



Nadja Podbregar  
Dieter Lohmann

# Im Fokus: Natur- katastrophen

Zerstörerische Gewalten  
und tickende Zeitbomben

SACHBUCH



Springer Spektrum

**Naturwissenschaften im Fokus**

Reihenherausgeber

Harald Frater

Nadja Podbregar · Dieter Lohmann

# Im Fokus: Naturkatastrophen

Zerstörerische Gewalten und tickende  
Zeitbomben

Mit Beiträgen von Roman Jowanowitsch und  
Ansgar Kretschmer



**Springer** Spektrum

### *Autoren*

Nadja Podbregar  
MMCD NEW MEDIA GmbH Film-  
und Medienproduktion  
Düsseldorf, Deutschland  
redaktion@scinexx.de

Dieter Lohmann  
MMCD NEW MEDIA GmbH Film-  
und Medienproduktion  
Düsseldorf, Deutschland  
redaktion@scinexx.de

ISBN 978-3-642-41896-9

ISBN 978-3-642-41897-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-41897-6

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 dürften.

*Planung und Lektorat:* Frank Wigger, Meike Barth

*Einbandabbildung:* © Fotolia

*Einbandentwurf:* deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Naturereignisse – Prägend für uns und unseren Planeten</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Erdbeben – Wenn der Untergrund bockt</b>	<b>5</b>
	Eine folgenreiche Katastrophe – das Tohoku-Beben	5
	Verhaktes Gestein an den Nähten der Erde	8
	Überraschungen im Japan-Graben	9
	Beben verändern den Planeten	11
	San Andreas, Haiti und Co – Beben an Transformstörungen	12
	Weitab der Kontinentränder – Intraplattenbeben	15
	Eine Frage der Skalen: Wie messe ich ein Erdbeben?	16
	Pudding in einer Schüssel – Warum der Untergrund so wichtig ist	18
	Gefahr für Los Angeles	20
	Kann man Erdbeben vorhersagen?	21
<b>3</b>	<b>Tsunami – Tödliche Wassermassen in Bewegung</b>	<b>25</b>
	Anatomie einer Katastrophe	25
	Japan: Doppelte Zerstörungskraft durch verschmolzene Wellenberge	27
	Die Auslöser: Beben, Vulkanausbrüche ...	29
	... und gewaltige Rutschungen	31
	Tsunami-Gefahr für Jamaika und Los Angeles?	33
	Nach dem Feuer kommt das Wasser – Tsunami durch Einschlag	34

	Frühwarnsysteme: Überwachung durch Bojen, Sensoren und Satelliten . . . . .	36
	GPS warnt noch genauer . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Feuer und Eis – Die Gletschervulkane Islands</b> . . . . .	41
	Aus Feuer geboren . . . . .	41
	Auseinander gezerrt von gewaltigen Kräften . . . . .	42
	Feuer am „Tor zur Hölle“ – der Vulkan Hekla . . . . .	44
	Ein Vulkan legt Europa lahm . . . . .	46
	Bardarbunga und Grimsvötn – verborgenes Feuer unter dem Eis . . . . .	48
	Der große Jökulhlaup . . . . .	51
	Leben im Schatten der Gefahr . . . . .	53
	Reykjavik in Gefahr? Unruhige Erde unter der Hauptstadt . .	54
<b>5</b>	<b>Feuerberge – die Basics</b> . . . . .	57
	Eine Frage der Lage . . . . .	57
	Der Klassiker: die plinianische Eruption eines Schichtvulkans	59
	Pyroklastischer Strom: eine rasende Wolke aus Glut und Asche . . . . .	60
	Phreatische Explosionen – fatale Kombination aus Wasser und Glut . . . . .	63
	Schildvulkane: steter Glutstrom auf Hawaii . . . . .	64
	Klimafolgen: Wenn der vulkanische Winter kommt . . . . .	66
	Frühwarnung: Detektivarbeit am Feuerberg . . . . .	68
	Wenn nur die Flucht bleibt . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Eifelvulkane – heißes Magma unter Maar &amp; Co</b> . . . . .	73
	Apokalypse am Laacher See – der Ausbruch . . . . .	73
	Ein Tsunami am Rhein? . . . . .	76
	Regengüsse und Schlammlawinen – die Klimafolgen der Eruption . . . . .	78
	Trockene und nasse „Rülpser“ – das Funktionsprinzip der Eifelvulkane . . . . .	79
	Idylle mit feuriger Vergangenheit . . . . .	80
	Wie realistisch ist ein neuer Vulkanausbruch? . . . . .	82

<b>7</b>	<b>Supervulkane – Gefahr im Untergrund</b> . . . . .	85
	Trügerische Idylle in den Rocky Mountains . . . . .	85
	Überdruck im Magmakessel . . . . .	87
	Yellowstone: Höllenregen aus Lava und Asche . . . . .	89
	Vulkanischer Winter und Massensterben – die globalen Folgen . . . . .	90
	Dekkan-Trapp: Tötete ein Supervulkan die Dinosaurier? . . . . .	91
	Die Katastrophe kommt alle 600.000 Jahre . . . . .	92
	Überwachung – Wann ist es soweit? . . . . .	94
	Es kann sehr schnell gehen . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Erdrutsche – wenn der Hang den Halt verliert</b> . . . . .	99
	Veltlin und Nachterstedt – zwei Fallbeispiele . . . . .	99
	Rutschung ist nicht gleich Rutschung . . . . .	102
	Ursachen und Auslöser: Was Hänge ins Rutschen bringt . . . . .	103
	Menschliches Verschulden: der Fall Vajont . . . . .	105
	Erdrutschforschung: mit Plastikkugeln und Riesenkondomen . . . . .	108
	Vorbeugung: Schutzbauten, Wälder und Sperrzonen . . . . .	110
	Frühwarnsysteme: Ohr am Boden . . . . .	111
	Düstere Aussichten: Erdrutsche, Bevölkerungswachstum und der Klimawandel . . . . .	114
<b>9</b>	<b>Lawinen – der „weiße Tod“</b> . . . . .	117
	Mount Everest: tödliche Schneemassen aus dem Nichts . . . . .	117
	Ursachen: Wie entsteht eine Lawine? . . . . .	118
	Lawinenarten: von rasend schnell bis langsam kriechend . . . . .	121
	Lawinenforschung: Blick in die Feinheiten des Schnees . . . . .	122
	Schadensbegrenzung: Bollwerke gegen den Schnee . . . . .	124
	Lawinenrettung: Der Tod wartet nur 15 Minuten . . . . .	127
<b>10</b>	<b>Feuriges Inferno – Wald- und Buschbrände</b> . . . . .	129
	Australien: Feuer im Outback . . . . .	129
	Russland: Torf und Taiga in Flammen . . . . .	132
	Ursachenforschung: Zufall oder Klimawandel? . . . . .	133
	Feuer mit Absicht: Brände als Mittel der Landschaftsgestaltung . . . . .	135
	Lokales Ereignis – globale Folgen? . . . . .	138

	Bekämpfung: warnen, finden, löschen . . . . .	139
	Fluch und Segen für das Ökosystem . . . . .	142
<b>11</b>	<b>Hurrikans, Taifune und Co – Tropische Wirbelstürme . .</b>	<b>145</b>
	Hurrikan Sandy – der Supersturm . . . . .	145
	Feuchte Luft und warme Meere – die Ursachen . . . . .	148
	Kategorie 1–5: Die Klassifizierung von Wirbelstürmen . . . . .	151
	Klimawandel: Mehr Superstürme und mehr Regen . . . . .	152
	Wirbelstürme bald weiter im Norden . . . . .	154
	Der beste Schutz: die rechtzeitige Vorhersage . . . . .	155
	Evakuierung: Wenn nur die Flucht bleibt . . . . .	157
<b>12</b>	<b>Tornados – klein, aber zerstörerisch . . . . .</b>	<b>159</b>
	Das Rezept für einen Tornado . . . . .	159
	Tornados sprengen die Beaufort Skala . . . . .	162
	Tornadogefahr auch bei uns . . . . .	164
	Vorhersage schwierig: die Arbeit der Sturmjäger . . . . .	166
<b>13</b>	<b>Winterstürme – zerstörerische Tiefs der mittleren Breiten</b>	<b>169</b>
	Die Entstehung: Sturmküche über dem Atlantik . . . . .	169
	„Christian“ – ein Schnellläufer überrennt Europa . . . . .	171
	Stürme in Serie . . . . .	172
	Klimawandel: Mehr Winterstürme, weniger Polartiefs? . . . . .	173
	Nordsee: Sturm als Küstenschutz? . . . . .	175
	Blizzards: Stürme mit Schnee und Eis . . . . .	176
	Vorbeugung: Sturmkarten und Vorhersagen . . . . .	177
<b>14</b>	<b>Sturmfluten – wenn das Wasser kommt . . . . .</b>	<b>179</b>
	Die große Flut: „Land unter“ in Hamburg . . . . .	179
	Ursachen: Wenn Flut und Wind sich treffen . . . . .	181
	Wenn tropische Wirbelstürme das Meer treiben . . . . .	183
	Landschaftsgestalter: Wie Jadebusen und Dollart entstanden . . . . .	185
	Küstenschutz: Bollwerke gegen die Flut . . . . .	186
	Könige des Küstenschutzes – die Niederlande und das Deltaplanprojekt . . . . .	189
	Sturmflutwarnung – wie geht das? . . . . .	190
	Sturmfluten im Zeichen des Klimawandels . . . . .	191



<b>15</b>	<b>Gefährliche Fluten – Hochwasser und Überschwemmungen</b>	193
	Land Unter in Mitteleuropa: Das Hochwasser vom Juni 2013	193
	Weltweites Phänomen	196
	Die Ursachen: Stürme, Regen und Schneeschmelze	197
	Wann wird ein Hochwasser zur Katastrophe?	198
	Mehr Wetterextreme, mehr Jahrhundertfluten?	200
	Hochwasserschutz: Auen, Deiche, Polder und Co	202
	Risikogebiete: Das Problem der Bebauung	204
	Die Flut kommt – Frühwarnsysteme als letzte Rettung	205
	<b>Sachverzeichnis</b>	209
	<b>License: creative commons – Attribution-ShareAlike 3.0</b>	
	<b>Unported</b>	215

---

# Naturereignisse – Prägend für uns und unseren Planeten

1

Nadja Podbregar

Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüche oder Stürme haben die Entwicklung der Erde dramatisch beeinflusst. Aber auch die Geschichte des Menschen ist durch die Naturgewalten geprägt. Ihre Spuren finden sich in unseren Mythen und Sagen, aber auch in historischen Ereignissen von Kriegen bis hin zum Untergang ganzer Reiche. Und auch wenn wir heute nicht mehr Götter oder übernatürliche Mächte als ihre Auslöser sehen: Naturereignisse gehören weiterhin zu den Phänomenen unseres Planeten, die für uns unbeherrschbar und meist auch unbezähmbar sind.

Unsere Vorfahren glaubten im Beben der Erde, in Blitzschlägen, Donner oder plötzlichen Fluten den Zorn der Götter zu erkennen, in ersehnten Regenfällen die Antwort auf ihre Gebete. Viele solcher Ereignisse gingen in die Erzählungen der Völker ein oder tauchen in religiösen Überlieferungen wieder auf. Das vielleicht bekannteste Beispiel für eine mythische Katastrophe mit einem vielleicht realen Kern 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 unklar, ob und welche realen Naturereignisse diese Geschichten beschreiben. Die Erklärungsmodelle für die biblische Sintflut reichen von Vulkanausbrüchen über Meteoriteneinschläge und Tsunamis bis zu Klimaveränderungen.

Aber auch später, in historischer Zeit, beeinflussten Naturereignisse wie Stürme oder Regenfälle immer wieder den Lauf der Geschichte, ent-

schieden Schlachten oder ließen Invasionen misslingen. Beispiele dafür finden sich in Japan, Russland, England, aber auch direkt vor unserer Haustür. So haben wahrscheinlich heftige Stürme und anhaltende Regenfälle im 9. Jahrhundert nach Christus zum Sieg der Germanen über die Römer in der Varusschlacht beigetragen. Im 13. Jahrhundert rettete ein Taifun Japan vor der Invasion durch die Mongolen unter Kublai Khan. Er versenkt weit mehr als tausend Schiffe der zu dieser Zeit von Kublai Khan regierten Chinesen und der mit ihnen verbündeten Koreaner in der Bucht von Hakata. Der Mongolenherrscher brach daraufhin seinen Invasionsversuch ab. Ohne diesen „göttlichen Wind“ hätte Japan möglicherweise den Eroberern nicht widerstehen können.

Ohne einen großen Orkan im Sommer 1588 sähen auch die Landkarten und Geschichtsbücher Europas heute vermutlich ganz anders aus. Denn dieser Sturm 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 Francis Drake ausgeliefert, die sich mit ihren leichteren, seetüchtigeren Schiffen durch den Sturm gewagt hatten. Die Schlacht gewann Drake, die spanische Armada war verloren. Diese Beispiele zeigen, wie eng der Mensch, seine Geschichte, aber auch Kultur mit der Natur und den Naturkatastrophen verbunden ist.

Heute wissen wir, dass nicht überirdische Mächte, sondern die Natur für Erdbeben, Vulkanausbrüche oder Stürme verantwortlich ist. Aber noch immer sind wir diesen Naturereignissen 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. 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 sie ernsthafte Schäden anrichten. 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.“

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.

---

# Erdbeben – Wenn der Untergrund bockt

## 2

Nadja Podbregar

Plötzlich ist alles anders: Der sonst so stabile und feste Untergrund schüttelt, rollt und bockt, Gebäude schwanken und stürzen ein, der Boden verflüssigt sich oder reißt auf und überall fliegen Trümmer umher. Erdbeben gehören zu den bedrohlichsten und angsteinflößendsten Naturkatastrophen, denn sie reißen uns buchstäblich den Boden unter den Füßen weg. Wie verheerend die Folgen solcher Beben sein können, zeigen Katastrophen in Chile, Haiti und nicht zuletzt auch Fukushima. Wo sich solche Erdbeben ereignen, ist dabei kein Zufall: Sie häufen sich überall dort, wo die Kruste unseres Planeten Schwachstellen aufweist.

---

### Eine folgenreiche Katastrophe – das Tohoku-Beben

11. März 2011. Es ist 14:45 Uhr Ortszeit auf der japanischen Hauptinsel Honshu. In den Küstenstädten der Präfektur Miyagi gehen die Menschen wie immer ihrem Alltag nach. Die Mittagspause ist vorbei, in Büros, Läden und Behörden wird wieder ganz normal gearbeitet. Auch die Angestellten in dem direkt an der Meeresküste liegenden Atomkraftwerk Fukushima absolvieren ihre Schicht wie immer. Dass dieser Tag Geschichte schreiben wird, ahnt hier noch niemand. Doch vor der Küste, gut 200 Kilometer vor die Ostküste von Honshu, braut sich etwas zusammen. Hier verläuft der Japangraben, die Plattengrenze zwischen der Eurasischen Platte und der Pazifischen Erdplatte, die langsam aber stetig gen Westen wandert. Vor der japanischen Küste wird sie in die Tiefe gedrückt, schiebt sich unter die Eurasische Platte. Das allerdings funktio-

niert nicht reibungslos, das Gestein verhakt sich, gewaltige Spannungen entstehen. Sie entladen sich immer wieder in Erdbeben.

Das alles ist den Menschen in Japan bekannt, sie haben gelernt, mit dem immer wieder erzitternden Untergrund zu leben. Erdbebensicheres Bauen, Warnsysteme für Erdbeben und Tsunamis, alljährliche Katastrophenschutz-Übungen – das alles gehört für sie längst zum Alltag. Während ihre Vorfahren noch glaubten, dass ein gewaltiger, im Schlamm des Untergrunds lebender Wels, der „Namazu“, durch seinen Unmut die Erde erschüttert, sind die Japaner von heute aufgeklärt. Sie wissen um die Plattengrenzen, die Störungen im Untergrund, die sich aufbauenden Spannungen. Doch die ständige Bedrohung stumpft auch ab, die Gefahr wird verdrängt.

14:46 Uhr Ortszeit, 129 Kilometer vor der Küste, auf der Höhe der Millionenstadt Sendai. 24 Kilometer unter dem Meeresboden löst sich mit einem gewaltigen Ruck das verhakte Gestein der Plattengrenze. Die dabei freigesetzte Energie sendet eine erste seismische Wellenfront aus. Diese rasend schnellen Primärwellen (P-Wellen) benötigen nur Sekunden, bis sie die Küste erreichen und weniger als eine Minute, bis sie im rund 350 Kilometer entfernten Tokio ankommen. Dicht auf den Fersen sind ihnen die zerstörerischen, seitwärts schwingenden Sekundärwellen (S-Wellen) – sie sind es, die die größten Schäden verursachen. Noch während die ersten Bebenwellen die Küste erreichen, reagieren überall die Warnsysteme. Notabschaltungen stoppen Gas- und Stromleitungen, Ampeln schalten auf Rot. Das schwerste Erdbeben der jüngeren japanischen Geschichte zerstört zahlreiche Häuser und Straßen, die Menschen fliehen in Panik aus den Gebäuden.

Doch es ist noch nicht vorbei, das Schlimmste kommt erst noch. Denn das plötzliche Auf- und Abschnellen des Meeresbodens hat seine gewaltige Energie auch an das darüber liegende Wasser übertragen. In einer sich kreisförmig ausbreitenden Welle rast nun auch ein Tsunami vom Bebenzentrum aus über den Pazifik. Sofort schlägt das Tsunamiwarnsystem Alarm. Doch für die Menschen entlang der nur 129 Kilometer entfernten Küste Japans kommt die Warnung zu spät. Schon rund eine halbe Stunde nach dem Erdbeben trifft die bis zu zehn Meter hohe Wasserwalze auf die Küste. Kilometerweit dringt der Tsunami in das Landesinnere ein und macht große Teile der Präfektur Miyagi dem Erdboden gleich. Und noch in der knapp 14.000 Kilometer entfernten Antarktis



Nach dem Tohoku-Erdbeben und Tsunami vom 11. März 2011: zerstörte Häuser und Fahrzeuge in der Präfektur Iwate (© US Navy/Matthew M. Bradley)

bricht die Flutwelle Eisberge von der zweifachen Größe Manhattans vom Schelfeis ab.

In Japan ist die Bilanz des Tohoku-Bebens und des darauffolgenden Tsunamis verheerend: Mehr als 15.000 Menschen sind tot, von 2600 weiteren wurden die Leichen bis heute nicht gefunden. In den Präfekturen Miyagi, Iwate und Fukushima wurden weit über hunderttausend Gebäude dem Erdboden gleichgemacht, weitere rund 750.000 wurden teilweise zerstört. Beben, Tsunami und über 200 Erdrutsche zerstörten Straßen, Brücken und Eisenbahnlinien, einige sind bis heute noch nicht wieder repariert. Mehrere Seekabel wurden beschädigt, darunter auch Telekommunikationsleitungen nach China und über den Pazifik. Am dramatischsten aber waren die Folgen für das Atomkraftwerk Fukushima Daiichi: Dort führte die Naturkatastrophe zum Ausfall von Strom und Kühlsystem in mehreren Reaktoren. Als Folge heizten sich die Reaktorkerne auf, es kam zu Explosionen und einer Kernschmelze. Große Mengen an radioaktiven Elementen traten aus und kontaminierten Luft,

umgebende Landschaft und das Meer. Bis heute ist die Lage in Fukushima nur bedingt unter Kontrolle, es kommt immer wieder zu Lecks und Kontaminationen.

---

## **Verhaktes Gestein an den Nähten der Erde**

Warum aber ereignete sich das Tohoku-Beben ausgerechnet vor der Küste von Fukushima und zu diesem Zeitpunkt? Warum sind die Plattengrenzen solche Hotspots der Erdbebengefährdung? Schon im 19. Jahrhundert erkannten Forscher, 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 Südasiens 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. Angetrieben durch Strömungen im zähflüssigen Erdmantel driften diese Platten mit mehreren Zentimetern pro Jahr gegeneinander, auseinander oder seitlich aneinander vorbei. Das aber geht nicht immer reibungslos vonstatten, im Gegenteil. Durch Vorsprünge und Widerstände im Untergrund verhakt sich das Gestein häufig. Da sich die Platten trotzdem weiterbewegen, wächst die Spannung an. Irgendwann wird der Druck zu groß, das Gestein bricht, die Platten schnellen ruckartig in eine neue Position – und als Folge bebt die Erde.

Japan liegt dabei an einem Typ von Plattengrenze, an dem es besonders oft „klemmt“ und entsprechend häufig starke Beben gibt – an einer



Subduktionszone. Hier, aber auch an anderen Küsten rings um den Pazifik wird eine tektonische Platte unter eine andere gedrückt. Neun der zehn stärksten Erdbeben der letzten 100 Jahre fanden an diesen Subduktionszonen statt. Besonders viele Starkbeben gibt es dabei an der Westküste Südamerikas. Dort bewegt sich die Nazca-Platte als Teil des pazifischen Ozeanbodens mit etwa siebzig Millimetern pro Jahr nach Osten, kollidiert mit Südamerika und schiebt sich dabei unter den Kontinent. Die dadurch entstehenden Erdbeben gehören zu den weltweit stärksten. Im Laufe etwa eines Jahrhunderts bricht dabei von Patagonien im Süden bis nach Panama im Norden die Erdkruste in einer Reihe von Starkbeben vollständig durch. Schon Darwin berichtete in seinem Tagebuch von dem starken Beben in Concepción vom 20. Februar 1835 und dem Tsunami, der dabei entstand.

