Pazifischer Feuer-	Parkfield 29 Pazifik 172, 176 Pazifischer Feuer-	Parkfield 29 Pazifik 172, 176 Pazifischer Feuer-		

ring 17, 32, 54	Seismoskop 24	Tourismus 64	Wärmestrahlung
Pegel 121, 133, 146	Sichuan 16, 236	Tornado 113, 117, 218	158
Permafrost 73	Siedlungen 9	Tornadofolgen 115	Warmzeit 155
Phreatomagmatische Eruption 35	Sintflut 5	Transformstörung	Warnstufe 117
Pinatubo 37, 44	Southern Oscillation 174	Transversalwellen	Wassermangel 192, 196
Passat 173, 175	Spalteneruption 35	20	Wassertemperatur 101
Plattengrenze 19, 33	Sperrwerk 130, 131	Treibhauseffekt 158	Weihnachtshochwasser 136
Plattentektonik 17	Starkregen 170, 225	Treibhausgas 159,	Wellen 55
Plinianische Eruption 38	Staublawine 77	161, 167	Wetterdaten 91, 109, 225
Polder 144	Staunässe 67	Treibhauswirkung	Wetterextreme 141, 153, 157
Pompeji 40	Steinlawine 63	159	Wetterlage 78, 97, 225
Primärwellen 20	Stormchaser 118	Trittschäden 66	Wetterkarte 90, 96
Pyroklastischer Strom 39	Stratosphäre 160	Trockenheit 176,	Wettersatelliten 100
R	Stratovulkan 34	191, 199	Wiederkehrperioden 30
Rayleigh-Wellen 22	Stromboli 38	Trombe 117	Wildverbiss 67
Regenwald 160, 204	Strombolianische Eruption 38	Tropen 177	Wind 90, 101, 203
Rhein 135, 139, 146, 214	Strong-Motion-Sensor 24	Tropischer Wirbelsturm 101, 106, 125, 238	Windbruch 95
Richter-Skala 25	Sturmflut 120, 124, 128, 132, 224	Tsunami 35, 48 ff., 230	Windgeschwindigkeit 88, 92, 99, 115
Risikokarten 98	Sturmflutwarnung	Tsunami-Frühwarnsystem 57, 230	Windhose 113
Rodung 64	123, 130, 133	Türkei 19	Windstau 121
Rückhalteraum 144	Sturmflutwehr 130	U	Wintersturm 88, 92, 98, 132, 135, 183, 228
Rückkopplung 160, 175	Sturmschäden	Überschwemmung	Wirbelsturm 103, 106, 117, 218
Rungholt 125	95, 99	56, 109, 123, 125, 134, 143, 170, 214, 238	Y
S	Sturmschutzkeller	Überweidung 192	Yangtse 135, 143
Saffir-Simpson-Skala 106	115	V	
Sahel-Zone 191	Sturmtief 89, 93, 146	Vajont-Tal 70	Z
Sandbox 128	Sturmwarnzentrale 133	Vb-Wetterlage 140	Zyklon 101
Sandvorspülung 128	Subduktion 19, 32, 54	Vereisung 154	Zugbahn 103
San Francisco 24, 29	Sumatra 48, 57	Verhalten 235, 239	
Santorini 36	Sylt 128	Versicherung 236	
Schadstoffe 204	T	Verwerfung 17	
Schichtvulkan 34	Taifun 101	Vesuv 34, 36, 40	
Schildvulkan 33	Taifun „Tip“ 104	Vorhersage 30, 45, 100, 109, 117, 146, 179, 196, 225	
Schlackenvulkan 34	Talsperre 70	Tambora 37, 41	
Schnee 75, 98	Tektonische Störung	Tektonische Störung 20	
Schneedecke 78, 81	20	Temperatur 157, 190	
Schneebrett-lawine 77	Tephra 39	Tephra 39	
Schneeschmelze 71, 138	Terrasse 144	Terrasse 144	
Schuttlawine 63	Tiefdruckgebiet 89, 97, 140, 182, 214	Tiefdruckgebiet 89, 97, 140, 182, 214	
Schuttrutschung 63	Tide 121, 129	Tide 121, 129	
Seismisches Moment 25	Tidenhub 121	Tidenhub 121	
Seismogramm 22	Thames Barrier 124, 225	Thames Barrier 124, 225	
Seismograph 24, 45	Toba 5	Toba 5	
		Waldbrand 175, 196, 197, 202, 210	
		Waldbrandgefahrindex 207	
		Waldsterben 67	
		Warften 129	

GNU Free Documentation License

Copyright (C) 2000,2001,2002
Free Software Foundation, Inc.
51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA
Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of
this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document „free“ in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others. This License is a kind of „copyleft“, which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The „Document“, below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as „you“. You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A „Modified Version“ of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A „Secondary Section“ is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document’s overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The „Invariant Sections“ are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The „Cover Texts“ are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A „Transparent“ copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not „Transparent“ is called „Opaque“.

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The „Title Page“ means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, „Title Page“ means the text near the most prominent appearance of the work’s title, preceding the beginning of the body of the text.

A section „Entitled XYZ“ means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as „Acknowledgements“, „Dedications“, „Endorsements“, or „History“.) To „Preserve the Title“ of such a section when you modify the Document means that it remains a section „Entitled XYZ“ according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute

a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3. You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.

F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.

G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.

H. Include an unaltered copy of this License.

I. Preserve the section Entitled „History”, Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled „History” in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.

J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the „History” section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.

K. For any section Entitled „Acknowledgements” or „Dedications”, Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.

L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.

M. Delete any section Entitled „Endorsements”. Such a section may not be included in the Modified Version.

N. Do not retitle any existing section to be Entitled „Endorsements” or to conflict in title with any Invariant Section.

O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled „Endorsements”, provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination

all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers. The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled „History” in the various original documents, forming one section Entitled „History”; likewise combine any sections Entitled „Acknowledgements”, and any sections Entitled „Dedications”. You must delete all sections Entitled „Endorsements”.

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an „aggregate” if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation’s users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document’s Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled „Acknowledgements”, „Dedications”, or „History”, the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License „or any later version” applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled „GNU Free Documentation License”.

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the „with...Texts.” line with this: with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.