Entlang dieser Verwerfung fand im Mai 1960 das stärkste jemals gemessene Erdbeben statt, das Große Chile-Erdbeben. Dabei brach die Erdkruste auf einer Länge von rund 1000 Kilometern auf, ein 200 Kilometer breiter Block der Erdkruste zwischen dem Kontinentalrand und den Anden wurde ruckartig um 20 Meter nach Westen und nach oben bewegt und dabei gekippt. Die resultierenden Erschütterungen erreichten eine Magnitude von 9,5. Damit gehört das Beben zu den sogenannten Megathrust-Beben, ähnlich wie auch das Tohoku-Beben vom März 2011, das Beben vor Sumatra, das 2004 den Tsunami auslöste und das historische Beben von Lissabon im Jahr 1755. Im Falle des Chile-Bebens sackte die Küstenlinie nahe dem Epizentrum bei Valdivia zeitweilig um bis zu vier Meter ab, der ruckartige Versatz löste einen Tsunami aus, der sich über den gesamten Pazifischen Ozean ausbreitete und in Chile als 25 Meter hohe Flutwelle die Küste verwüstete.

---

## Überraschungen im Japan-Graben

Als am 11. März 2011 vor der japanischen Küste bebte, war dies allerdings aus gleich zwei Gründen unerwartet: Zum einen, weil der Untergrund in dieser Region erst kurz zuvor schon einmal gebebt hatte. Deshalb galt dieses Gebiet nicht als hochgradig erdbebengefährdet. Tatsächlich ist es für Erdbebenforscher auch im Nachhinein überraschend, dass sich an dieser Stelle überhaupt ein so starkes Erdbeben ereignet hat:

So bewegte sich die Verwerfung durch das Brechen des Gesteins auf 250 Kilometern Länge – das ist nur rund die Hälfte dessen, was man für ein Beben dieser Stärke erwartet hätte. Dafür allerdings lag der Versatz bei 30 bis 50 Metern – ungewöhnlich viel. Dies widerspricht den gängigen Modellen und Theorien zu Megathrust-Beben.

„Die Höhe der Spannungen, die mit diesem Versatz verbunden sind, liegt fast fünf bis zehn Mal höher als das, was wir normalerweise bei einem Megathrust-Erdbeben sehen“, erklärt der Geophysiker Hiroo Kanamori vom California Institute of Technology (Caltech) im Mai 2011 im Fachmagazin „Science“. „Bisher nahm man an, dass das Gestein nahe dem Japangraben eine so große elastische Spannung gar nicht aufbauen kann.“ Warum es im Falle des Tohoku-Bebens trotzdem der Fall war, ist nur in Teilen geklärt. Nach Ansicht von Kanamori könnten entweder der subduzierte Meeresboden oder aber die darüberliegende Platte ungewöhnliche Strukturen aufweisen, wie beispielsweise aufragende Höhenrücken. Diese könnten ein Verhaken der beiden Platten fördern und so mehr Spannung als gewöhnlich aufbauen.

Mehr Informationen lieferte im Jahr 2013 das Japan Trench Fast Drilling Project. Im Rahmen dieses Projekts trieben Forscher von einem Bohrschiff aus drei Löcher ins Tiefengestein des Japangrabens. Ihr Ziel: Sie wollten das Material in der Bruchzone des Erdbebens von 2011 genauer untersuchen. Wie sich dabei zeigte, ist die Verwerfung tatsächlich ungewöhnlich: Die Grenzschicht der beiden Kontinentalplatten ist im Bereich des Epizentrums extrem dünn – nur etwa fünf Meter. „Unserer Kenntnis nach ist das die dünnste Plattengrenze auf der Erde“, sagt Christie Rowe von der McGill University in Montreal. Beispielsweise sei die entsprechende Schicht im Fall der kalifornischen San-Andreas-Verwerfung mehrere Kilometer dick.

Die Wissenschaftler entdeckten auch Hinweise darauf, dass es bei der Verschiebung im Rahmen des Erdbebens nur zu vergleichsweise wenig Reibung gekommen ist: Einmal in Bewegung, rutschte es deshalb heftig. Wie heftig, hatten erst kurz zuvor Aufnahmen eines Unterwasserroboters gezeigt, der bis in 7500 Meter tief in den Graben hinabtauchte: Der durch das Beben ausgelöste Versatz um 50 Meter ließ am Rand des Japangrabens großflächig Sedimentpakete als zusammenhängende Blöcke absacken. An manchen Stellen stauchten die Sedimentblöcke den Meeresboden und erzeugten regelrechte Wülste und Tröge am Grund

des Japangrabens. Und noch etwas zeigten die Untersuchungen: Durch die Bewegungen der Sedimentmassen verschob sich die oberflächennahe Grenze der Eurasischen Platte ungewöhnlich weit: Sie rückte um zwei bis drei Kilometer nach Osten –so viel, wie sonst nur in Hunderttausenden oder Millionen Jahren.

Die Ursache dafür zeigte sich bei der Analyse des Materials der dünnen Trennschicht: Es besteht aus einem extrem feinen Sediment. „Es ist der schlüpfrigste Ton, den man sich nur vorstellen kann“, sagt Rowe. Wenn man ihn zwischen den Fingern verreibt, fühlt er sich an wie ein Schmiermittel. Deshalb gab es bei der Bewegung im Rahmen des Erdbebens sehr wenig Reibungswiderstand und die gesamte Spannung konnte sich auf einen Schlag entladen. Die Forscher vergleichen den Effekt mit dem Gleiten von Langlaufskiern auf Schnee: Im Ruhezustand kleben die Ski ein wenig am Schnee und es braucht eine gewisse Kraft, um sie in Bewegung zu setzen. Dann entsteht allerdings Wärme und bei der anschließenden Gleitbewegung entsteht weniger Widerstand. Den Forschern zufolge könnte es auch an anderen Plattengrenzen ähnliche geologische Besonderheiten geben wie im Japangraben. Die Suche nach solchen dünnen Grenzschichten mit schlüpfrigem Ton könnte daher dabei helfen vorherzusagen, wo besonders heftige Beben und Tsunamis drohen.

---

## **Beben verändern den Planeten**

Die Folgen von Starkbeben wie in Japan oder Chile gehen jedoch weit über die Plattengrenze oder die Region hinaus – sie verändern buchstäblich den gesamten Planeten. So ist das Tohoku-Erdbeben nicht nur das fünfstärkste weltweit seit 1900, der fast 20 Meter betragende Versatz entlang der Verwerfung hat auch die Verteilung der Massen in der Erdkruste beeinflusst – und damit die Lage der Erdachse. Berechnungen von Richard Gross vom Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena ergaben, dass die Erdstöße in Japan die Schwerkraftachse der Erde um rund 17 Zentimeter verschoben haben, weiter in Richtung des 133. östlichen Längengrads. Die Schwerkraftachse ist nicht mit der Nord-Südachse der Erde identisch, beide sind um rund zehn Meter versetzt. Die durch das Erdbeben ausgelöste Verschiebung führt dazu, dass unser Planet bei sei-

ner Rotation ein wenig anders taumelt als zuvor. Die Ausrichtung der Erdachse gegenüber Fixsternen und dem Weltall verändert sich dadurch jedoch nicht.

Gleichzeitig haben die Verschiebungen in der Massenverteilung auch die Rotation der Erde und damit die Tageslänge beeinflusst. Nach den Berechnungen des NASA-Forschers hat das Erdbeben in Japan die Rotation leicht beschleunigt und die Tageslänge um 1,8 Mikrosekunden verkürzt. Zum Vergleich: Ein Erdbeben der Magnitude 8,8, das sich im 2010 Jahr Chile ereignete, verkürzte die Tageslänge um 1,26 Mikrosekunden und verschob die Schwerkraftachse um acht Zentimeter. Das schwere Erdbeben vor Sumatra im Dezember 2004 hatte die Magnitude 9,1 und verkürzte die Tageslänge immerhin um 6,8 Mikrosekunden. Der Versatz der Schwerkraftachse fiel dagegen geringer aus: nur sieben Zentimeter. Diese Unterschiede rühren daher, dass nicht nur die Stärke des Bebens für diese Auswirkungen entscheidend sind, sondern auch Ort und Art des Versatzes im Untergrund.

Für den Alltag und das Leben auf der Erde sind solche winzigen Verschiebungen jedoch absolut irrelevant: „Diese Veränderungen in der Erdrotation sind absolut natürlich und geschehen die ganze Zeit. Sie sind kein Grund zur Beunruhigung“, so Gross. Denn die Erdrotation verändert sich ständig, nicht nur durch Erdbeben, sondern auch durch die sehr viel stärkeren Einflüsse von Veränderungen in Windmustern und Meeresströmungen. „Im Laufe eines Jahres schwankt die Tageslänge um rund eine Millisekunde – das ist 550 Mal mehr als die durch das japanische Erdbeben erzeugte Veränderung“, so der Forscher. Die Position der Schwerkraftachse der Erde verändert sich ebenfalls ständig, im Laufe eines Jahres um rund einen Meter. Auch dies ist deutlich mehr als alles, was durch die Erdbeben bewirkt wird.

---

## **San Andreas, Haiti und Co – Beben an Transformstörungen**

Aber nicht nur Subduktionszonen sind notorische Erdbebenzonen – auch an anderen Plattengrenzen wackelt immer wieder der Untergrund, wie beispielsweise die Erdbeben entlang des San-Andreas-Grabens in Kalifornien oder im Nordwesten der Türkei zeigen. In diesen Regionen,

sogenannten Transformstörungen, bewegen sich zwei Platten seitwärts aneinander vorbei. Dabei kann sich auch hier das Gestein im Untergrund verhaken. Reißt es sich dann mit einem Ruck frei, dann können die Folgen fatal sein, wie das Erdbeben am 12. Januar 2010 in Haiti zeigte. Damals traf eine Erdbebenserie mit mehr als zehn schweren Erdstößen den Karibikstaat und hinterließ 220.000 Tote, Millionen Obdachlose und verheerende Zerstörungen.

Nach Ansicht von Geoforschern war diese Katastrophe sowohl in geologischer als auch in humanitärer Sicht ein „Worst-Case-Scenario“: Zum einen ist die Tektonik in dieser Karibikregion extrem komplex: Hier stoßen die Karibische und die Nordamerikanische Platte aneinander und schieben sich seitwärts aneinander vorbei. Zwischen ihnen aber liegt ein weiterer Bereich, in dem die Erdkruste in mehrere kleinere Plattenstücke zerbrochen ist. „Dieses Flickwerk aus kleineren ‚Blockadeplatten‘ macht es extrem schwierig, die Kräfte im Untergrund und ihre Wechselwirkungen abzuschätzen“, erklärt Erdbebenforscher Jian Lin von der Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), der seit Jahren die Geologie der Region erforscht. „Wer in angrenzenden Gebieten wie der Dominikanischen Republik, Jamaika oder Puerto Rico lebt, ist geradezu von Verwerfungen umzingelt.“ Eine dieser tektonischen Nahtstellen ist die Enriquillo-Verwerfung, die sich von der Dominikanischen Republik im Osten über Haiti bis nach Jamaika im Westen erstreckt. Hier entluden sich am 12. Januar die jahrelang aufgestauten Spannungen, als das Gestein auf einer Länge von 50 bis 60 Kilometern aufriss und die Platten ruckartig in eine neue Position schnellten.

Die Folge war das Erdbeben der Stärke 7,0, das gemeinsam mit seinen Nachbeben Haiti verwüstete. Drei Faktoren machten dabei die Auswirkungen des Bebens besonders verheerend: Zum einen ereignete es sich nur 15 Kilometer südwestlich der Hauptstadt Port-au-Prince, zum zweiten lag der Erdbebenherd nur rund zehn bis 15 Kilometer unter der Oberfläche. Flache Beben wie dieses richten meist besonders große Zerstörungen an. Und zum dritten waren Infrastruktur und Gebäude in diesem armen Land nicht darauf ausgelegt, solchen Kräften zu widerstehen, wie Erdbebenforscher Lin erklärt. Aber immerhin eines blieb den Bewohnern der Karibik erspart: Weil sich das Epizentrum des Haiti-Bebens an Land und nicht im Meer befand, lösten die Erdstöße keinen Tsunami aus.



Komplexes Gefüge aus Verwerfungen: die Tektonik rund um Haiti (© NASA/USGS)

Doch mit diesem Beben ist die Gefahr für Haiti möglicherweise noch nicht vorbei: Im Januar 2012 warnten Geoforscher vor weiteren schweren Beben in der Region. Denn aus ihren Daten und einer Analyse der historischen Beben geht hervor, dass entlang der Enriquillo-Verwerfung schon häufiger ganze Bebenserien aufeinanderfolgten. Zuletzt war dies im 18. Jahrhundert der Fall. Auslöser dieser seismisch aktiven Phase war damals ein Beben im Jahr 1701, das dem vom Januar 2010 in Position und Stärke sehr ähnelte. 240 Jahre lang habe es dann in diesem Gebiet keine vergleichbar starken Erdbeben mehr gegeben, sagen die Forscher. Das Haiti-Beben könnte nun eine erneute Phase der Aktivität einläuten. Solche Erdbebenserien gibt es auch an andern Transformstörungen, beispielsweise in der Region San Francisco. Dort dauert ein solcher seismischer Zyklus jeweils hundert Jahre. Jeder Zyklus besteht aus einer Periode starker Erdbebenaktivität, die in einem besonders heftigen Beben kulminiert. Darauf folgt jeweils eine Ruhephase. Ähnlich, nur mit einer Wiederholungsrate von 250 bis 300 Jahren, könnte dies auch für Haiti gelten.

## Weitab der Kontinentränder – Intraplattenbeben

Aber nicht nur an den Grenzen der tektonischen Platten, auch in ihrem Inneren 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 1600 Kilometer vom nächsten Plattenrand entfernt. Mit Stärken von 8,1 bis 8,3 zerstörten drei Erdstöße die Stadt New Madrid völlig, die Erschütterungen waren noch bis nach New York und Boston zu spüren. Sie hatten aber auch dramatische Auswirkungen auf die gesamte Mitte des Kontinents: Die Beben und ihre Folgen veränderten den Lauf von Mississippi und Ohio, ließen neue Seen entstehen und gestalteten die Landschaft nördlich des heutigen Memphis nachhaltig um.

Auch in Europa gibt es immer wieder Erschütterungen im scheinbar massiven Untergrund – einige davon sogar katastrophal, wie zum Beispiel das Erdbeben in der Schweiz im Jahr 1356, von dem zahlreiche Erzählungen und Gemälde zeugen. Nach heutigen Schätzungen hatte das Beben mit dem Epizentrum in der Nähe von Basel eine Stärke von 7,4. Deutlich schwächer, aber dafür umso häufiger wackelt es auch am Oberrheingraben. Vor allem zwischen Aachen und Köln, aber auch südlich von Tübingen ereignen sich alle paar Monate Beben bis zur Magnitude 3 – sie verursachen meist keine Schäden, sind aber als Zittern des Untergrunds deutlich spürbar. Alle zehn Jahre etwa können diese Erdbeben sogar die Stärke 5 erreichen.

Wie aber kommen solche Intraplattenbeben zustande? Immerhin liegen die Plattengrenzen ja eigentlich weit entfernt und damit auch das durch die Kontinentaldrift verhakte Gestein. Doch die Spannungen, die am Rand der Platte entstehen, übertragen sich auch in ihr Inneres. Und dieses ist nicht massiv, sondern kann Schwachstellen enthalten, beispielsweise in Form alter Brüche oder ehemaliger Plattenränder – Relikte einer urzeitlichen Verschmelzung zweier Kontinente. Diese Schwachstellen halten der Spannung nicht so gut stand wie das restliche Gestein und deshalb kann hier der Untergrund aufreißen und die Verwerfung plötzlich ein Stück nach oben oder zur Seite rucken. Auch der Oberrheingraben ist eine solche Schwachstelle. Sie entstand durch den enormen Druck, den die nordwärts wandernde Afrikanische Platte auf

die Eurasische Platte ausübt. Nicht nur die Alpen türmten sich dadurch in die Höhe, entlang des Rheins brach ein Stück der Platte dadurch ein. Dieser alte Bruch bildet bis heute eine Schwachstelle, die immer wieder aufbricht. Ähnlich ist es auch in New Madrid: Die sogenannte New Madrid Seismic Zone (NMSZ), ist, ähnlich wie der Oberrheingraben, eine alte Verwerfung, die vor Millionen Jahren aufriss, sich dann aber nicht weiterbewegte.

---


## **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. Auf physikalisch messbaren Parametern beruht die Magnitude eines Bebens – die Stärke der freigesetzten Energie. 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 der vom Seismographen registrierten Erdbebenwellen wird die Stärke eines Bebens nach der Richterskala berechnet. Diese Skala wurde vom kalifornischen Seismologe Charles Richter im Jahr 1935 entwickelt: 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.

Heute wird die Richterskala 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 Primärwellen 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 ein-





 Erdbebenherde der letzten 30 Jahre

Auch in Deutschland ereignen sich immer wieder Erdbeben. Sie sind allerdings meist nur schwach (© MMCD NEW MEDIA)

wirkt, 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.

Wenn es darum geht, die zerstörerischen Auswirkungen eines Erdbebens zu vergleichen, sprechen Forscher 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 genutzt, um die Folgen einzuordnen. Diese Einstufungen berücksichtigen daher auch, ob die Region überhaupt bewohnt oder bebaut ist – wo es weder Menschen noch menschliche Bauten zu zerstören gibt, ist auch die Mercalli-Intensität gering. Der Vorteil dieser Skala: Damit kann einem Beben auch dann eine Intensität zugewiesen werden, wenn es nicht mit Instrumenten aufgezeichnet wurde – beispielsweise historischen Erdbeben. Wie kleinräumig die Unterschiede in der Intensität sein können, zeigen Daten vom Chile-Beben aus dem Jahr 1960: Während nahe am Epizentrum, im Ort Valdivia, die Intensität die Stufe X – „vernichtend“ – erreichte, lag sie kaum 20 Kilometer weiter nur noch bei „sehr stark“ und Stufe VII. Einer der Gründe dafür: der Untergrund.

---

## **Pudding in einer Schüssel – Warum der Untergrund so wichtig ist**

Bei einem Erdbeben wird die gewaltige Kraft und Energie, die sich im Untergrund verbirgt, in Sekundenschnelle 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

Folge von Erdbeben. Entscheidend für das Ausmaß der zerstörerischen Wirkung eines Bebens ist nicht allein seine Stärke sondern auch die Beschaffenheit des Untergrunds.

Welche Folgen dies haben kann, enthüllte im Jahr 1985 das Beben von Mexico City. Das Epizentrum des Bebens lag damals bei Zacatula 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.

Manchmal wird durch die Erschütterungen auch Wasser aus den Poren des Untergrund-Sediments 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 quillt dann der zuvor feuchte, aber feste Sand plötzlich als Brei um den Fuß herum nach oben. Im Falle eines Erdbebens hat dies allerdings fatale Folgen: Gebäude verlieren den Halt und sinken ein oder kippen, Brücken fallen um und ganze Straßenzüge sacken ab.

## Gefahr für Los Angeles

Der Untergrund spielt auch für die Bedrohung der Millionenstadt Los Angeles eine entscheidende Rolle. Denn auch sie steht auf einem Pulverfass: Der Untergrund unter ihren Fundamenten und ein Graben südlich der Stadt wirken wie ein Verstärker für Erdbebenwellen, wie Forscher Anfang 2014 herausfanden. Ereignet sich an der südlichen San Andreas-Verwerfung ein starkes Beben, dann potenziert diese Konstellation die Erschütterungen noch. Festgestellt haben die Wissenschaftler dies mit einer neuen Methode: Sie nutzten die ständigen leichten Erschütterungen der Erdkruste durch Wellen und Wasserbewegungen im Ozean als seismische Messfühler. „Diese Wellen sind Milliarden Mal schwächer als die seismischen Wellen eines Erdbebens“, erklärt Studienleiter Greg Beroza von der Stanford University. Bisher galten sie daher eher als störendes Hintergrundrauschen. Doch die Forscher machten sich diese Wellen zunutze. Mit Hilfe eines seismischen Messnetzes entlang der San Andreas-Verwerfung registrierten sie, wohin und wie stark sich einzelne Wellenbestandteile dieses Rauschens ausbreiten. Aus diesen Daten erstellten sie eine Computersimulation, die zeigt, wie ein starkes Beben verlaufen würde und vor allem, wie stark Los Angeles in Gefahr wäre.

Das Ergebnis ist für die Bewohner der Millionenstadt alles andere als beruhigend. Denn würde es an der südlichen San Andreas-Verwerfung zu einem Beben der Stärke 7 oder mehr kommen, dann könnten diese Bebenwellen mit verstärkter Wucht die Stadt treffen. Der Grund: Ein rund 100 Kilometer langer Graben, der Los Angeles mit dem Tal von San Bernardino verbindet, wirkt dann wie ein Verstärker: Er konzentriert die nordwärts rasenden Wellen und leitet sie direkt auf die Stadt zu. Und noch etwas macht die Bedrohung schlimmer: Der Untergrund sowohl im Kanal als auch unter Los Angeles besteht aus Sediment. Dessen Beschaffenheit schaukelt die Wellen zusätzlich hoch – ähnlich wie eine Schüssel Wackelpudding beim Schütteln stärker und unregelmäßiger schwankt als ein Styroporblock. Reflexionen der Wellen an der Grenze zum umgebenden härteren Gestein sorgen für zusätzliche Erschütterungen. „Das ruft ein sehr viel stärkeres Schwanken und Rütteln des Untergrund hervor, als normalerweise bei dieser Bebenstärke“, so Beroza. Die südliche San Andreas-Verwerfung hat seit 150 Jahren kein größeres Erdbeben mehr erlebt – es ist daher möglicherweise überfällig.

## Kann man Erdbeben vorhersagen?

Wann aber dieses Beben kommt, das ist trotz aller Fortschritte in der Erdbebenforschung nicht vorhersagbar. Denn bislang gibt es keine allgemeingültigen Signale für ein sich ankündigendes Beben. In vielen Fällen lassen sich Veränderungen des Gesteinsdrucks, des Magnet- oder Schwerfeldes 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. Messnetze, die sie alle abdecken, gibt es daher nur wenige.

Eines dieser seismischen Messnetze wurde zu Forschungszwecken im erdbebengefährdeten Parkfield in Kalifornien installiert. 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 einer Magnitude von etwa 6,0. Auf der Suche nach Prognosemöglichkeiten und Vorläufersignalen für Beben erschien den Wissenschaftlern des U.S. Geological Survey gerade diese vermeintliche Berechenbarkeit ideal für eine Versuchsstation. Anfang der 1980er Jahre entstand daher 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 erhofften Erdstöße der Magnitude 6. Und auch dieses Beben kam für die Forscher trotz ihrer modernen Messgeräte und des dichten Messnetzes überraschend. 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 ist 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, beispielsweise 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 brems 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.

In der japanische Stadt Kobe beispielsweise finden alljährlich am ersten September, dem Gedenktag des Großen Kanto-Erdbebens von 1923, Katastrophenübungen statt, an denen nahezu die gesamte Bevölkerung beteiligt ist. Trainiert werden Evakuierungsroutinen, aber auch das Verhalten während des Bebens: Nicht auf die Straße rennen, sondern unter einem Tisch oder Türrahmen Schutz suchen. In der Hauptstadt Tokio 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.

---

# Tsunami – Tödliche Wassermassen in Bewegung 3

Nadja Podbregar

Ein Dröhnen wie von einem näherkommenden Flugzeug kündigt die Katastrophe an. Dann geht alles ganz schnell: Eine gewaltige Wasserwand rast vom Meer herein und überschwemmt alles, was sich ihr in den Weg stellt. Kilometerweit kann ein solcher Tsunami ins Land vordringen und Städte, Straßen und die Landschaft völlig verwüsten. Auslöser solcher Katastrophe sind meist Erdbeben, aber auch Vulkanausbrüche, submarine Rutschungen oder sogar Meteoriteneinschläge können die tödlichen Flutwellen in Bewegung setzen. Auch die Küsten Europas sind vor dieser Gefahr nicht gefeit – und sogar in großen Seen kann ein Tsunami für schwere Überschwemmungen sorgen.

---

## Anatomie einer Katastrophe

Indischer Ozean, 27. Dezember 2004. Tief unter der Wasseroberfläche passiert es: An der Nahtstelle zwischen der Indischen und Burmesischen Platte gibt das Gestein plötzlich den aufgestauten Spannungen nach und bricht. Auf einer Länge von 1200 Kilometern schnellst dadurch der Meeresboden ruckartig um zehn Meter in die Höhe. Die gesamte darüber liegende Wassersäule wird durch diesen Stoß verdrängt und bildet eine sich rasch konzentrisch ausbreitende Welle. Ein Tsunami ist entstanden. Zunächst aber ist von seiner gewaltigen Energie nicht viel zu spüren: Obwohl sich die Wellen mit der Geschwindigkeit eines Düsenjets ausbreiten, zeugt an der Wasseroberfläche nur ein leichtes, langgestrecktes Auf und Ab von den Vorgängen in der Tiefe. Selbst ein Paddelboot wäre hier, im Zentrum des Tsunami, nicht in Gefahr.



Während sich der Tsunami ausbreitet, wandert jedoch nicht das Wasser selbst, sondern nur die Energie der Welle. Sie wird von Wasserteilchen zu Wasserteilchen übertragen – blitzschnell und fast ohne Verluste. Der Prozess gleicht dem bekannten Mini-Experiment mit mehreren, in einer Reihe hängenden, sich berührenden Kugeln: Wird die erste angehoben und fällt wieder zurück, wandert die Stoßenergie durch alle Kugeln, ohne dass diese sich von der Stelle rühren. Nur die letzte in der Reihe wird wie von Geisterhand abgestoßen und hebt sich ihrerseits. Wie effektiv diese Tsunamiausbreitung in tieferem Wasser sein kann, zeigte sich unter anderem im April 1946. Vor den Aleuten lösten ein starkes Erdbeben und folgende große Erdrutsche einen Tsunami aus, der einmal um den halben Globus raste: Noch 15.600 Kilometer entfernt, in der Antarktis, beschädigte die hier immerhin noch zwei Meter hohe Flutwelle eine Forschungshütte einer britischen Antarktisexpedition.

Je näher die in Bewegung geratenen Wassermassen den Küsten kommen, desto langsamer und höher werden die Wellen. Durch den ansteigenden Meeresgrund bleibt ihnen weniger Platz, außerdem staut die zunehmende Reibung am Untergrund sie auf. Die Wellenlänge des Tsunami schrumpft, ohne dass sich die mitgeführte Energie wesentlich verringert. Aus der harmlosen, im offenen Meer kaum einen Meter hohen Woge entwickelt sich ein steil aufragender, zum Teil bis zu 40 Meter hoher Wellengigant. Erreicht eine solche Tsunami-Welle die Küste, dann hat sie keinerlei Ähnlichkeit mit normalen großen Brechern. Stattdessen rast eine zunächst ungebrochene Wand aus Wasser auf das Land zu, begleitet von einem grollenden Geräusch. Ein Tsunami kann nach Schätzungen von Wissenschaftlern eine Million Tonnen Wasser bewegen – entsprechend groß ist die Energie, die diese Welle mit sich führt, wenn sie das Festland erreicht. Für die betroffenen Küsten hat das dramatische Folgen. Wie schwerwiegend diese ausfallen, hängt von verschiedenen Faktoren vor Ort ab. Riffe, Flussmündungen, unterseeische Gebirge, vorgelagerte Inseln, die Neigung eines Strandes – alle diese Faktoren können die Stärke eines Tsunamis beeinflussen und damit auch die Schäden, die er hinterlässt.

Der Tsunami vom 2. Weihnachtstag 2004 erreichte knapp 20 Minuten nach dem Erdbeben die Küste der Provinz Banda Aceh auf Sumatra. Sechs aufeinanderfolgende Flutwellen von bis zu 30 Metern Höhe überfluteten die Küsten und drangen bis zu zwei Kilometer weit ins Lan-

desinnere vor. Weil der Ursprung des Tsunami dicht vor der Küste lag, folgten die zweite und dritte Welle, bevor die erste Tsunamiwelle wieder zurückfließen konnte. Viele Menschen, die vor der ersten Flut geflüchtet waren, wurden daher auf ihrem Rückweg von den in fünf und mehr Minuten Abstand folgenden Wellen getötet. In Banda Aceh, aber auch in Thailand, Myanmar, Sri Lanka, Indien und auf den Malediven hinterließ der Tsunami eine Spur der Verwüstung und Tausende von Todesopfern. Sogar weit entfernt, an der afrikanischen Ostküste, starben in Somalia, Tansania oder Kenia viele Menschen in den Flutwellen. Am Ende hatte der Tsunami mehr als 230.000 Menschen rund um den Indischen Ozean das Leben gekostet, weit über 100.000 wurden verletzt und knapp zwei Millionen Menschen verloren durch die Katastrophe ihr Dach über dem Kopf. Die Sachschäden beliefen sich alles in allem auf zehn Milliarden US-Dollar.

---

## **Japan: Doppelte Zerstörungskraft durch verschmolzene Wellenberge**

Sieben Jahre später trifft eine ähnliche Katastrophe auch die Nordostküste Japans: Es ist Freitag, der 11. März 2011, 15:15 Uhr Ortszeit. Erst vor wenigen Minuten hat das schwerste Erdbeben der jüngeren japanischen Geschichte zahlreiche Häuser und Straßen zerstört und die Stromversorgung weiter Gebiete unterbrochen. Die Menschen fliehen in Panik aus den Gebäuden. Doch es ist nicht vorbei, das Schlimmste kommt erst noch. Denn das plötzliche Auf- und Abschnellen des Meeresbodens beim submarinen Tohoku-Erdbeben hat seine gewaltige Energie auch an das darüber liegende Wasser übertragen. In einer sich kreisförmig ausbreitenden Welle rast nun ein Tsunami vom Bebenzentrum aus über den Pazifik. Sofort schlägt das Tsunamiwarnsystem Alarm.

Doch für die Menschen entlang der nur 129 Kilometer entfernten Küste Japans kommt die Warnung zu spät. Schon rund eine halbe Stunde nach dem Erdbeben trifft die Wasserwalze auf die Küste. Je nach Region erreicht sie eine Höhe von zehn bis 38 Metern. Die Wucht des Tsunami reißt Gebäude, Autos und sogar große Schiffe kilometerweit mit sich in Landesinnere. Große Teile der Präfektur Miyagi macht die Flutwelle dem Erdboden gleich. Das Atomkraftwerk Fukushima Daii-



Blick über den überschwemmten und zerstörten Ort Minato in Japan nach dem Tsunami vom 11. März 2011 (© U.S. Marine Corps)

chi, direkt am Meer liegend, bekommt die volle Wucht des Tsunami ab. Das Wasser überflutet das Reaktorgelände, zerstört Leitungen und Rohre und reißt alles mit sich, das nicht aus massivem Beton besteht. Strom und Kühlung fallen aus, die Reaktorkerne laufen heiß, eine bis heute anhaltende Atomkatastrophe ist die Folge. Dass der Tsunami so verheerend ausfiel, war aber nicht nur eine Folge des Seebebens selbst. Das zeigten Auswertungen von Satellitendaten wenige Monate nach der Katastrophe durch Forscher der NASA. Demnach erhielt der Tsunami von 11. März 2011 doppelte Zerstörungskraft durch zwei verschmelzende Wellenfronten: Unterseeische Gebirgsrücken teilten die Energie des Bebens und ließen zunächst zwei getrennte Wasserberge entstehen. Erst auf ihrem Weg zur Küste verschmolzen diese wieder und bildeten eine einheitliche, doppelt so hohe und besonders energiereiche Wellenfront. Dass solche Verschmelzungseffekte besonders zerstörerische Fluten auslösen, hatte man schon seit Jahrzehnten vermutet. Beobachtet werden konnte dies aber zuvor noch nie. Erst das Tohoku-Beben und sein Tsunami lieferten nun den Beweis.

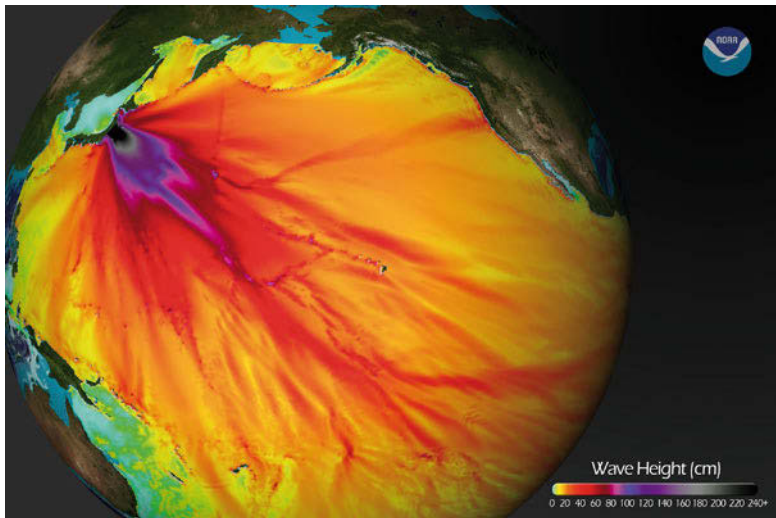
Diese Erkenntnisse könnten auch erklären, warum Tsunamis ganze Ozeane überqueren können, um dann einige Küstenbereiche völlig zu verwüsten, während sie nahe benachbarte nahezu unberührt lassen. Wie die Forscher anhand des Japan-Tsunami feststellten, spielt auch dafür das Relief des Meeresbodens eine wichtige Rolle. Grate und Gebirgsrücken am Grund des Ozeans können die Wellenfronten eines Tsunami zusammendrücken und kanalisieren. An bestimmten Stellen werden die Wasserberge dadurch besonders hoch und energiereich, an anderen dafür schwächer. Trifft der Tsunami auf die Küste, wirkt er sich dadurch nicht an allen Stellen gleichermaßen aus und erzeugt ein scheinbar zufälliges Muster der Zerstörungen. Und auch für Tsunami-Vorhersagen ist dieses Wissen wichtig: Bisher wurden dafür nur die Form der Küsten und des küstennahen Meeresbodens berücksichtigt. Doch jetzt ist klar, dass auch der Meeresboden weiter draußen mit einbezogen werden muss, weil er die Entwicklung des Tsunami entscheidend mitbestimmt. Dadurch können gefährdete Küstengebiete gezielter evakuiert oder geschützt werden.

---

## Die Auslöser: Beben, Vulkanausbrüche ...

Diese Katastrophen zeigen, dass Tsunamis keineswegs Ausnahme-Ereignisse unseres Planeten sind – und sie sind keineswegs auf den Pazifik beschränkt. Auch Europas Küsten erlebten im Laufe ihrer Geschichte schon mehrfach Tsunamis. So beispielsweise am 1. November 1755, als nach dem schweren Erdbeben von Lissabon zehn Meter hohe Flutwellen 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 Wassermassen des Tsunami – einer der schlimmsten Naturkatastrophen in der Geschichte Europas. Und noch einmal gut 2000 Jahre früher soll ein Tsunami auch im nördlichen Teil der Ägäis gewaltige Schäden angerichtet haben, davon zeugen historische Überlieferungen. Sie sind wahrscheinlich die frühesten Beschreibungen einer solchen Katastrophe.

Historische Daten und geologische Indizien sind es auch, die belegen, dass keineswegs nur Erdbeben an kollidierenden Plattengrenzen wie vor Japan oder Sumatra einen Tsunami auslösen können. Stattdessen können



Tsunamis breiten sich schnell über ganze Ozeane aus, hier die Wellenhöhen des Tsunami vom 11. März 2011 vor Japan (© NOAA)

sie bei jeder Störung im Meer entstehen, die große Wassermassen aus ihrem Gleichgewicht bringt. Das können große submarine Rutschungen sein, Vulkanausbrüche oder sogar der Einschlag eines großen Meteoriten in den Ozean. Alle diese Ereignisse setzen genügend Energie frei, um große Mengen an Wasser ruckartig nach oben und zur Seite zu drücken und so den Impuls für einen Tsunami zu geben.

Der Ausbruch eines Vulkans war es auch, der im Jahr 1883 eine der schwersten Tsunamikatastrophen der Geschichte auslöste. Damals explodierte der Feuerberg Krakatau in der Sundastraße zwischen den indonesischen Inseln Java und Sumatra. Dabei wurde ein großer Teil des Gipfels abgesprengt, gewaltige Gesteinsmassen rutschten ab und stürzten ins Meer. Der dabei entstandene Tsunami erreichte innerhalb weniger Stunden viele Küstenregionen und brachte mehr als 36.000 Menschen im Umkreis von 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.

## **... und gewaltige Rutschungen**

Aber nicht nur vulkanische Eruptionen, auch Rutschungen entlang der Kontinentalhänge oder an unterseeischen Bergrücken können einen Tsunami auslösen. Wie schwerwiegend die Folgen eines solchen Untersee-Erdrstoches sein können, zeigt die Storegga-Rutschung vor rund 7000 Jahren: Auf der Höhe von Trondheim verlor damals ein großer Teil des Kontinentalabhanges seine Stabilität, kam ins Rutschen und stürzte in Richtung Tiefsee. Auf seinem Weg riss die gigantische Unterwasserlawine alles mit sich, was sich ihr in den entgegen stellte, und kam erst nach 800 Kilometern wieder zum Stehen. Die Schockwellen dieser Rutschung lösten einen gewaltigen Tsunami aus, der in kürzester Zeit die Küsten Schottlands und Islands überrollte. Schätzungsweise 5600 Kubikkilometer Sediment und Geröll gerieten damals in Bewegung, was immerhin dem hundertfachen Volumen des Bodensees entspricht. Die Spuren der bis zu 20 Meter hohen Flutwelle sind noch heute als chaotisch durcheinander gewürfelte Sand- und Gesteinsreste in Sedimentgestein entlang der Küsten erkennbar.

Die Ursache für diese gewaltige Untersee-Rutschung waren vermutlich Gashydrate. Diese bei Kälte und hohem Druck festen, eisähnlichen Verbindungen aus Methangas und Wasser bilden an vielen Kontinentalhängen große Vorkommen. Solange sie fest sind, wirken sie im Porenraum von marinen Sedimenten wie Zement und stabilisieren die Hänge dadurch. Doch wenn sich das Wasser erwärmt oder der Druck zu niedrig wird, verlieren die Gashydrate ihre Bindung. Das Methan gasst aus und nimmt dem gesamten aufliegenden Sediment den Halt. In den letzten Jahrtausenden waren solche Megarutschungen eher rar.

Doch der Klimawandel könnte die Gefahr dieser Tsunami-Auslöser wieder verstärken. So veröffentlichten US-Forscher im Herbst 2012 Daten, nach denen die fortschreitende Erwärmung des Atlantiks den Meeresgrund vor der US-Ostküste instabil macht: Auf einer Fläche von mehr als 10.000 Quadratkilometern beginnt sich Methangas aus den im Untergrund lagernden Gashydraten zu lösen. Ähnliches könnte nach Ansicht der Wissenschaftler auch in anderen Meeresgebieten weltweit ablaufen. „Es ist unwahrscheinlich, dass der westliche Rand des Atlantiks die einzige Region ist, in der die Gashydrate durch veränderte Mee-

resströmungen destabilisiert werden“, konstatieren Benjamin Phrampus von der Southern Methodist University in Dallas und seine Kollegen. Andere Studien haben bereits Indizien dafür geliefert, dass sich auch im arktischen Ozean und im westlichen Pazifik ähnliche Veränderungen anbahnen. Vor Neuseeland entdeckten Forscher Anfang 2014 ebenfalls klare Anzeichen von freiem Gas im Sediment sowie Hinweise auf große Gashydratvorkommen. Das Team identifizierte insgesamt 99 natürliche Gasaustritte auf einer Fläche von 50 Quadratkilometern, von denen Gasblasen bis zu 250 Meter hoch in der Wassersäule aufsteigen. Es ist die vermutlich dichteste Konzentration an Gasaustritten am Meeresboden rund um Neuseeland. Die 2,5 Gigatonnen Gashydrate vor der US-Ostküste sind daher wahrscheinlich nur ein Bruchteil der Vorkommen, die sich weltweit aufzulösen drohen und dann Rutschungen und im schlimmsten Fall Tsunamis verursachen könnten.

Für Rätselraten sorgte im Jahr 2010 die Entdeckung einer 2000 Jahre alten Rutschung südlich der Kanarischen Inseln. In diesem Gebiet am afrikanischen Kontinentalhang sackten im Laufe der Erdgeschichte schon häufiger hunderte Kilometer lange Hangabschnitte in die Tiefe. Meist wurden sie destabilisiert, weil sich Klima und Meeresspiegel änderten und damit auch die auf den Hang einwirkenden Bedingungen. So beispielsweise während der Hauptphase der afrikanischen Rutschungen vor 50.000 bis 60.000 Jahren. Doch die neu entdeckte Rutschung vor den Kanaren passt nicht ins Bild. Sie ereignete sich, als die letzte Eiszeit längst vorbei war und Klima und Meeresspiegel relativ stabil waren. Auch Gashydrate gibt es in diesem Gebiet keine und eine Erdbebenzone ist nicht ersichtlich. Was diese submarine Katastrophe damals auslöste, ist daher bisher ungeklärt. Ihre Entdeckung könnte aber Konsequenzen für Gefahrenabschätzung in allen küstennahen Regionen haben. Denn wenn solche Rutschungen selbst unter vermeintlich stabilen Bedingungen passieren könne, dann erhöht dies auch das Risiko für Tsunamis.

Dass Rutschungen sogar in großen Seen Tsunamis auslösen können, belegte im Jahr 2012 ein Fund Schweizer Wissenschaftler. Als sie die Sedimente am Grund des Genfer Sees mit Hilfe von seismischen Wellen untersuchten, fanden sie eine ausgedehnte, linsenförmige Ablagerung von zehn Kilometern Länge und fünf Kilometern Breite. Die durchschnittlich fünf Meter dicke Schicht verdickte sich nach Südosten hin, in Richtung des Rhone-Deltas. Wie nähere Untersuchungen zeigten, bestanden diese

Ablagerungen aus Turbiditen, Gesteinsformen, die durch die plötzliche Bewegung großer Schlammströme entstehen. Mit der Radiokarbonmethode gelang es den Forschern auch, den Zeitpunkt der Ablagerung einzugrenzen: Sie muss sich zwischen 381 und 612 nach Christus gebildet haben. Das aber passte zeitlich zu einem Ereignis im Jahr 563, von dem historische Quellen zeugen: Damals kam es etwa an der Stelle, an der die Rhone in den Genfer See fließt, zu einem verheerenden Bergsturz, auch bekannt als Tauredunum-Ereignis. Der Steinschlag allein reichte den Berichten zufolge bereits aus, um mehrere Dörfer komplett zu zerstören.

Doch die neu entdeckten Ablagerungen legen ein noch viel katastrophaleres Szenario nahe: Demnach stürzte das Gestein am Rhone-Ufer auf sehr weiches Erdreich, das sofort nachgab und in den Fluss rutschte. Dabei entstand ein Schlammstrom, der den Seehang hinunterströmte und dabei dessen Wassermassen in Bewegung versetzt. Nur 15 Minuten später erreichte dann eine Welle von 13 Metern Höhe die Stadt Lausanne, nach 70 Minuten war Genf erreicht. Wie die Forscher betonen, belegt dies, dass nicht nur Städte an Meeresküsten, sondern auch dichtbesiedelte Seeufer durch Tsunamis gefährdet sind – ein Risiko, das bisher chronisch unterschätzt wird. Da der Auslöser des damaligen Steinschlags ebenso gut ein leichtes Erdbeben wie ein starker Platzregen gewesen sein könnte, sei es nicht unwahrscheinlich, dass er sich wiederhole. Die Folgen wären heute allerdings ungleich schwerwiegender als im 6. Jahrhundert: Insgesamt leben an den Ufern des Sees heute mehr als eine Million Menschen. In Genf würde schon eine Acht-Meter-Welle die komplette Innenstadt überschwemmen.

---

## **Tsunami-Gefahr für Jamaika und Los Angeles?**

Aber auch zu Rutschungen im Meer gibt es neue Erkenntnisse: Erst vor Kurzem zeigte sich, dass viele ursprünglich als direkte Folge eines Starkbebens betrachtete Tsunamis eigentlich durch Rutschungen verursacht wurden, so auch im Januar 2010 vor Haiti. Bereits einige Wochen nach dem Beben hatte ein Team von amerikanischen und haitianischen Geowissenschaftlern vor Ort nach den Ursachen der bis zu zehn Meter hohen Tsunamis gesucht. Mit Hilfe von Messungen per Boot und Forschungs-



schiff, aber auch zu Fuß untersuchten sie vor allem die Topographie des Meeresgrunds in der Nähe des Bebenherds und der betroffenen Küstengebiete. Dabei stellten die Forscher fest, dass die meisten Tsunamis nicht durch das Beben selbst, sondern durch Unterwasser-Erdrutsche an den Küsten ausgelöst worden waren. Die Erdstöße destabilisierten das an steileren Unterwasserhängen aufgelagerte Sediment und die dadurch ausgelösten Rutschungen verdrängten innerhalb kürzester Zeit so viel Wasser, dass ein Tsunami ausgelöst wurde.

Brisanz erhält dies durch zwei weitere Erkenntnisse der Forscher: Zum einen reicht an sich seitlich verschiebenden Plattengrenzen schon ein mittleres Beben aus, um solche Rutschungen zu verursachen. Doch Netzwerke und Organisationen, die Tsunamiwarnungen herausgeben, betrachteten bisher meist nur starke Seebeben an kollidierenden Platten als potenziell gefährlich, weil nur sie beim senkrechten Versatz der Plattenränder genügend Energie freisetzen, um die Wassermassen in Bewegung zu versetzen. Die geologischen Vorgänge beim Haiti-Beben widerlegen dies. Demnach können auch Transformstörungen indirekt Tsunamis auslösen. Hinzu kommt: Solche bebenbedingten Rutschungen sind offenbar zehnmal häufiger als bisher angenommen.

Ein Vergleich mit historischen Daten enthüllt, dass rund ein Drittel aller Tsunamis in der Karibik durch Unterwasser-Erdrutsche ausgelöst wurde – bisher gingen Geoforscher immer nur von rund drei Prozent aus. Das aber bedeutet, dass auch andere Küstenstädte weltweit stärker durch Tsunamis gefährdet sind als bisher angenommen. So liegt beispielsweise die Millionenstadt Los Angeles ebenfalls in der Nähe einer sich seitlich verschiebenden Verwerfung, ebenso Kingston auf Jamaika oder die türkische Großstadt Istanbul.

---

## **Nach dem Feuer kommt das Wasser – Tsunami durch Einschlag**

Vor 65 Millionen Jahren spielt sich vor der Halbinsel Yucatan eine Katastrophe ab, die die Erdgeschichte für immer verändern sollte. Ein rund zehn Kilometer großer Asteroid rast mit bis zu 20 Kilometern pro Sekunde auf die Erde zu, der mehr als zwanzigfachen Geschwindigkeit einer Gewehrkugel. Als er auf das flache Küstenmeer vor Yucatan trifft, reißt

der Einschlag nicht nur den gewaltigen Chicxulub-Krater in den Untergrund und verdampft Gestein ringsum, die Explosion setzt auch die Energie von 100 Teratonnen TNT oder etwa 8 Milliarden Hiroshima-Bomben frei. Die Schockwelle entspricht einem Erdbeben der Stärke 11,5. Innerhalb von Sekundenbruchteilen verdrängen Explosion und Schockwelle im Meer eine gewaltige Wassermenge. Eine ringförmige Wasserwand, mehrere Kilometer hoch, schießt in die Höhe. Nur wenige Augenblicke später jedoch fällt sie wieder in sich zusammen. Die Energie der einstürzenden Wasserwand überträgt sich auf das Meer und löst damit, wenige Sekunden nach dem Einschlag, eine verhängnisvolle Kette von Ereignissen aus: Das Wasser setzt sich in Bewegung, ein Tsunami entsteht. 50 Meter ragen die Wellen in die Höhe, während sie sich im flachen Wasser des Golfs von Mexiko ausbreiten. An den Küsten steigert sich die Wellenhöhe noch.

Wie weit der Tsunami damals ins Land vordrang, ist nicht eindeutig geklärt. Im gesamten Gebiet des Golf von Mexiko findet sich aber eine zwischen 40 und 170 Meter dicke Schicht im Gestein, in der Kalksteinkörnchen, Trümmer und anderes Sediment durcheinander geworfen sind. Diese Ablagerungen entstanden wahrscheinlich beim Rückzug des Tsunami, denn dann tragen die Wassermassen am meisten Schlamm und Trümmer mit sich. Zwischen hunderten von Metern und hunderten von Kilometern landeinwärts reichte demnach die Spannbreite der überschwemmten Gebiete. Würde sich ein solcher Tsunami heute ereignen, wären Städte wie New Orleans, Houston, Havanna auf Cuba oder Tampico in Mexiko wahrscheinlich als erste dem Untergang geweiht. Nur wenig später hätten die Wellen auch die südliche Hälfte der Karibik und die Küsten von Belize, Honduras, Jamaika und Haiti, aber auch Venezuela erreicht.

Während die typische Merkmale von erdbebenbedingten Tsunamis heute gut erforscht und modelliert sind, weiß man über von Meteoriten ausgelöste Tsunamis kaum etwas. Zu selten sind diese Ereignisse und zu wenig weiß man über ihre physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Klar scheint aber, dass sie sich von den typischen Erdbeben-Tsunamis unterscheiden. Bisher gibt es daher nur annähernde Schätzungen, welche Folgen der Einschlag eines Asteroiden ins Meer für die Küsten hätte. Forscher des Los Angeles National Laboratory (LANL) haben im Computer den Einschlag eines 200 Meter großen Asteroiden in den Atlantik

simuliert. Das Szenario: Innerhalb von Sekunden schleudert der Impact große Wassermassen bis zu 35 Kilometer hoch, an den Küsten entstehen Flutwellen von über 200 Metern Höhe. Die Wucht des mit Trümmern und anderen festen Brocken vermengten Wassers würde die Küstenregionen zu beiden Seiten des Ozeans völlig verwüsten.

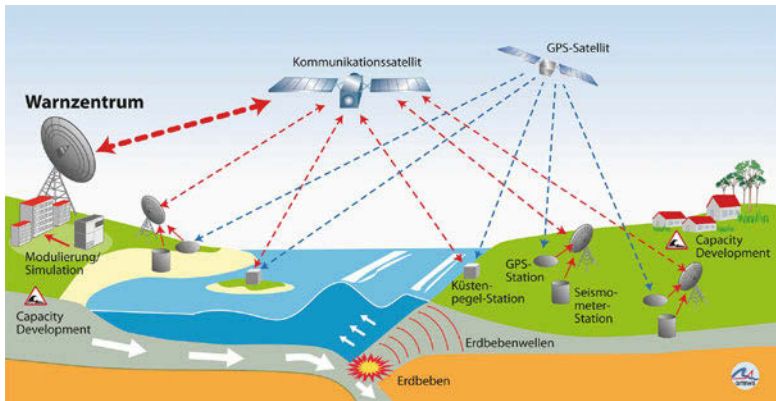
Impactforscher schätzen, dass ein durch einen Meteoriten ausgelöster Tsunami mit Wellenhöhen von bis zu 100 Metern alle paar tausend Jahre einmal auftritt. Ein solcher Tsunami könnte kilometerweit ins Land eindringen und würde gerade die besonders dicht besiedelten Küstenregionen quasi ausradieren. Der Einschlag eines fünf Kilometer großen Asteroiden in den atlantischen Ozean hätte die völlige Überschwemmung von weiten Teilen Europas zur Folge, Spanien, Portugal, Dänemark und Holland gäbe es dann vermutlich nicht mehr. Immerhin tröstlich: Ein Impact von der Größenordnung des Dinokillers – rund zehn Kilometer – kommt schätzungsweise nur alle 100 Millionen Jahre einmal vor.

---

## **Frühwarnsysteme: Überwachung durch Bojen, Sensoren und Satelliten**

Egal ob durch Erdbeben, Vulkane, Rutschungen oder einen Meteoriteneinschlag – verhindern lässt sich ein durch solche Ereignisse ausgelöster Tsunami nicht – das ist klar. Aber es gibt Möglichkeiten, gefährdete Regionen rechtzeitig vor Eintreffen der Wassermassen zu warnen. Das erste Frühwarnsystem dieser Art richteten die USA im Jahr 1948 auf Hawaii ein. Das Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) soll Tsunamis schon an ihrem Ursprungsort detektieren und dann die Bewohner der US-Westküste und Hawaii alarmieren. Mittlerweile ist das Pacific Tsunami Warning System zu einem multinationalen Unterfangen geworden. Fast alle Pazifik-Anrainerstaaten beteiligen sich inzwischen daran. Ein Messnetz aus Seismometern am Meeresgrund registriert 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 der Warnzentralen Alarm. Bei einem Erdbeben ab einer Stärke von 7 oder



Funktionsprinzip des deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystems GITEWS  
(© Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)/GITEWS)

mehr ist besondere Eile bei der Auswertung geboten. Da das Relief des Meeresbodens weitgehend bekannt ist und die Geschwindigkeit eines Tsunami von der Wassertiefe abhängt, kann man die Laufzeiten relativ genau bestimmen. Sobald fest steht, welchen Weg der Tsunami nehmen wird, informieren die Behörden die breite Öffentlichkeit in den betroffenen Gebieten über Radio- und Fernsehsender sowie per Internet, E-Mail oder Handy. Parallel werden eventuell notwendige Evakuierungsmaßnahmen eingeleitet.

Auch am 26. Dezember 2004 funktionierte dieses Tsunami-Warnsystem – es konnte allerdings die katastrophalen Folgen des Tsunami dennoch nicht verhindern. Bereits zwölf Minuten nach dem verheerenden Erdstoß war eine Tsunami-Warnung möglich, denn zu diesem Zeitpunkt hatten die seismischen Messstationen rund um die Welt den Erdbebenherd bereits lokalisiert. Doch aufgrund fehlender Ansprechpartner in den betroffenen Ländern wurde die Warnung nicht rechtzeitig weitergegeben. Außerdem fehlten im Indischen Ozean Messstationen, die die Wasserbewegungen und damit die tatsächliche Tsunamigefahr ermitteln konnten. Seit 2008 soll ein neu entwickeltes deutsch-indonesisches Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System) solche Pannen verhindern helfen.

„Durch dieses Frühwarnsystem gewinnen die Menschen etwa 20 Minuten Zeit, um sich in Sicherheit zu bringen: Wir hoffen, dass es viele Leben retten wird“, erklärte Projektkoordinator Jörn Lauterjung vom GeoForschungszentrum Potsdam anlässlich der Eröffnung.

---

## **GPS warnt noch genauer**

Allerdings: Auch lückenlose herkömmliche Tsunami-Frühwarnsysteme reichen manchmal nicht aus, wie der Tsunami vom 11. März 2011 vor Japan zeigte. Im Falle des Tohoku-Bebens gab die Meteorologie-Behörde Japans zwar bereits nach drei Minuten die erste Warnmeldung für vorerst drei Präfekturen heraus. Dabei gingen die Experten jedoch zunächst nur von einem Beben der Magnitude 7,9 aus, entsprechend zu gering wurde auch die Tsunami-Gefahr eingeschätzt. Erst nach mehreren Stunden stand die tatsächliche Stärke fest – doch da war es längst zu spät. Der Grund für dafür liegt jedoch nicht im Unvermögen der Experten, sondern schlicht an den Grenzen des bisher gängigen Systems, wie Andreas Hoechner vom GeoForschungszentrum Potsdam und seine Kollegen 2013 herausfanden. Dieses ermittelt die Bebenstärke und die Lage des Epizentrums aus Daten seismischer Messnetze. Diese aber erfassen die für den Tsunami wesentlichen Vorgänge nicht: Das Ausmaß, in dem die Verwerfung durch das Erdbeben bricht und emporschnellt. Denn diese Verformung des Meeresbodens bestimmt letztlich, wie stark und in welche Richtung sich ein Tsunami entwickelt.

Genau diese Daten können aber GPS-Stationen liefern. Diese Empfänger nutzen die Satellitensignale des Global Positioning System, um millimetergenau jede Bewegung des Untergrunds zu registrieren. In der Nähe möglicher Erdbebenherde platziert – beispielsweise am Meeresgrund – können diese Messstationen in Echtzeit zeigen, wie stark und wo sich der Untergrund bei einem Beben hebt. Das wiederum erlaubt es in Sekundenschnelle, mit Hilfe von Modellen die Höhe und voraussichtliche Ankunftszeit eines Tsunami zu berechnen. Japan besitzt bereits ein Messnetz mit rund 1200 GPS-Empfängern. Doch diese wurden bisher nicht für die Tsunami-Frühwarnung eingesetzt – und auch ähnliche GPS-Messnetze anderswo nicht. „Unseres Wissens nach gibt es bisher noch kein einziges Beispiel für eine GPS-basierte Tsunami-Frühwarnung“, berichten die GFZ-Wissenschaftler.

Um zu prüfen, wie leistungsfähig ein solches System wäre, haben Hoechner und seine Kollegen dies in einer Simulation nachvollzogen. Sie nutzten die während des Bebens vom japanischen GEONET-Array registrierten GPS-Daten und spielten das Bebenszenario vom 11. März 2011 quasi in Echtzeit nach. Aus den insgesamt 1200 Stationen wählten sie 50, in einem weiteren Ansatz sogar nur 20 aus. Um Wellenhöhen und Ankunftszeiten des Tsunami zu errechnen, fütterten die Forscher ein gängiges Tsunamimodell mit den GPS-Daten zum Versatz des Meeresbodens. Das Ergebnis: Bereits eine Minute nach Bebenbeginn lieferte das System die Information, dass die Magnitude bei mindestens 8,4 lag und dass sich der Meeresboden um sechs Meter angehoben hatte. „30 Sekunden später lag die angezeigte Magnitude bereits bei 8,7 und für weite Teile der japanischen Küste wurden Tsunamihöhen von mehr als zehn Metern vorhergesagt“, berichten die Forscher. Nach drei Minuten habe das Modell dann bereits die endgültige Bebenstärke von 9,0 ermittelt und eine Wellenhöhe des Tsunami von bis zu 29 Metern prognostiziert. Das auf herkömmliche Methoden basierende Frühwarnsystem Japans lag zu diesem Zeitpunkt noch um mehr als eine Magnitude daneben und erwartete auch weitaus geringere Wellenhöhen.

„Das zeigt, wie schnell und präzise ein GPS-basiertes Frühwarnsystem im Falle des Tohoku-Bebens gewesen wäre“, betonen Hoechner und seine Kollegen. Es sei daher immens wichtig, dass die bereits existierenden GPS-Stationen in die bestehenden Tsunami-Warnsysteme integriert werden. Im tsunamigefährdeten Japan ist die Dichte des GPS-Messnetzes bereits dicht genug, um eine akkurate Frühwarnung zu ermöglichen. Im ebenfalls häufig durch Erdbeben erschütterten Indonesien haben die Forscher im Rahmen des deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystems bereits zahlreiche neue GPS-Empfänger installiert, die für das dortige System Daten liefern. „Noch ist die Stationsdichte dort aber nicht hoch genug, um ein allein auf GPS basierendes System zu bilden, aber wir sind dabei, weitere GPS-Empfänger zu ergänzen“, sagt Hoechner.

---

# Feuer und Eis – Die Gletschervulkane Islands 4

Nadja Podbregar

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 unter dem Vatnajökull, dem größten Gletscher Europas, brodeln 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 mit verheerenden Folgen. Allein seit der letzten Eiszeit sind auf der Insel etwa 200 Gletschervulkane ausgebrochen und haben dabei bis zu 500 Kubikkilometer Magma zutage gefördert. Seit der Besiedlung Islands vor mehr als 1100 Jahren sind noch immerhin rund 30 Vulkansysteme aktiv.

---

## Aus Feuer geboren ...

Island ist eine Insel der Gegensätze: Sie liegt nur knapp unterhalb des nördlichen Polarkreises und trotzdem ist ihr Klima nicht viel kälter als das von New York City. Sie liegt mitten auf einem Hot Spot, einem der Pulverfässer der Erdkruste, und doch scheint an der Oberfläche oft alles wie vom Eis erstarrt. Immerhin mehr als ein Zehntel des Landes liegen unter gewaltigen, mehrere hundert Meter dicken Eispanzern verborgen – den Gletschern. Der größte von ihnen, der Vatnajökull, bildet sogar die größte zusammenhängende Eismasse nach Arktis, Antarktis und Grönland. Und wo das Eis fehlt, prägen schroffe Berge und Grate und weite kahle und baumlose Steppen die karge Landschaft der Insel.

Das „Eisland“ erschien schon den ersten Siedlern, Wikingern aus Norwegen und von den britischen Inseln, zunächst als rau und feindlich. Doch als Flüchtlinge vor dem norwegischen König Harald Haarfragri hatten sie vor rund 1100 Jahren keine große Wahl und blieben. Bis heute drängen sich die nur rund 250.000 Einwohner Islands alle im milderen und fruchtbaren Südwestzipfel der Insel und entlang der Küsten. Das karge und wilde Hochland des Inneren ist nach wie vor unbewohnt – und unbewohnbar. Doch nicht nur Schnee und Eis prägen die Landschaft, das Eiland im Nordatlantik ist außerdem die größte Vulkaninsel der Welt. Keine andere Insel dieser Ausdehnung ist rein vulkanischen Ursprungs – aus Feuer geboren.

Der Grund dafür: Geologisch betrachtet hat Island gleich zweifach den Schwarzen Peter gezogen: Die Insel liegt nicht nur an der Grenze zweier wandernder Erdplatten, sondern sitzt auch noch mitten auf einem Hot Spot – einer Stelle, an der glühend heißes Magma aus den Tiefen des Erdmantels bis in die Erdkruste vordringen kann. In Island ist dieser Hot Spot mindestens 200 Kilometer breit und reicht bis zu 450 Kilometer in die Tiefe. Ihm hat die Insel wahrscheinlich ihre Entstehung zu verdanken. Vor rund 20 Millionen Jahren durchdrang das Magma an dieser Stelle den Meeresboden und ließ im Laufe mehrerer Eruptionen langsam eine Insel in die Höhe wachsen. Der Hot Spot hat bis heute seine Lage nicht verändert, wohl aber die darüberliegende Erdplatte. Als Folge ihrer langsamen Wanderungsbewegung durchschmolz das Magma nacheinander verschiedene Stellen der Insel und bildete so ganze Ketten von untereinander verbundenen Vulkanen. Heute liegt der Hot Spot – ausgerechnet – unter dem Vatnajökull, dem dicksten und größten Gletscher Islands und Europas.

---

## **Auseinander gezerrt von gewaltigen Kräften**

Aber dessen nicht genug, sitzt Island auch noch rittlings auf der Grenze zwischen zwei Platten der Erdkruste. Die Insel ist Teil des mittelatlantischen Rückens, der hier die Plattengrenze zwischen der Nordamerikanischen und der Eurasischen Platte bildet. Wie eine gewaltige Naht zieht sich dieser unterseeische Wulst aus Bergen, Gräben und zahlreichen Vulkanen über weit mehr als 20.000 Kilometer einmal längs durch





Blick auf die Riftzone Islands. Hier, im Thingvellir-Nationalpark, hat das Auseinanderweichen der tektonischen Platten die Erde aufgerissen (© Ljuba Brank, Slovenian Wikipedia/CC-by-sa 3.0)

den Atlantik. Sie markiert die Stelle, an der die Platten der Erdkruste auseinanderweichen und neuer Meeresboden gebildet wird. Island ist die einzige Stelle entlang dieses Rückens, die über den Meeresspiegel hinaus ragt, und die einzige Insel, die durch einen solchen mittelozeanischen Rücken regelrecht geteilt wird.

Die beiden sich voneinander weg bewegenden Erdplatten zerren wie Hunde an einem Knochen in entgegengesetzte Richtungen – und Island gibt nach: Pro Jahr um gut zwei Zentimeter wächst die Insel dadurch in die Breite. Doch dieses Wachstum hat seinen Preis: Immer wieder reißen die gewaltigen Kräfte der Krustenbewegungen tiefe Spalten in den Untergrund. Glühendes Magma quillt an die Oberfläche, Lava wird in meterhohen Fontänen ausgeschleudert und begräbt ganze Straßen und Ortschaften unter sich. Obwohl Island der Länge nach von einer Platten-

grenze durchzogen wird, sind aber weder die Vulkane noch die häufig auftretenden Erdbeben gleichmäßig entlang dieser Nahtstelle verteilt. Im Gegenteil: Sie konzentrieren sich im äußersten Südwesten und Süden und dann wieder im hohen Norden der Insel. Warum?

Die Ursache sind Transformstörungen, Verwerfungen, die sich quer zur eigentlichen Richtung der Plattengrenze erstrecken. Sie entstehen, weil das Auseinanderweichen der Platten nicht gleichmäßig, sondern in Schüben geschieht. Da sich die Geschwindigkeit, mit der sich die Platten bewegen, von Ort zu Ort und je nach Beschaffenheit des Untergrunds unterscheidet, treten immer wieder Spannungen im Gestein auf. Werden sie zu groß, bricht der Untergrund und es bilden sich gewaltige Verwerfungszonen, die von der Plattengrenze abzweigen. An den Transformstörungen bewegt sich der Untergrund nicht auseinander, sondern aneinander vorbei. Da die Bruchstellen jedoch rau und uneben sind, verhakt sich das Gestein dabei häufig und die Bewegung wird blockiert. Nach einiger Zeit wird der Druck jedoch zu groß und die Blockade löst sich plötzlich und ruckhaft – die Erde bebt. Gleichzeitig machen diese Risse im Untergrund den Weg frei für aufsteigendes Magma aus dem Erdmantel.

---

## **Feuer am „Tor zur Hölle“ – der Vulkan Hekla**

Für die Bewohner der umliegenden Region galt er lange Zeit als „das Tor zur Hölle“ – der Vulkan Hekla. Und noch heute ist er einer der bekanntesten und gleichzeitig aktivsten Vulkane Islands. Er liegt im Südwesten der Insel, direkt in der Verwerfungszone, die von der durch Island ziehenden Plattengrenze gebildet wird. Zahlreiche explosive Eruptionen formten hier im Laufe der Zeit einen langgestreckten, sich von Südwesten nach Nordosten erstreckenden, zerklüfteten Höhenrücken, den Heklugja. Entlang dieses rund fünf Kilometer langen Grats reihen sich die Krater und Spalten der letzten Ausbrüche aneinander. Immer wieder reißen hier neue Eruptionen tiefe Risse und Querspalten in den Grat. Nur von der Schmal- seite aus gesehen entspricht der Hekla noch dem Bild des klassischen kegelförmigen Stratovulkans.

Die erste Eruption des Hekla in historischer Zeit war gleichzeitig eine der gewaltigsten in der Geschichte Islands. Das unterhalb des Berges liegende Tal Pjorsardalur wurde dabei völlig zerstört. Der explosive Aus-

bruch im Jahr 1104 schleuderte mehr als 2500 Kubikmeter Tephra – Lavabrocken, Asche und feines Geröll – über Kilometer hinweg Richtung Nordwesten. Die Tephra bedeckte hinterher zwei Drittel der gesamten Insel. Heute nutzen Vulkanologen und Geologen diese feine Schicht als wertvolle Zeitmarkierung bei der Datierung von Gletschereis oder Lavaablagerungen anderer Vulkane.

Für Vulkanologen ist der Hekla noch aus einem anderen Grund wichtig und faszinierend zugleich: Das Magma in seinem Inneren dürfte es hier eigentlich gar nicht geben. Seine chemische Zusammensetzung ist nicht nur einzigartig für Island, es ist auch völlig untypisch: Es ähnelt den Magmen, wie sie in Vulkanen entlang der Subduktionszonen rund um den Pazifik gefunden werden. An einer divergierenden Plattengrenze wie in Island jedoch, an der zwei Krustenplatten auseinander weichen, kommt es normalerweise nicht vor. Sowohl die Zusammensetzung des Magmas als auch die Wucht eines Ausbruchs sind beim Hekla keineswegs immer gleich. Vulkanologen haben festgestellt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Zeit, die zwischen zwei Ausbrüchen vergeht, und der Explosivität gibt: Je größer die Ruhepause des Vulkans, desto gewaltiger ist das Erwachen. In den letzten 50 Jahren scheint sich der Hekla auf eine Art Rhythmus eingependelt zu haben: Rund ein bis zwei Mal pro Jahrzehnt wacht er auf und spuckt Feuer und Asche über das Eis Islands.

Das letzte Mal war es am Samstag, dem 26. Februar 2000 der Fall. Der Seismologe Pall Einarsson wollte eigentlich nur kurz am meteorologischen Institut der isländischen Universität vorbeischauen, um das Papier der Seismographen zu wechseln. Doch als er am späten Nachmittag an den Messgeräten hantierte, begannen sie plötzlich auszuschlagen. Ein kurzer Blick genügte und die Quelle der ungewöhnlichen Aktivität war ausgemacht: Der Vulkan Hekla. Dehnungsmesser in der Heklaregion zeigten kurz darauf einen plötzlichen Spannungsabfall, der darauf hindeutete, dass das Magma sich bereits seinen Weg zur Oberfläche zu bahnen begann. 18:17 Uhr war es dann soweit: Das Magma hatte die Oberfläche erreicht und auf einer Länge von sieben Kilometern riss eine glühende Spalte auf. Im Laufe der nächsten beiden Stunden quollen Lavaströme aus dem Riss und strömten an der Ostseite des Vulkangrats die Hänge hinab. Die aschengraue Eruptionssäule ragte zehn Kilometer in die Höhe. Asche fiel noch in 300 Kilometern Entfernung, im Norden Islands vom Himmel.

Da ein Großteil der Asche und Lava auf unbewohntes Gebiet im Norden und Osten des Vulkans traf, hatte der Ausbruch keine größeren direkten Folgen – wohl aber indirekte: Durch die Radiomeldungen alarmiert, strömten tausende von Isländern in das Vulkangebiet, um dem Schauspiel zuzusehen. Gleichzeitig braute sich ein gewaltiger Schneesturm zusammen, der nur wenig später über das Gebiet hereinbrach. Daraufhin brach der Verkehr auf den beiden Bergstraßen komplett zusammen und allein 1500 Menschen saßen in ihren eingeschneiten und liegengebliebenen Autos fest. Was folgte, war der größte Rettungseinsatz seit dem Ausbruch des Heimay im Jahr 1973 – nur dass diesmal weniger gegen Lava als vielmehr gegen die Schneemassen gekämpft werden musste.

---

## Ein Vulkan legt Europa lahm

Mitte April 2010 ging im europäischen Flugverkehr mehrere Tage lang gar nichts mehr: Ganze Lufträume wurden gesperrt, 100.000 Flüge wurden gestrichen, Reisende kamen nicht mehr weg. Die Ursache für das Chaos: der Eyjafjallajökull, ein Vulkan im Süden Islands. Am 14. April 2010 brach er nach mehreren Vor-Eruptionen endgültig aus und schleuderte insgesamt rund 100 Millionen Kubikmeter vulkanisches Material als Aschewolke in die Atmosphäre. Weitere Millionen Kubikmeter spie er als Staub, Lava und Gesteinsbrocken. Auf einer Länge von zwei Kilometern öffneten sich aktive Schlote in der alten Caldera des unter Gletschereis liegenden Vulkans. Das Schmelzwasser des Ausbruchs ergoss sich mehrfach als Flutwelle in die Niederungen und zerstörte Straßen und andere Infrastruktureinrichtungen. Die Bevölkerung der umliegenden Ortschaften wurde evakuiert. Staub, Lavabrocken und Asche vom Vulkan regneten über Südost-Island nieder.

Zu diesem Zeitpunkt erreichte die Aschenwolke bereits eine Höhe von acht Kilometern und wurde erst nach Osten, dann nach Süden abgetrieben – auf den europäischen Kontinent zu. Für den Flugverkehr war dies fatal. Denn fliegt ein Flugzeug in eine Wolke aus Vulkanasche hinein, können im schlimmsten Fall ihre Triebwerke ausfallen. Solche Fälle traten in den 1980er Jahren bereits mehrfach nach Vulkanausbrüchen in Indonesien auf. Zudem behindert die Asche die Sicht der Piloten und stört die Sensoren. Aus diesem Grund wird ab einer bestimmten Aschen-



Die Eruptionswolke des Eyjafjallajökull am 17. April 2010 (© Árni Friðriksson/CC-by-sa 3.0)

konzentration ein Flugverbot für Verkehrsmaschinen empfohlen. Genau dies passierte auch nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull: Aus Sicherheitsgründen schloss ein Land nach dem anderen seinen Luftraum und sagte Flüge ab.

Wie aber konnte es dazu kommen? Eine Überraschung war der Ausbruch eigentlich nicht. Zwar ist der Eyjafjallajökull seit der Besiedelung Islands um 870 erst vier Mal ausgebrochen, das letzte Mal im Jahr 1822. Doch die jüngste Eruption des Vulkans kündigte sich bereits Monate vorher an. Der Feuerberg stand daher bereits seit Sommer 2009 unter strenger Beobachtung. Mittels GPS-Messungen an den Vulkanflanken und Satellitenaufnahmen registrierten und kartierten Forscher um Freysteinn Sigmundsson von der Universität von Island jede Regung des Vulkans, der etwas abseits der sich durch Island ziehenden Riftzone liegt. Die Messungen enthüllten, dass der Eyjafjallajökull bereits elf Wochen

vor seinem ersten Ausbruch damit begann, sich auszudehnen – für die Forscher ein Hinweis, dass Magma aus der Tiefe in die flachen Kammern und Gänge des Vulkans eindrang und aufzusteigen begann.

Als am 20. März 2010 erstmals Lava aus einem Spalt an der Flanke des Vulkans ausbrach, hatten sich die Hänge bereits um mehr als 15 Zentimeter gehoben. Dabei floss silikatreiche Lava aus Spalten und Schloten des Passes Fimmvörðuháls bis über die Eisdecke. Wenn ein aktiver Vulkan ausbricht, schrumpft dabei normalerweise die Magmakammer in seinem Inneren recht schnell: Austretende Lava und Gase verringern den Druck, an der Oberfläche senkt sich dadurch der Untergrund wieder ab. Doch der Eyjafjallajökull verhielt sich in dieser Hinsicht ungewöhnlich. Während normalerweise die Flanken ausbrechender Vulkane rapide absinken, blieben die GPS-Werte für die Hänge des Eyjafjallajökull gleichbleibend hoch – selbst auf dem Höhepunkt der Haupteruption ab dem 14. April.

Erst als sich die Lava am 22. April 2010 einen neuen Ausgang suchte und durch den Gletscher am Gipfel brach, begannen sich die Vulkanflanken deutlich zu senken. Zum Erstaunen der Vulkanologen geschah dies allerdings in einem deutlich anderen Muster und an anderen Stellen als die vorhergehende Hebung. Nach Ansicht von Sigmundsson und seinen Kollegen ist dies ein Hinweis, dass das Magma im Inneren des Vulkans nicht nur in eine Magmenkammer einströmte und von dort aus aufstieg, sondern in einem sehr viel komplexeren System verteilt war. Ihre Vermutung: Weil der Eyjafjallajökull vor diesem Ausbruch fast 200 Jahre ruhte, waren die inneren Strukturen im Untergrund abgekühlt. Das wiederum behinderte den Magmafluss und führte zum untypischen Verhalten des Feuerbergs.

---

## **Bardarbunga und Grimsvötn – verborgenes Feuer unter dem Eis**

An der Oberfläche der riesigen Eiskappe des Vatnajökull scheint alles ruhig und vor allem kalt – doch dieser Eindruck täuscht. Unter der Eisdecke des größten Gletschers Europas brodeln es. Hier, im Zentrum der Vulkaninsel, treffen der isländische Hot Spot und die langgestreckte vul-

kanische Zone des mittelatlantischen Rückens zusammen. Das Ergebnis: Ein gewaltiges Netz aus Schloten, Kratern und unterirdischen Magmenkanälen, das sich über Kilometer hinzieht. Unter dem Vatnajökull liegen nicht nur die höchsten, sondern auch die aktivsten Vulkane Islands. Das Bardarbunga- und Grimsvötn-System gehört dabei zu den produktivsten der Insel. Das Magma aus diesem Reservoir hat einige der größten Eruptionen Islands gespeist, darunter auch den gewaltigen Ausbruch des Laki im Jahr 1783.

Typischerweise wechseln sich bei den Gletschervulkanen Zentralislands Zeiten der relativen Ruhe mit Perioden erhöhter vulkanischer Aktivität ab. Während der aktiven Zeiten strömt Magma aus den Tiefen des Erdmantels in die großen Magmenkammern im Untergrund. Über die zahlreichen Kanäle und Gräben des Systems kann sich das glühende Gestein von den zentralen Kammern bis zu den Ausläufern des Vulkansystems ausbreiten. Doch einige Vulkane des „Eislandes“ stehen auch über das Kanalsystem hinaus miteinander in Verbindung. Vulkanologen haben beobachtet, dass immer dann, wenn der Vulkan Krafla im Norden der Insel sich durch Magmaeinstrom aufbläht, der Bardarbunga unter dem Vatnajökull schrumpft. Sie vermuten, dass Druckschwankungen im halbgeschmolzenen Magma des Erdmantels für diesen „Wippeneffekt“ verantwortlich sind.

Im Durchschnitt alle zwei bis drei Jahre entlädt sich die geballte Energie aus dem Erdinneren – einer der Gletschervulkane bricht aus. Doch im Bardarbunga-Grimsvötn-System schien dieser Rhythmus zeitweilig unterbrochen zu sein: Nach dem großen Ausbruch im Jahr 1938 folgte eine mehr als 60 Jahre lange Phase der Ruhe. Nur ab und zu produzierte das Vulkansystem leichte Erdstöße, so, als wolle es sich wieder in Erinnerung rufen. Doch im Herbst 1996 ist die Ruhepause zu Ende – der Vulkan erwacht. Am 29. September entdecken die Seismologen des Meteorologischen Instituts in Reykjavik die ersten Anzeichen für eine bevorstehende Veränderung: Statt der typischen kurzen Erdstöße ohne weitere Folgen, gehen nun von der Vulkanregion um Bardarbunga und Grimsvötn besonders starke, von Nachbeben gefolgte Beben aus.

Als die seismischen Messgeräte in der Nähe der Vulkane immer mehr Beben registrieren, alarmieren die Seismologen die zuständigen Katastrophenschutzbehörden. Ihr Rat: sich auf einen möglicherweise bevorstehenden Ausbruch vorzubereiten. Während der Nacht beginnt ein kon-





Blick über den Vatnajökull-Gletscher auf den Gletschervulkan Grimsvötn, der größtenteils unter dem Eis verborgen liegt (© Roger McLassus/CC-by-sa 3.0)

tinuierliches hochfrequentes Zittern, die anhaltenden Beben zu begleiten. Für die Seismologen Grund zur Sorge, denn dieser charakteristische Tremor war auch schon kurz vor anderen Ausbrüchen in der Region beobachtet worden. Sie empfehlen, vorsorglich die Öffentlichkeit zu informieren. Die Epizentren der Erdstöße verlagern sich währenddessen langsam entlang eines unterirdischen Magmakanalns vom Bardarbunga zum Grimsvötn-Vulkan. Um 19:00 Uhr am Abend des gleichen Tages verbreitet das isländische Radio die Warnmeldung. Keine drei Stunden später zeigen die Seismographen im Meteorologischen Institut einen plötzlichen Abfall der Erdbebenaktivität am Grimsvötn, gefolgt von einem für Eruptionen typischen Zittern – der Grimsvötn ist ausgebrochen.

Noch ist allerdings von den dramatischen Ereignissen nicht viel zu sehen – der 450 Meter dicke Eispanzer des Gletschers überdeckt alles. Doch in der Tiefe brodeln es: Vulkanische Gase und das mehr als 1000 Grad heiße Magma quellen aus ihrem unterirdischen Reservoir und beginnen, sich einen Weg durch die Eisdecke zu schmelzen. Am Morgen des ersten Oktober sind vom Flugzeug aus bereits zwei immer tiefer



werdende, ein bis zwei Kilometer breite Senken in der Gletscheroberfläche zu erkennen. Im Untergrund bahnen sich die Schmelzwassermassen einen Weg unter dem Eis hindurch und strömen in einen subglazialen See. In den ersten 24 Stunden wächst seine Wassermenge um 5000 Kubikmeter pro Sekunde an. Nur von einer Eisbarriere zurückgehalten, beginnt der Wasserspiegel des Sees langsam zu steigen.

An der Oberfläche hat sich unterdessen die Eruption endlich ihren Weg durch das Eis gebahnt. Eine mehr als 4000 Meter hohe Aschensäule steigt in den Himmel. Im Laufe der nächsten zwölf Tage bedeckt die Eruption die Hälfte des gesamten Gletschers mit einer dünnen Aschenschicht. Dann hört der Vulkan auf, Lava zu speien. Der Ausbruch ist vorüber – aber nur scheinbar. Denn noch während an der Gletscheroberfläche des Vatnajökull alles wieder zur Normalität zurückkehrt, bahnt sich im Untergrund, durch die Eisdecke vor den Augen der Beobachter verborgen, bereits eine Katastrophe an: Noch immer strömen gewaltige Schmelzwassermassen von der Ausbruchsstelle in das unter dem Gletscher liegende Reservoir des Grimsvötn-Sees. 500 bis 700 Kubikmeter Wasser pro Sekunde lassen den Wasserspiegel des Sees immer weiter ansteigen – weit über die kritische Marke hinaus.

---

## Der große Jökulhlaup

Schon unter normalen Bedingungen schmelzen durch die geothermische Hitze bis zu 5 Kubikkilometer Eis pro Jahr von der Basis des Gletschers ab und füllen im Laufe der Zeit das Grimsvötn-Reservoir. In der Regel kommt es daher alle vier bis sechs Jahre zu einem sogenannten Jökulhlaup – einem Gletscherlauf, bei dem das Schmelzwasser die vergleichsweise dünne Eisbarriere durchbricht, die wie ein natürlicher Staudamm den Ausfluss des Sees blockiert. In einer reißenden Sturzflut schießt das Wasser dann unter dem Gletscher hervor und überflutet die unterhalb liegenden Ebenen.

Für die Wissenschaftler des Meteorologischen Instituts in Reykjavik besteht daher auch im Oktober 1996 kein Zweifel: Der nächste Gletscherlauf ist überfällig. Schon jetzt ist der Wasserspiegel im See auf mehr als 1504 Meter gestiegen – und noch ist kein Ende abzusehen. Die auf dem See liegende Eisdecke, auf der die Messgeräte der Forscher stehen,

hebt sich weiterhin um 15 bis 20 Meter pro Tag. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis die Eisbarriere am Seeausgang nachgibt. Wenn der Gletscherlauf kommt, muss alles sehr schnell gehen. Die Behörden bereiten daher alles für eine rasche Evakuierung der unterhalb des Gletschers liegenden Sandur-Ebene vor und richten sich darauf ein, die Ringstraße, eine der Hauptverkehrsadern Islands, rechtzeitig zu sperren. Alles wartet auf das Wasser.

Am 4. November ist es dann soweit: Die Seismometer auf der Eisfläche oberhalb des Grimsvötn schlagen aus. Ein kontinuierliches schnelles Beben deutet daraufhin, dass 250 Meter tiefer das Wasser die Eisbarriere angehoben hat und unter dem Eis talwärts rast. Die Forscher schlagen Alarm. Am nächsten Morgen ist die Flut da: Schwarzes Schmelzwasser, durchmischt mit großen, schmutzigweißen Eisbrocken, schießt unter dem Eis des Gletschers hervor und strömt in den Fluss Skeidara. Durch die Erschütterungen brechen gewaltige Eisberge von der Gletscherfront ab und werden vom Wasser mitgerissen. Bis zum Mittag haben die Fluten die Ebene erreicht und die Ringstraße, die Hauptverkehrsader, die den Süden und Osten Islands verbindet, an mehreren Stellen weggespült. Zwei Brücken über Gletscherflüsse werden fast sofort von den Wassermassen weggerissen, Strom- und Kommunikationsverbindungen in der Region sind zerstört. Nach einem Flug über die betroffenen Gebiete beklagt Premierminister David Oddsson: „In nur vier Stunden hat diese Katastrophe uns im Straßenbau um 20 bis 30 Jahre zurückgeworfen.“ Mit bis zu 45.000 Kubikmeter pro Sekunde schießt das Wasser am nächsten Tag noch immer aus dem scheinbar unerschöpflichen Reservoir unter dem Eis hervor, inzwischen ist auch die 900 Meter lange Skeidarabrücke gefährdet.

Doch dann beginnt die Flut langsam wieder abzuebben. Einen Tag später, am 7. November, ist der Jökulhlaup vorbei. Er hinterlässt ein Bild der Verwüstung: Die Ringstraße ist nur noch in Teilen vorhanden, von der Skeidarabrücke, einem der teuersten Bauwerke Islands, stehen nur noch 700 Meter und auch die sind stark beschädigt. Die Schäden gehen in die Millionen. Die Forscher sprechen vom stärksten Jökulhlaup seit 1938. In nur drei Tagen hat sich fast der gesamte See in die Ebene entleert. Der Wasserspiegel im Grimsvötn-Reservoir ist in dieser Zeit um mehr als 150 Meter abgesunken, ein Rekordwert.

## Leben im Schatten der Gefahr

„Und nun das Wetter: Heiter und trocken, Temperaturen um Null Grad. Aktuelle Erdbebenlage: In der Stadt Hveragerdi Stärke 4,1 auf der Richter Skala, nahe Selfoss 3,3 ...“ – für unsere Ohren klingt dieser kombinierte Wetter- und Erdbebenbericht seltsam und bedrohlich. Doch für die Einwohner Islands gehören solche Meldungen zum Alltag. Die Lage der Insel auf einer aktiven Plattengrenze sorgt nicht nur für reichlich vulkanische Aktivität, sondern lässt auch immer wieder die Erde beben. Obwohl die kleineren Beben oft nur noch Schulterzucken oder allenfalls ein kurzes Innehalten auszulösen scheinen, sind sich die Isländer der allgegenwärtigen Gefahr sehr wohl bewusst.

Die Angst vor dem großen Ausbruch, der großen Katastrophe ist auch durchaus berechtigt. Als 1973 der Vulkan Eldfell auf der Insel Heimaey vor der Südwestküste Islands ausbrach, drohte die gewaltige Eruption einen ganzen Ort zu vernichten. Auf einer Länge von mehr als zwei Kilometern riss der Untergrund auf und feurige Lavafontänen stiegen meterhoch auf. Der Riss spaltete die halbe Insel. Die 5300 Einwohner des Fischerortes Vestmannaeyjar konnten nur durch sofortige Evakuierung gerettet werden. Zwar ist der größte Teil Islands nur dünn besiedelt oder sogar menschenleer und ein Vulkanausbruch in diesen Gebieten hätte daher nur geringe Folgen.

Aber ausgerechnet die am dichtesten besiedelte Region liegt in einer der aktivsten und gefährlichsten Zonen der Feuerinsel. In und um die Hauptstadt Reykjavik herum leben mehr als die Hälfte der 250.000 Einwohner Islands. Und hier, in der sogenannten Südisländischen Seismischen Zone, ist der Untergrund der Feuerinsel besonders unruhig. Jeden Tag registrieren die Messinstrumente der Seismologen gleich mehrere kleinere Erdbeben und der nächste aktive Vulkan liegt weniger als 40 Kilometer vom Stadtzentrum entfernt. Würde der Hengill ausbrechen, könnte entweder der Ausbruch selbst oder aber ein begleitendes schweres Erdbeben die Stadt ernsthaft bedrohen. Damit müssen die Einwohner Reykjaviks leben, denn verhindern lässt sich eine Eruption des Vulkans nicht.

Um wenigstens rechtzeitig warnen zu können, überwacht ein seismologisches Messnetz die wichtigsten Gefahrenzonen. Im Gegensatz zu an-

deren Ländern ist in Island nicht ein geologisches Landesamt für die Erdbebenüberwachung und Berichterstattung zuständig, sondern das staatliche Wetterbüro. Schon seit 1925 sammelte und analysierte das Institut Daten über Wetter, Wind und Regen, die Wetterstationen lagen meist auf Farmen über das Land verteilt. So war es nur logisch, das bestehende Netz auch für seismische Messungen zu nutzen. Nach und nach wurden daher immer mehr Seismometer auf Bauernhöfen in den vulkanisch aktiven Gebieten Islands installiert. Die Bauern lasen dann eben nicht nur die Wetterdaten ab, sondern kümmerten sich gleich mit um die Seismometer. Vor der Ära des Internets und der Fernübermittlung von Daten lief allerdings alles noch relativ geruhsam ab: Die ehrenamtlichen „Ableser“ schickten die Papierrollen mit den Daten einmal wöchentlich per Post in die Hauptstadt Reykjavik. Nur in dringenden Fällen alarmierten sie die Zentrale per Telefon oder Funk.

Heute ist das Messnetz weitestgehend automatisiert. Die tektonisch besonders aktiven Regionen der Insel im Südwesten und Norden werden rund um die Uhr überwacht. Nicht nur Seismographen, sondern auch GPS-Sensoren registrieren jedes Schwanken der Erde und jede noch so schleichende Verlagerung der Erdplatten. Per Datenleitung übermitteln sie die Informationen 24 Stunden am Tag „in Real-Time“ an die Zentrale. Dort werden die Epizentren automatisch in Karten eingetragen und anschließend die Daten von Seismologen begutachtet und analysiert. Der „Seismologe vom Dienst“ stellt fest, ob es sich „nur“ um ein tektonisches Beben handelt oder ob die Ausschläge der Seismographen vielleicht die Vorboten einer kommenden Eruption des Hengills oder eines anderen Vulkans sind. Entdeckt er in den Seismogrammen das charakteristische Muster des Tremors, der einen Ausbruch ankündigt, gibt er Alarm.

---

## **Reykjavik in Gefahr? Unruhige Erde unter der Hauptstadt**

Seit einigen Jahren ist das unmittelbar um die isländische Hauptstadt liegende Gebiet in den Mittelpunkt der Untersuchungen der isländischen Seismologen und Vulkanologen gerückt. Der Grund: Im Untergrund von Reykjavik wächst die Spannung. Sowohl die Wanderungsbewegungen

der tektonischen Platten als auch der anwachsende Magmendruck im Inneren der Erde machen die Region inzwischen zur Gefahrenzone Nummer eins. Seit 1995 bebt die Erde hier immer häufiger, die Epizentren liegen dabei teilweise nur knapp außerhalb der Stadtgrenzen von Reykjavik. An manchen Tagen werden bis zu 1200 Beben innerhalb von 24 Stunden registriert, einige von ihnen erreichen immerhin die Stärke 4 auf der Richterskala. Eine vergleichbar starke Erdbebenaktivität hat es zuletzt in den fünfziger Jahren gegeben.

Für die Wissenschaftler des isländischen Wetterbüros kein sehr beruhigendes Anzeichen. Und noch etwas kommt hinzu: In dieser eigentlich so aktiven tektonischen Region hat es bereits seit 600 Jahren keinen Vulkanausbruch mehr gegeben – ist der nächste nun überfällig? Sicher weiß es niemand, doch einen wahrscheinlichsten Kandidaten dafür haben sich die Forscher bereits ausgesucht: den Hengill. Schon im August 1996 beobachteten Vulkanologen eine erhöhte Aktivität unter dem Feuerberg. Sie registrierten einen verstärkten Magmaeinstrom in die östliche der beiden Magmenkammern unter dem Vulkan. Von ihr ist zuletzt vor rund 10.000 Jahren eine Eruption ausgegangen, jetzt beginnt sie sich offenbar wieder zu füllen. GPS-Messungen zeigen, dass sich auch die Erdoberfläche über der Magmenkammer bewegt. Von 1992 bis 1996 hob sich der Untergrund hier um fünf Zentimeter. Dies ist zwar verglichen mit anderen aktiven Vulkanen nicht viel, aber doch ein deutliches Anzeichen für Aktivität im Untergrund.

Für die Vulkanologen ist es immerhin ein Anlass, den Hengill unter ständige Überwachung zu stellen. 1999 wurde ein spezielles Messgerät auf dem Erdboden in der Nähe des Vulkans installiert. Es soll Magmabewegungen in der Tiefe beobachten und übermittelt seine Daten direkt per Satellitenlink an die Zentrale in Reykjavik. Doch auch an anderen Stellen Islands scheint das Feuer wieder zu erwachen. Für den Hot Spot unter dem mehrere hundert Meter dicken Eispanser des Vatnajökull sind die Prognosen ebenfalls nicht gerade beruhigend: Die Forscher sind sich inzwischen relativ sicher, dass es unter dem Gletscher brodelt. Sie prognostizieren für die nächsten 20 bis 30 Jahre eine extrem aktive Periode der 200 Kilometer weiten und 450 Kilometer tief reichenden Magmenquelle. Fast jedes Jahr, so die Vulkanologen, muss hier mit einem Ausbruch gerechnet werden.

Nadja Podbregar

Über 500 aktive Vulkane gibt es auf unserem Planeten, dazu kommen unzählige ruhende und erloschene Feuerberge. Sie haben die Geschichte der Erde, aber auch die des Menschen entscheidend geprägt. Wie ein Vulkan aussieht und welche Art von Eruptionen er verursacht, kann dabei ganz unterschiedlich sein. Vom sanften Riesen mit stetigem, leichtem Lavafluss bis zu gewaltigen Explosionen scheinbar aus dem Nichts ist alles dabei. Zu verstehen, welche Mechanismen hinter den Ausbrüchen stehen, ist eine wichtige Voraussetzung um drohende Ausbrüche rechtzeitig vorhersagen zu können.

---

## Eine Frage der Lage

Ein Vulkan ist per Definition zunächst nicht viel mehr als eine Öffnung in der Erdkruste, durch die glutflüssiges Gestein oder dessen Abkömmlinge an die Oberfläche dringen. Typischerweise geschieht dies überall dort, wo sich das Magma seinen Weg entlang von Schwachstellen in der festen Kruste der Erde bahnen kann. Meist ist dies entlang der Plattengrenzen der Fall – der Nahtstellen zwischen den tektonischen Platten der Erde. Dort scheinen Vulkane teilweise wie die Perlen auf einer Schnur aufgereiht. Besonders viele Feuerberge finden sich im Pazifischen Feuerring, einem Vulkangürtel rund um den Pazifischen Ozean. Er ist von Subduktionszonen umrahmt, Plattengrenzen, an denen die Pazifische Platte mit dem Kontinent kollidiert und in die Tiefe gedrückt wird. Dabei wird das Gestein der abtauchenden Platte aufgeschmolzen: Schon 100 Kilometer unter der Erdoberfläche ist es immerhin bereits zwischen 1000 °C

und 1500 °C heiß. Das entstehende schmelzflüssige Magma steigt auf, dringt durch Spalten und Schwachstellen der Plattengrenze und bildet einen Vulkan. Fast 65 Prozent aller Vulkane liegen in solchen Subduktionszonen. Die Feuerberge der Anden oder ozeanischen Inselbögen, wie zum Beispiel Japan, sind typische Beispiele für diesen Vulkantyp.

Aber auch an anderen Plattengrenzen gibt es Vulkane: Ein Beispiel für Vulkanismus an auseinanderweichenden Platten sind die Vulkane am Ostafrikanischen Graben, aber auch die Feuerberge entlang des Mittelatlantischen Rückens. Größtenteils liegen sie unter Wasser, teilweise aber türmten vergangene Eruptionen genügend Lava auf, um Inseln wie die Azoren entstehen zu lassen. Immerhin rund sieben Prozent aller Vulkane liegen vor unserer Haustür – im Mittelmeerraum. Hier kollidieren die Afrikanische und die Eurasische Platte miteinander. Im Laufe der Erdgeschichte bildete sich dadurch ein komplexes Gefüge von Verwerfungen und Nahtstellen. In Süditalien liegen mit Vesuv, Ätna, Vulcano und Stromboli gleich mehrere der aktivsten Vulkane Europas. In der Ägäis zeugt die griechische Insel Santorin noch heute von einem gewaltigen Ausbruch vor rund 3500 Jahren. Sie ist der Rest eines Kraters, den die Eruption damals aufriss, bei der ein Großteil der früheren Insel zerstört wurde.

Die Vulkaninsel Hawaii ist ein Beispiel für einen weiteren, von sogenannten Hot Spots verursachten Vulkantyp. Sie entstehen dort, wo im Erdmantel lokal begrenzte Stellen besonders heißen Magmas existieren. Diese Schmelze steigt auf und brennt sich förmlich durch die darüber liegende Erdkruste. Weil die Erdplatten wandern, wandert auch die Stelle, an der dieser geologische „Schneidbrenner“ die Kruste durchdringt. Als Folge bilden sich im Laufe der Erdgeschichte ganze Reihen von dicht nebeneinander liegenden Vulkanen. An ihrer Abfolge lässt sich die Wanderungsrichtung der Platte gut ablesen: 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 sich noch die Unterwasserberge der sogenannten Emperor Chain ebenso regelmäßig wie im Gänsemarsch an die Hawaii-Inseln an. Aktiv sind dabei jeweils nur die Vulkane direkt über dem Hot Spot. Mauna Loa, Kilauea und Co entfernen sich langsam aber stetig vom Zentrum des Hot Spots und werden daher eines Tages ebenfalls erkalten.

## **Der Klassiker: die plinianische Eruption eines Schichtvulkans**

Aber nicht nur in ihrer Lage unterscheiden sich die Vulkane, auch in ihrer Form. Denn das Aussehen eines Vulkans ist geprägt durch eine Vielzahl von Faktoren: die Zusammensetzung des Magma im Untergrund, ihre Lage in Bezug auf Geografie und Geologie und die Art ihrer Eruptionen. Dem klassischen Bild eines Feuerbergs entsprechen am ehesten die Schicht- oder Stratovulkane: Diese meist symmetrischen Bergkegel können mehrere tausend Meter hoch aufragen und bilden den häufigsten Vulkantyp der Erde. Zu ihnen gehören so bekannte Feuerberge wie der Ätna und Vesuv in Italien, der Pinatubo in Indonesien oder der Fuji in Japan. Auch der höchste Vulkan der Erde, der 6887 Meter hohe Ojos del Salado in Chile, ist ein solcher Schichtvulkan. Sie verdanken ihre typische Form einem sehr kieselsäurereichen, und dadurch eher zähflüssigen, Magma. Dieses staut sich sehr leicht im Schlot und bildet dann, da es mit 700 bis 900 °C eher kühl ist, erstarrte oder halberstarrte Pfropfen.

Die im Magma enthaltenen Gase sorgen dafür, dass sich der Druck im Inneren des Vulkans immer weiter erhöht, bis dann schließlich der Pfropfen abgesprengt wird. Denn für die Heftigkeit und Art des Ausbruchs spielt dabei neben der Zähigkeit des Magmas vor allem auch sein Gasgehalt eine wichtige Rolle. Im geschmolzenen Gestein sind vulkanische Gase wie Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Chlorwasserstoff und Wasserdampf gelöst. Verändern sich Temperatur und Druck der Schmelze, beispielsweise durch ein plötzliches Austreten der Lava, werden sie freigesetzt. Wie ein explodierender Dampfkochtopf schießen dann Gas gemischt mit zerrissenen Gesteinsfetzen und Asche aus dem Schlot.

Eine explosive Eruption ist die Folge, bei der Asche und Gase bis zu 40 Kilometer hoch in die Atmosphäre geschleudert werden können. Mit hinauskatapultiert werden mit mehreren hundert Metern pro Sekunde auch Lavabrocken und anderes Lockermaterial, auch als Tephra bezeichnet. Danach tritt typischerweise die unter dem Pfropf gestaute Lava aus und strömt die Hänge des Berges hinab. Dieser Wechsel von Aschen und Tephra gefolgt von Lavaströmen bildet im Laufe der Zeit typische, sich abwechselnde Ablagerungsschichten am Schlot, aus denen nach und nach der kegelförmige Feuerberg heranwächst.



Eine der stärksten und typischsten Ausbrüche eines solchen Schichtvulkans im 20. Jahrhundert ereignete sich im Mai 1980 am Mount St. Helens im Süden des US-Bundestaats Washington. Er gilt bis heute als Modellfall für eine sogenannte plinianische Eruption – einen explosiven, aschenreichen Ausbruch – und war einer der tödlichsten und ökonomisch verheerendsten Vulkanausbrüche in der Geschichte der USA. Auch bei diesem Schichtvulkan verstopft zunächst ein Magmapfropf den ursprünglichen Schlot, als Folge steigt der Druck im Inneren des Vulkans an. Die Bewegungen des Magmas lösen schon im März 1980 Hebungen der Bergflanken und zahlreiche Erdbeben aus – typische Vorzeichen einer Eruption. Aus dem Gipfelkrater steigen erste Rauch- und Aschewolken auf, Risse bilden sich. Mehr Sorgen aber bereitet den Vulkanologen eine Auswölbung an der Nordseite des St. Helens, die mit jedem Tag um eineinhalb bis zwei Meter wächst – offenbar bahnt sich das Magma einen neuen Weg nach außen. Anzahl und Schwere der Erdstöße rund um den Vulkan nehmen zu.

Am 18. Mai um 08:32 Uhr morgens ist es dann soweit: Ein erneuter Erdstoß der Stärke 5,1 bringt die gesamte Nordflanke des Mount St. Helens zum Abrutschen und reißt dabei auch die Aufwölbung auf. Die gesamte Bergflanke explodiert. Die Explosion setzt die Energie von 24 Megatonnen TNT frei, dies entspricht dem rund 1.600-Fachen der Atombombe von Hiroshima. Der Vulkan schleudert mehr als vier Kubikmeter vulkanisches Material aus, ein Großteil davon Asche, Bimsstein und Gesteinsbrocken.

---

## **Pyroklastischer Strom: eine rasende Wolke aus Glut und Asche**

Auch eine der tödlichsten Auswirkungen eines vulkanischen Ausbruchs bringt die Eruption des Mount St. Helens mit sich: pyroklastische Ströme. Diese dichte, glutheiße Wolke aus überhitzten vulkanischen Gasen, Asche, Bimsstein und pulverisiertem Gestein schießt aus dem Berg hinaus hangabwärts. Solche pyroklastischen Ströme entstehen meist dann, wenn eine aus dem Schlot ausgeschleuderte Eruptionswolke kollabiert. Auftrieb und Hitze reichen nicht mehr aus, um das glühende Gas-Aschen-Gemisch in der Höhe zu halten, und es fällt in sich zusammen.



Heiße Asche und Gase stiegen beim explosive Ausbruch des Mount St. Helens kilometerhoch in die Atmosphäre (© USGS/CVO/Donald A. Swanson)

Dadurch wird das Gemisch komprimiert, ist dichter und schwerer als die umgebende Luft und fließt nun als Hochgeschwindigkeits-Jet die Bergflanken hinab. Das Volumen eines solchen pyroklastischen Stroms kann mehr als tausend Kubikkilometer erreichen

Das Gas-Aschen-Gemisch bewegt sich so schnell, dass es kurzzeitig sogar Schallgeschwindigkeit erreichen kann und selbst Wasserflächen mühelos überwindet. Wie dies möglich ist, zeigten Forscher der Universität Kiel im Jahr 2006 bei einem Experiment mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera. Sie filmten damit einen künstlich erzeugten pyroklastischen Strom, den sie auf eine Wasserfläche leiteten. Wie die Aufnahmen enthüllten, sanken schwerere Anteile des Gemischs ins Wasser ein. Die leichte, glühende Asche aber erhitze die Wasseroberfläche so stark, dass sich über ihr eine Dampfschicht bildete. Dies führte dazu, dass der pyroklastische Strom wie auf einem Luftkissen noch schneller über das Wasser raste, ohne nennenswert einzusinken oder abgebremst zu werden. Beim Ausbruch des Vulkans Krakatau im Jahr 1883 soll ein pyroklastischer Strom auf diese Weise sogar von der Vulkaninsel bis an die Küste Sumatras gelangt sein – immerhin rund 48 Kilometer über das Meer hinweg.

Bei der Eruption des Vulkans Soufrière Hills auf der Karibikinsel Montserrat im Jahr 1997 belegten Filmaufnahmen Ausläufer pyroklastischer Ströme noch einen Kilometer vom Ufer der Insel entfernt. Die rasenden Aschenströme begruben damals auch die sechs Kilometer vom Vulkan entfernt liegende Hauptstadt Plymouth unter sich und bedeckten sie mit einer meterhohen Schicht aus Asche und Gesteinstrümmern. Beim Ausbruch des Mount St. Helens trug der pyroklastische Strom selbst Hügelgrate ab, verdampfte das Wasser zweier Gewässer und vernichtete 600 Quadratkilometer Wald. Der heiße Strom schmolz Schnee und Eis an den oberen Hängen des Feuerberges und löste so Lahare aus, gewaltige Schlammlawinen. Der Begriff Lahar stammt aus dem Indonesischen, dort treten solche Schlammströme häufig an dortigen aktiven Vulkanen auf. Je nach Mischungsverhältnis können sie dünnflüssig sein und schnell zu Tal rasen oder aber langsam, mit einer Konsistenz ähnlich feuchtem Zement. Auch dann aber besitzen diese Ströme eine gewaltige Kraft, die selbst zehn Meter große Felsbrocken mit sich reißt und Gebäude vollkommen zerstören oder unter sich begraben kann.

Auch bei einem der berühmtesten Vulkanausbrüche der Geschichte, dem Ausbruch des Vesuv im Jahr 79 nach Christus, spielten pyroklasti-

sche Ströme eine unrühmliche Rolle. Sie waren es, die die römische Stadt Herculaneum unter sich begruben. Als der Vesuv am 24. August 79 in einer heftigen plinianischen Eruption ausbrach, schleuderte er zunächst eine mehr als 20 Kilometer hohe Säule aus Asche und Gesteinsmaterial in die Höhe. Der nach Südosten wehende Wind trieb diese Aschenwolke über die Stadt Pompeji und ließ Asche, Bimsstein und Lavabrocken auf die Straßen und Plätze hinabregnen. Die Stadt Herculaneum blieb zunächst verschont, weil sie auf der anderen Seite des Berges lag. Das änderte sich jedoch in der folgenden Nacht, als die Eruptionssäule kollabierte und mehrere aufeinanderfolgende pyroklastische Ströme die Hänge des Vesuvs hinunter strömten. Die ersten pulverisierten und verbrannten mit Temperaturen von mehr als 400 °C und Geschwindigkeiten von bis zu 300 Kilometern pro Stunde alle Lebewesen, die sie erwischten. Nachfolgende Ströme waren langsamer und zähflüssiger, sie begruben die Stadt und ihre Gebäude mit einer dicken Schicht aus Asche und Gestein.

---

## **Phreatische Explosionen – fatale Kombination aus Wasser und Glut**

Besondere Wucht entfaltet eine Eruption dann, wenn aufsteigendes Magma mit Grundwasser in Kontakt kommt oder wenn Wasser in eine Magmakammer eindringt. Durch die Hitze verdampft das Wasser und dehnt sich dabei explosionsartig bis auf das 2.500-fache Volumen aus. Diese Explosion zerfetzt das Gestein von Schlot und Kammer, schleudert Material in einem gewaltigem Wall nach außen und lässt eine gewaltige Wolke aus Wasserdampf und Asche in die Atmosphäre steigen. Heute vermutet man, dass auch der Ausbruch des Vulkans Krakatau am 27. August 1883 eine solche phreatomagmatische Eruption war: Als die Flanken des Feuerbergs auseinanderbrachen, drang Meerwasser in die Magmakammer ein und löste die heftigste und lauteste der Explosionen aus. Ihr Knall wurde selbst noch im knapp 2000 Kilometer entfernten Perth in Australien gehört und vermutlich sogar auf einer Insel des Mauritius Archipels im Indischen Ozean.

Eine Sonderform der phreatomagmatischen Eruption sind Maare. Sie entstehen, wenn eine Magmakammer im Untergrund mit Wasser in Kon-

takt kommt und explodiert. Dabei stürzt die Kammer in sich zusammen und hinterlässt einen Trichter, der von einem flachen Wall aus Trümmergestein umgeben ist. Weil kaum Magma an die Oberfläche dringt, bildet sich statt eines Feuerbergs ein eingesenkter Krater. Durch die große Hitze verschmilzt das Gestein am Kratergrund und bildet eine wasserundurchlässige Schicht. Im Laufe der Zeit sammelt sich daher in diesen Senken Wasser – ein Maar entsteht. In Deutschland sind die Maarseen in der Eifel auf diese Weise entstanden.

Mehrere Nummern kleiner sind die Explosionen bei der Begegnung von Lava und Ozean auf Hawaii. „Die Atmosphäre war in allen Richtungen von Aschen, Gischt und Gasen erfüllt, während brennende Lava in Millionen winziger Partikel zerbarst, als sie das Wasser berührte“ – so beschrieb ein hawaiianischer Geistlicher ein solches Ereignis im Jahr 1841. Auf Hawaii stehen gleich mehrere Vulkane in unmittelbare Nähe der Meeresküste. Hinzu kommt, dass die typischerweise dort sehr dünnflüssige Lava Lavatunnel bildet, durch deren erstarrte Kruste sie wie durch Leitungen hangabwärts fließt. Mündet ein solcher Lavatunnel ins Meer oder bricht er bei einem Ausbruch ein, sorgt der Kontakt der glühend heißen Gesteinsschmelze mit dem Wasser ebenfalls für phreatische Explosionen. Bei Lava-Temperaturen von mehr als 1110 °C verwandelt sich das Meerwasser sofort in Dampf und schießt dabei als Fontäne meterhoch in die Höhe.

---

## **Schildvulkane: steter Glutstrom auf Hawaii**

Auf Hawaii finden sich auch die bekanntesten Beispiele für Schild- oder Deckenvulkane. Sie ragen nicht sehr hoch auf, bedecken dafür aber riesige Flächen. Betrachtet man sie aus der Vogelperspektive, erinnern sie daher eher an leicht plattgedrückte Spiegeleier. 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 5000 Meter unter der Meeresoberfläche und reicht 4170 Meter über das Meer hinaus – damit ist er insgesamt höher als der Mount Everest und eigentlich der höchste Berg der Erde. Auch der größte Vulkan des Sonnensystems, der Olympus



Typisch für Hawaii ist die dünnflüssige Lava, hier am am Pu‘u ‘O‘o (© HVO)

Mons auf dem Mars, ist ein solcher Schildvulkan. Er ragt 24 Kilometer über die ihn umgebende Ebene auf und hat einen Umfang von 500 Kilometern.

Typisch für Schildvulkane sind effusive Eruptionen: Weil die Lava eher dünnflüssig und heiß ist, verstopfen die Schlote dieser Feuerberge nur selten. Daher staut sich im Inneren kein hoher Druck auf, es kommt selten zu einem explosiven Ausbruch. Stattdessen folgen schwächere Eruptionen in relativ kurzem Abstand hintereinander. Der Mauna Loa auf Hawaii erlebte beispielsweise seit 1843 bereits 33 Ausbrüche, in denen er gut 800 Quadratkilometer Land mit Lava überdeckte. Seit 1984 pausiert der Feuerberg, Vulkanologen rechnen aber schon bald mit der nächsten Eruptionsphase. Hawaiianische Eruptionen erzeugen nur wenig Asche, sie werden von Lavafontänen und -strömen dominiert.

Typisch für Hawaii ist die Pahoehoe-Lava, deren glatte feste Kruste kissen- oder schollenförmige Formen ausbildet. Unter dieser Kruste strömt oft noch nicht erstarrte, glutflüssige Lava weiter, wie manchmal bei eingebrochenen Decken solcher Lavakrusten oder -tunnel zu sehen

ist. Fließt ein Strom von Pahoe-Lava über länger Zeit bis ins Meer, bildet sich nach anfänglichen phreatischen Explosionen allmählich ein Lavadelta: eine Zunge aus scheinbar festem, neuem Land. Wächst ein solches Lavadelta bis zum steiler abfallenden unterseeischen Hang der Küste vor, verlieren sie oft den Halt: das gesamte Delta kann dann einbrechen und eine erneute Explosion von Lava und Wasserdampf auslösen. So sind die seit 1986 im Südosten des Kilauea entstandenen Lavadeltas seither bereits mehrfach kollabiert.

Nicht immer quillt die Lava eines Vulkans aus einem klassischen runden Krater oder Schlot, oft dringt sie auch durch längliche Spalten und Risse aus dem Untergrund. Dieser Spaltenvulkanismus ist oft an den Hängen von Schildvulkanen wie auf Hawaii oder bei den Gletschervulkanen Islands zu beobachten, kann aber auch unabhängig von einem Feuerberg im Inneren einer tektonischen Platte geschehen. Ein Beispiel ist die Dekkan-Trapps-Region in Westindien. Hier erstreckt sich noch heute eine teilweise bis zu 150 Meter mächtige Lavaschicht über Zehntausende von Quadratkilometern. Die basaltreiche Lava bildet dabei treppenartige, manchmal auch säulenförmige Strukturen. Ursprünglich erreichte die Lavadecke sogar eine Dicke von 2,4 Kilometern und bedeckte den halben indischen Subkontinent.

---

## **Klimafolgen: Wenn der vulkanische Winter kommt**

Wenn ein Vulkan ausbricht, hat dies oft nicht nur lokale Folgen. Ist die Eruption stark genug, schleudert sie Staub und Aschenteilchen bis in die Stratosphäre, die obere Atmosphärenschiicht. Hier verbindet sich Schwefeldioxid aus der Eruptionswolke mit winzigen Tröpfchen aus der Luft zu Schwebstoffen, Aerosolen. Diese spielen, so klein sie auch sind, eine entscheidende Rolle für das irdische Klima. Wie gravierend sich dies noch am anderen Ende der Erde auswirken kann, zeigte unter anderem der Ausbruch des indonesischen Vulkans Tambora im Jahr 1815. Die Eruption verwandelte den Gipfel des Stratovulkans in eine Feuerhölle und schleuderte 160 Kubikkilometer Bimsstein, Lavafetzen und Asche aus dem Schlot hinaus. Noch bis in 1800 Kilometer Entfernung war das Donnern des Ausbruchs zu hören. Etwa 12.000 Menschen kamen damals sofort durch den heißen Stein- und Aschenregen ums Leben, weitere

54.000 starben auf den Inseln Sumbava und Lombok an den Spätfolgen der Eruption.

Noch weitreichender aber waren Schwebstoffe und Aschenpartikel: Sie stiegen bis in die Stratosphäre, die obere Atmosphärenschicht, auf und breiteten sich weltweit aus. Dort bildeten sie einen Filter, der einen Teil des einfallenden Sonnenlichts schluckte. Dadurch sanken die Temperaturen vor allem auf der Nordhalbkugel – mit verheerenden Folgen: In Mitteleuropa und den USA führten anhaltende Regenfälle, kaltes Wetter und Unwetter zu katastrophalen Missernten. Dies machte Getreide für viele Menschen unerschwinglich, Hungersnöte, Aufstände und Auswanderungen waren die Folge. In Neuengland und Kanada fiel sogar mitten im Hochsommer Schnee. Das Jahr 1816 ging als „das Jahr ohne Sommer“ in die Geschichte ein. Diesen Abkühlungseffekt einer Eruption bezeichnet man auch als vulkanischen Winter. Im Falle des Tambora kam noch etwas erschwerend hinzu: Der Tambora war schon der zweite große Ausbruch innerhalb von sechs Jahren. Denn bereits 1809 ereignete sich eine wahrscheinlich etwa halb so starke Eruption, die ebenfalls das Klima beeinflusste. Das zeigt das Muster von Schwefelsäure-Einschlüssen in Eisbohrkernen aus dieser Zeit. Wo genau der Vulkan lag, ist zwar noch unbekannt, zusammen mit der Eruption des Tambora machte er aber das Jahrzehnt von 1810 bis 1819 zum wahrscheinlich kältesten der letzten 500 Jahre.

Buchstäblich weithin sichtbar war ein weiterer Effekt des Aerosolschleiers nach dem Tambora-Ausbruch: Die Schwebstoffe und Aschen sorgten für besonders farbige, prächtig rote Sonnenuntergänge und -aufgänge. Einer der Künstler, der diese Farbenpracht in seinen Gemälden für die Nachwelt festhielt, war der englische Maler William Turner. Seine Sonnenuntergangs-Bilder gelten als eindrucksvolles Beispiel dafür, dass Kunst indirekt Informationen über vergangene Veränderungen in Klima und Atmosphäre vermitteln kann. Bestätigt wurde dies Anfang 2014 durch eine Studie, in der Forscher hunderte von Digitalfotos von Sonnenuntergangs-Gemälden aus der Zeit von 1500 bis 2000 auswerteten. Wie sich zeigte, spiegelten die Gemälde verblüffend genau die Aerosolfracht der Atmosphäre zu ihrer Entstehungszeit wider – und dies unabhängig vom Maler und der Stilrichtung.

Entscheidend dafür, wie stark der Klimaeffekt einer Eruption ausfällt, sind mehrere Faktoren. So muss die Eruptionswolke über die wet-



teraktive Schicht der Atmosphäre hinaus bis in die Stratosphäre reichen. Dort haben die Schwebstoffe dann genau die Partikelgröße, die das Sonnenlicht schluckt. Der wirksamste Bestandteil der Eruptionswolke sind dabei vulkanische Schwefelgase und die aus ihnen entstehenden Aerosole. Diese können einen fast milchig-trüben Schleier ausbilden, der sich mehrere Jahre hält und das Sonnenlicht reflektiert. Asche und andere größere Partikel dagegen sinken schneller in tiefere Atmosphärenschichten ab und werden meist schon innerhalb weniger Wochen von Regen und Schnee ausgewaschen.

Eine wichtige Rolle spielt aber auch die geografische Lage des Vulkans: Ereignet sich eine Eruption in den Tropen, dann kann die Zirkulation der Atmosphäre seine Eruptionswolke über beide Hemisphären verteilen. Eruptionen in mittleren bis hohen Breiten beeinflussen dagegen vornehmlich ihre eigene Hemisphäre. So sorgte der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 für eine globale Abkühlung um rund 0,4 °C. Die Eruption des Laacher See-Vulkans in der Eifel vor rund 13.000 Jahren war zwar eineinhalb Mal so stark, wirkte sich aber nur auf der Nordhalbkugel aus. Hinzu kommt: Auch lokale und regionale Klimaphänomene, wie der Monsun oder der El Niño, beeinflussen die Klimawirkung einer Eruption. Komplexe Wechselwirkungen sorgen dafür, dass sich dann auch die Niederschlagsmuster grundlegend verschieben können, wie Klimaforscher im Jahr 2010 herausfanden. Ihre Studie zeigte, dass der Monsun in Asien in den letzten 800 Jahren auf große Vulkanausbrüche reagierte: Meist ertrank danach Südostasien in ungewöhnlich starken Regenfällen, während China unter extremer Dürre litt.

---

## **Frühwarnung: Detektivarbeit am Feuerberg**

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.

Der Mensch hat 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 meist ein Netz von Seismographen. Die hochempfindlichen Messinstrumente registrieren noch die leichtesten Bodenerschütterungen, die durch die Bewegungen des Magmas im Untergrund entstehen. Im Allgemeinen nimmt die Häufigkeit solcher Erdstöße in den letzten Tagen vor der Eruption zu und die Zentren der Beben wandern an die Stelle, an der der Ausbruch zu erwarten ist. Dazu kommen Informationen über die Deformation der Erdoberfläche durch hochpräzise GPS-Empfänger und satellitengestützte Interferometern. Diese Geräte messen Veränderungen in der Laufzeit von Mikrowellen zwischen Satellit und Boden und können dadurch Bodenverformungen von wenigen Millimetern feststellen. Vor einem Ausbruch heben sich die Vulkane zudem meist ein wenig und schwellen an, um nach dem Ausbruch wieder zusammenzusinken.

Daten über Änderungen der lokalen Schwerkraft werden von Präzisionsgravimetern erfasst, während die chemische Analyse von Gesteinsproben, die am Vulkan gesammelt wurden, Aufschluss über die Abläufe vergangener Eruptionen gibt. Und noch ein Phänomen liefert Indizien für einen bevorstehenden Ausbruch: Gase. Ihr chemischer Fingerabdruck ändert sich schon geraume Zeit vor den Eruptionen. Regelmäßige Messungen und Gasanalysen können daher eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage von Vulkanausbrüchen spielen. Eine neuere Methode sind Gasmessungen mit Hilfe der differentiellen optischen Absorptions-Spektroskopie (DOAS), wie sie von Forschern zurzeit am Vulkan Popocatepétl in Mexico genutzt wird. Ein automatisches Teleskop ist dabei auf die Rauchfahne des Vulkans gerichtet und misst die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts, das durch diese Gase strömt. Weil jedes Gas charakteristische Teile der Wellenlängen absorbiert oder streut, können die Forscher so auf die Zusammensetzung der ausgestoßenen Gase schließen. Die gemessenen Daten werden in Echt-



Eine Vulkanologin des US Geological Survey entnimmt eine Gasprobe an Hang des Akutan Vulkans in Alaska (© USGS/Jennifer Lewicki)

zeit per Funk übertragen. Das Praktische daran: Mit der DOAS-Methode kann man vulkanische Gasmessungen aus sicherer Entfernung durchführen, typischerweise einige Kilometer vom aktiven Krater entfernt. Inzwischen sind diese Geräte schon an 25 Vulkanen weltweit installiert.

---

## Wenn nur die Flucht bleibt

Die besten Frühwarnsysteme und Vorhersagen sind jedoch nicht viel wert, wenn bei einem Alarm nicht gehandelt wird. Es ist keine Seltenheit, dass Vulkanologen Alarm schlagen, aber die verantwortlichen Behörden diese Warnungen nicht ernst nehmen und ignorieren. Dies geschah unter anderem im Jahr 1985 am Nevado del Ruiz in Kolumbien. Schon Monate vorher hatten Geologen eine Zunahme von seismischen Erschütterungen

rund um den Feuerberg gemessen. Auch der Gas- und Schwefelaustritt aus dem Schlot und Öffnungen in den Vulkanflanken verstärkte sich. Am 22. Oktober 1985 gab ein Team italienischer Vulkanologen den Behörden einen Bericht, in dem sie vor einem drohenden Ausbruch und der Gefahr von dadurch ausgelösten Schlammlawinen warnten. Sie schlugen Abwehrmaßnahme und Evakuierungen der am stärksten gefährdeten Gebiete vor, darunter auch der Stadt Armero. Risikokarten zeigten, dass diese in einer Flusssenke liegende Stadt bei einer Eruption vollkommen von Schlamm und Wasser überflutet werden würde.

Doch die Behörden reagierten nicht. Weil die Wissenschaftler den genauen Zeitpunkt der Eruption nicht vorhersagen konnten, wollten sie nicht riskieren, teure Maßnahmen zu ergreifen, solange in ihren Augen die Gefahr nicht absehbar war. Immerhin galt der seit 140 Jahren ruhende Nevado del Ruiz schon seit langem als „schlafender Tiger“. Die Behörden hielten die Warnungen der Forscher für Panikmache und ignorierten sie. Die Folge: Als der Nevado del Ruiz am 13. November 1985 ausbrach, starben mehr als 22.000 Menschen in den Aschen- und Schlammströmen. Dort, wo zuvor die Stadt Armero stand, hatten pyroklastische Ströme und Lahare nur noch eine von Schlamm und Trümmern bedeckte Mondlandschaft hinterlassen. Die Eruption von Armero gilt bis heute als eine der schlimmsten Vulkan-Katastrophen des 20. Jahrhunderts – und als mahnendes Beispiel für ignorierte Frühwarnungen.

Ein positives Beispiel findet sich dagegen 20 Jahre später am Santa Ana-Vulkan in El Salvador. Der mit 2381 Meter höchste Feuerberg des Landes ist aktiv und wird daher ständig überwacht. Im August 2005 ergänzte ein Forscherteam dort das Frühwarnsystem mit Anlagen zur Gasmessung mittels Spektroskopie. Kurz darauf stieg der Gasausstoß des Vulkans plötzlich um das Zehnfache an – ein Alarmsignal. Als sich dann auch schwache Beben häuften war für die Vulkanologen klar: Das Magma im Untergrund veränderte sich und der Druck durch freiwerdende Schwefelgase stieg bedrohlich an. Der örtliche Katastrophenschutz warnte aufgrund dieser Messungen vor einem erhöhten Ausbruchsrisko, wenig später wurde die Bevölkerung nahe gelegener Dörfern evakuiert, nachdem massive, dunkle, schwefelhaltige Rauchwolken über dem Krater zu sehen waren. Und tatsächlich: Bereits am nächsten Tag begann ein mehrere Wochen andauernder Ausbruch des Feuerbergs. Doch aufgrund der rechtzeitigen Evakuierung konnten Tausende rechtzeitig in Sicherheit gebracht werden. Nur zwei Menschen starben.

---

# Eifelvulkane – heißes Magma unter Maar & Co

6

Dieter Lohmann

Ein explodierender Vulkan, glühende Lavaströme, Menschen in Panik – nein, die Rede ist hier nicht von Pompeji oder dem Krakatau in Indonesien. Sondern von einer katastrophale Eruption vor unserer Haustür – in der Eifel. Denn die sanfthügelige Idylle trägt – hier brach einst tödliches Feuer aus der Erde. Als vor 12.900 Jahren der Laacher See-Vulkan explodierte, stellte der Ausbruch selbst den des Vesuv im Jahr 79 nach Christus weit in den Schatten. Sogar im Süden Schwedens und in Norditalien rieselte damals noch Eifeler Asche vom Himmel. Wie aber kam es zu dieser Katastrophe? Und wie gefährlich sind die Eifelvulkane heute noch?

---

## Apokalypse am Laacher See – der Ausbruch

Tatort: Die Laacher See-Region in der Eifel. Ziemlich kühl, aber wenigstens einigermaßen trocken ist es dort vor 12.900 Jahren. Die Eiszeit geht langsam aber sicher zu Ende und die Natur erwacht immer stärker aus ihrem Jahrtausende dauernden Kälteschlaf. Längst gibt es wieder viele verschiedene Pflanzenarten, darunter auch Bäume wie Kiefern oder Pappeln. Auf Menschen trifft man nur hin und wieder – etwa wenn sie in kleinen Trupps auf Jagd gehen und ihre Beute hierhin verfolgen. Früher gab es in diesem Gebiet häufiger Vulkanausbrüche. Darauf deutet zumindest ein kleiner Krater hin, der deutlich sichtbar aus der Landschaft heraussticht. Doch im Moment ist alles ruhig – noch. Denn in fünf bis sechs Kilometer Tiefe unter der Erdoberfläche braut sich bereits etwas

zusammen. Dort haben sich riesige Mengen an glühend heißem Magma angesammelt, die an die Erdoberfläche drängen.

Was dann folgt, ist ein ebenso beeindruckendes wie landschaftsveränderndes Drama in mehreren Akten. Alles beginnt, als das geschmolzene Gestein im Untergrund mit Grundwasser in Kontakt gerät, das aufgrund der hohen Temperaturen sofort verdampft. Die Folge des Überdrucks: gewaltige Detonationen und eine Wolke aus Wasserdampf und vulkanischem Material, die durch das gesamte Neuwieder Becken rast und eine erste Spur der Verwüstung hinterlässt. Doch der nächste Akt wartet bereits. Denn nachdem sich der neue Vulkan erst mal „Luft“ verschafft hat, nimmt der Ausbruch richtig Fahrt auf. Das Magma im Vulkanschlot wird durch sich ausdehnende vulkanische Gase zerrissen und anschließend durch einen mit 200 bis 400 Meter pro Sekunde herausschießenden Strahl aus Bims, Asche und Gasen in kleine Stücke zerrieben.

Wie Sekt aus dem Hals einer heftig geschüttelten Flasche „spritzt“ das vulkanische Material aus dem Krater. Unaufhaltsam bahnen sich die Eruptionswolken ihren Weg nach oben und landen schließlich sogar in der Stratosphäre – 30 Kilometer über der Erdoberfläche. Mit dem Wind werden die Ascheteilchen weit verfrachtet und regnen noch im Süden Schwedens und in Norditalien vom Himmel. Doch in der Eifel und ihrer unmittelbaren Umgebung sind die Auswirkungen noch viel schlimmer. Die Eruptionswolken machen den Tag zur Nacht, meterdicke Ascheschichten decken Bäume, Sträucher, Hügel und Taler zu und ersticken alles Leben. Insgesamt 16 Kubikkilometer an Lockermaterial – sogenanntes Tephra – stößt der Vulkan im Laufe der nächsten zwei bis drei Tage aus. Dabei handelt es sich um einen bunten Mix aus Asche, Bims und zum Teil mehrere Meter großen „Bomben“.

Die wenigen Menschen, die aus weiterer Entfernung das Schauspiel beobachten, bekommen einen gehörigen Schrecken – und fürchten um ihr Leben. Denn es beginnt die Zeit der Glutlawinen oder pyroklastischen Ströme. Solche 500 bis 600 °C heißen, aus vulkanischen Gasen, Aschen und Gesteinsbruchstücken bestehenden Gebilde schießen immer wieder die Vulkanhänge herab und breiten sich in rasend schnellem Tempo in die umliegenden Regionen wie das Tönissteiner Tal oder das Brohltal aus. Manche von ihnen erreichen sogar den über zehn Kilometer entfernt liegenden Rhein. Während die Glutlawinen in Vulkannähe die Landschaft verbrennen, erodieren und radikal verändern, lagern sie am Ende ihres



Die Reaktion von Magma mit Wasser verursacht eine phreatomagmatische Eruption, die Dampf, Gase und Asche weit in die Atmosphäre schleudert (© USGS)

Weges den mitgeführten Ballast ab. Dabei füllen sie Senken oder Täler auf. Dieses Szenario aus Eruptionswolken und Glutlawinen wiederholt sich in der Folge gleich mehrfach. Kein Wunder, dass im Brohltal die Ablagerungen am Ende sogar bis zu 60 Meter dick sind.

Aber damit nicht genug: Während des Ausbruchs des Laacher See-Vulkans kommt es auch zu massiven Absenkungen der Erdkruste, durch die vielerorts Gräben aufbrechen. Regelmäßig lassen zudem Erdbeben den Boden erzittern. Und irgendwann schließlich ist die riesige Magma-kammer zum größten Teil entleert und bricht ein. Der letzte Akt beim Ausbruch des Laacher See-Vulkans steht dann wieder ganz im Zeichen von Feuer und Wasser. Immer wieder kommt es durch den direkten Kontakt beider Elemente zu starken so genannten phreatomagmatischen Eruptionen. Das Wasser verdampft dabei explosionsartig und schleudert Aschen und Vulkanmaterial weit hinaus in die Umgebung. Bis schließlich auch die letzten „Hustenanfälle“ des Feuerbergs aufhören, dauert es aber noch Wochen oder Monate. Als schließlich doch alles vorbei ist, ist

die Landschaft rund um den Vulkan nicht mehr wiederzuerkennen. Wo früher Wälder und Sträucher standen und friedlich Tiere grasten, existiert nur noch eine Mondlandschaft. Asche, Bims und erkaltete Lavafetzen soweit das Auge reicht.

---

## Ein Tsunami am Rhein?

Die lang anhaltenden gewaltigen Eruptionen am Laacher See-Vulkan waren – so weiß man heute – aber nur ein Teil dessen, was vor 12.900 Jahren wirklich geschah. Was kaum jemand ahnt: Der Ausbruch veränderte nicht nur die Landschaften in der unmittelbaren Umgebung des Vulkans, er verstopfte mit seiner Asche, dem Bims und anderen vulkanischen Ablagerungen auch den nahe gelegenen Rhein im Neuwieder Becken. Aus der Luft regneten damals gewaltige Mengen an Staub- und Gesteinspartikeln in den Fluss und auf die Rheinauen. Nebenflüsse wie die Mosel spülten ebenfalls ihre vulkanischen Sedimente in den Strom. Sie trugen so dazu bei, dass der Rhein im Laufe der Eruption wiederholt von Dämmen aus Tephra aufgestaut wurde. Solche natürlichen Sperrwerke entstanden vor allem in der Nähe von Koblenz. Die Folge: ein riesiger See im oberen Mittelrheintal. Immer wieder jedoch brachen die locker geschichteten Dämme durch den Druck der Wassermengen zusammen und der Fluss bahnte sich seinen Weg wieder Richtung Meer.

Richtig gefährlich wurde es schließlich, als glühend heiße pyroklastische Ströme nahe Brohl den bereits durch zahlreiche Hindernisse verbauten Rhein erreichten und unter gewaltigen Explosionen ins Wasser strömten. Das dabei auf einmal und in großen Mengen eingetragene vulkanische Material gab dem Fluss den Rest. Schon bald hatte sich ein relativ stabiler Staudamm gebildet, der den Rhein – noch vor dem Ende der Eruption am Laacher See-Vulkan – komplett abriegelte. Mit der Zeit stieg der Wasserspiegel hinter dem natürlichen Hindernis enorm an. Simulationen von Wissenschaftlern haben ergeben, dass der ständig wachsende See am Ende eine Tiefe von 27 Metern hatte und 140 Kilometer stromaufwärts reichte. Er bedeckte dabei eine Fläche von 125 Quadratkilometern – mindestens.

Doch auch der neuerliche Damm und der sogenannte Hauptsee waren nicht von Dauer. Schon bald zeigten sich erste Risse in dem Naturbau-



werk und schließlich war der Druck des Wassers auch hier zu groß. Was dann geschah, fasst der Vulkanologe Hans-Ulrich Schmincke so zusammen: „Der Dammbruch bei Brohl löste gewaltige Flutwellen aus, die mit hoher Geschwindigkeit rheinabwärts rasten. Bei der Goldenen Meile sechs Kilometer flussabwärts vom Damm war die Flutwelle etwa zehn bis zwölf Meter hoch.“ Und noch eines ist heute klar: Dieser „Tsunami am Rhein“ rauschte zu Tal bevor der Laacher See-Vulkan seine Tätigkeit einstellte. Dies enthüllten Ablagerungen aus der Zeit, auf die der Wissenschaftler bei Kaltenengers nahe des Rheins gestoßen war.

Die Folgen waren verheerend. Zwar lebten in der Region damals nur zeitweilig Menschen, die Natur aber bekam die Wucht des Wassers hautnah zu spüren. Tiere, die sich in der Kürze der Zeit nicht rechtzeitig in Sicherheit bringen konnten, Bäume, Sträucher: Alles, was sich der Flut in den Weg stellte, wurde mitgerissen und verschwand auf Nimmerwiedersehen in den Fluten – oder wurde unter einer dicken Sedimentschicht begraben. Das Rheintal war am Ende über weite Strecken völlig zerstört. Dass es vor rund 12.900 Jahren tatsächlich eine Art Tsunami im Rhein gab, ist mittlerweile klar und auch wissenschaftlich abgesichert. So haben Forscher um Schmincke an vielen Orten eindeutige Indizien dafür gefunden, dass die Flut-Theorie stimmt. Zur Lösung des geologischen Puzzlespiels entscheidend beigetragen haben besondere Regionen der Erdoberfläche, an denen der Untergrund unverhüllt zu Tage tritt und deshalb von Forscher relativ problemlos untersucht werden kann – so genannte Aufschlüsse. Fündig wurden Schmincke und seine Kollegin Cornelia Park beispielsweise in einer Kiesgrube nördlich von Bad Breisig: „Wild geschichtete und daher umgelagerte Laacher See-Tephra mit Rheinsanden vermischt, untrügliche Anzeichen für gewaltige Flutwellen, weit oberhalb des Rheinbetts“, erzählt der Forscher. Doch nicht nur in der unmittelbaren Umgebung des Feuerbergs gab es derartige Belege, sondern auch viel weiter flussabwärts bis nach Bonn. Die Wissenschaftler gehen sogar davon aus, dass solche Schichten auch noch bis in die Niederlande nachweisbar sein könnten. Dafür fehlen bis jetzt allerdings schlüssige Beweise.

## **Regengüsse und Schlammlawinen – die Klimafolgen der Eruption**

Doch nicht nur der Landschaft und dem Rheintal setzte der Ausbruch des Laacher See-Vulkans mächtig zu, auch das Klima veränderte sich während und nach dem Ausbruch nachhaltig. So verdunkelte die Kilometer hoch in die Atmosphäre geschleuderte Asche periodisch immer wieder den Himmel. Viel schlimmer jedoch waren die langfristigen Auswirkungen der Eruptionen auf Wetter und Klima. Schuld daran waren nicht etwa die Ascheteilchen, sondern Schwefelsäurepartikel. Sie entstehen immer dann, wenn Schwefelgase und Schwefeldioxid bei einem Vulkanausbruch in die Atmosphäre gelangen und dort mit winzigen Wassertropfchen reagieren. Die dabei entstehenden Schwefel-Aerosole können monate- oder sogar jahrelang in der Atmosphäre bleiben.

Wenn sie bis in die obersten Atmosphärenschichten, die Stratosphäre gelangen, funktionieren die winzigen Partikel wie ein Filter: Sie schlucken Licht und Wärmestrahlung und behindern dadurch den Energiefluss von der Sonne auf die Erde. In den niedrigeren Atmosphärenschichten wirken die Aerosole zudem als Kondensationskeime für die Wolkenbildung: An ihnen schlägt sich der Wasserdampf der Luft nieder, bildet Tröpfchen und schließlich Wolken. Auch sie können abkühlend auf das irdische Klima wirken. Folge: Es wird kälter – und oft auch feuchter. So wie im Jahr 1816, als ein Ausbruch des Vulkans Tambora in Indonesien für ein „Jahr ohne Sommer“ auf der Nordhalbkugel sorgte – Missernten und Hungersnöte inklusive. Allein in Indonesien starben dabei damals zehntausende von Menschen. Ein ähnliches Szenario, so vermuten Wissenschaftler, spielte sich auch nach dem Ausbruch des Laacher See-Vulkans ab. Denn auch dort gelangte viel Schwefel mit den Eruptionssäulen in die Stratosphäre.

In der gesamten Region brach damals wahrscheinlich eine ziemlich kühle, niederschlagsreiche Zeit an. „Wir gehen heute davon aus, dass über Monate bis Jahre große Niederschlagsmengen anfielen und dass diese Starkregen die gewaltigen Erosionsrinnen und Umlagerungen nicht nur im gesamten Neuwieder Becken auslösten.“ Die Niederschläge verbanden sich mit den Aschedecken und anderem Auswurfmaterial zu einem gefährlichen Mix. In Form von Schlamm- und Gerölllawinen – For-

scher sprechen von Laharen – raste dieser die Vulkanflanken und Täler hinunter und landete zum Teil sogar in den Rheinauen. Doch diese Phänomene waren offenbar nicht auf die Eifelregion beschränkt: „In ganz Mitteleuropa findet man in Seesedimenten oberhalb der Laacher See-Te-phralagen über viele Jahre unruhige Sedimentation im Einzugsbereich, vermutlich eine Folge der verheerenden Regenfälle, die durch den Klimaimpakt der Eruption auf der nördlichen Hemisphäre ausgelöst wurde“, so Schminckes Fazit.

---

## **Trockene und nasse „Rülpser“ – das Funktionsprinzip der Eifelvulkane**

Gewaltige Explosionen ereignen sich bei den Vulkanen der Eifel und anderswo 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 darüber liegende Gestein wegsprengt. Vulkanologen sprechen in so einem Fall von einer phreatomagmatischen Eruption. Übrig bleibt dann am Ende oft nur ein Maar, ein Explosionskrater umgeben von einem mehr oder minder großen Trümmerwall. Zahlreiche der heute oft mit Wasser gefüllten „Augen der Eifel“ sind bis vor 11.000 Jahren auf diese Weise entstanden.

Ist das Magma eines Vulkans dagegen so zähflüssig, dass es beim Aufstieg im Schlot nicht ohne weiteres die Erdoberfläche erreicht, kommt es zu gewaltigen Gasblasen im Untergrund, die mit steigendem Druck schließlich die Gesteinsdecke sprengen und plötzliche Ausbrüche auslösen. Dabei entsteht kaum Wasserdampf, dafür aber werden große Mengen an vulkanischem Lockermaterial wie Bimsstein, Asche und Lavafetzen teilweise Kilometer hoch in die Atmosphäre geschleudert. Wieder heruntergefallen, lagern sie sich in dicken Schichten auf den Vulkanhängen und in der Umgebung ab. Auf dieses Prinzip gehen viele der zahlreichen Schlackenkegel in der Eifelregion zurück. Es gibt aber auch Mischformen, bei denen es etwa zu einer phreatomagmatischen Initialzündung und anschließend dann zu trockenen, sogenannten pyroklastischen Eruptionen kommt – oder umgekehrt.

Längst kein Geheimnis mehr ist für Geowissenschaftler auch, was genau damals im Gebiet des heutigen Laacher Sees passierte. Das Prin-

zip erklärt der Schmincke so: „Die Eruption des Laacher See-Vulkans vor 12.900 Jahren, die gewaltigste Vulkanexplosion in Mitteleuropa in geologisch junger Zeit, ist ein klassisches Beispiel für eine komplexe, sogenannte plinianische Eruption, deren Mechanismus im Verlauf der Hauptphase des Ausbruchs mehrfach wechselte.“ Schmincke spielt damit vor allem auf den schnellen Wechsel zwischen kilometerhohen Eruptionssäulen und rasanten Glutlawinen in Bodennähe in der Hauptphase des Ausbruchs an. Plinianisch wird dieser Mechanismus genannt, weil die erste Beschreibung von Plinius den Jüngeren stammt. Kurz nach dem berühmten Ausbruch des Vesuvs im Jahr 79 n. Chr. informierte dieser den römischen Geschichtsschreiber Cornelius Tacitus in mehreren Briefen über den genauen Ablauf der Katastrophe. Und diese Chronologie der Ereignisse entspricht laut Schmincke erstaunlich genau der des Laacher See-Vulkans. Und auch die Ähnlichkeit der Ablagerungen ist nach Angaben des Wissenschaftlers verblüffend.

---

## **Idylle mit feuriger Vergangenheit**

Wer heute in die Eifel kommt, käme auf den ersten Blick wohl kaum auf die Idee, dass dort noch vor knapp 13.000 Jahren ein vernichtender Vulkanausbruch stattgefunden hat. Zwar sind hier im Dreiländereck Deutschland, Luxemburg und Belgien Maare, Kohlensäurequellen, Geyshire, alte Vulkanschlote und -kegel an der Tagesordnung, aber ansonsten hat die Natur längst das einst völlig zerstörte Gebiet wieder in Besitz genommen. Erosion und Verwitterung taten ein Übriges dazu, dass die meisten Spuren der Eruption des Laacher See-Vulkans unter sattem Grün verschwunden sind. Das überrascht umso mehr, weil die Eruption des Laacher See-Vulkans dort keineswegs die erste und auch nicht die letzte in der feurigen Eifel-Vergangenheit war. Erst vor rund 11.000 Jahren, als das Ulmener Maar, ein mehr als 80 Meter tiefer Krater, entstand, war dieses Kapitel abgeschlossen – zumindest vorläufig.

Der Höhepunkt des Eifelvulkanismus liegt allerdings viel weiter zurück in der Vergangenheit. Ungefähr vor 50 bis 35 Millionen Jahren, im Paläogen, brodelte die Erde erstmals an vielen Stellen, wo heute saftige Wiesen und üppige Wälder zu finden sind. Eine weitere hochaktive vulkanische Episode begann dann vor rund 700.000 Jahren. In der Osteifel,



Blick über dem Laacher See in der Eifel: Von seiner explosiven Vergangenheit ist an diesem Maar auf den ersten Blick nichts zu erkennen (© Holger Weinandt/CC-by-sa 3.0)

zu der auch der Laacher See-Vulkan gehört, setzte der Vulkanismus erst vor etwa 500.000 Jahren ein. Das Ergebnis des Millionen Jahre dauernden geologischen Schaffensprozesses ist erstaunlich. Denn nur an wenigen Stellen auf der Welt liegen so viele Vulkane auf so engem Raum beieinander wie in der Eifel. Auf mehr als 2000 Quadratkilometern gibt es zwischen Rhein und belgischer Grenze rund 240 Schlackenkegel, Vulkane und 70 Maare. Diese Zeugen der feurigen Vergangenheit ragen bis zu mehreren hundert Metern über das örtliche Relief hinaus. Wenn man sie denn erkennt. Denn auch die mit 747 Metern höchste Erhebung der Eifel, die Hohe Acht am Nürburgring, ist ein erloschener Vulkan.

Doch wie sind alle diese vulkanischen Formen entstanden? Warum gibt es in der Eifel fernab aller Plattengrenzen überhaupt eine so große Anzahl davon? Und, vielleicht noch wichtiger: Ist der Vulkanismus erloschen oder könnte es in Zukunft durchaus wieder gefährliche Eruptionen in der Eifel geben? Einer mit vielen Indizien unterfütterten Theorie zufolge befindet sich unter der Eifel einer der berühmten Hot Spots oder heißen Flecken. Dabei handelt es sich um Quellgebiete für glutflüssiges Magma, die ihren Ursprung tief im Erdmantel haben. Wie gigantische Schneidbrenner fördern diese so genannten Plumes unaufhörlich Magma nach oben, das sich dann seinen Weg durch Risse in der Erdkruste an die Oberfläche bahnt.

Wissenschaftler haben mithilfe von seismographischen Messungen gezeigt, dass es tief unter der Eifel einen solchen Plume geben könn-

te. Diese Zone ist rund 1000 bis 1400 °C heiß – und damit rund 200 °C wärmer als das sie umgebende Material im Erdmantel. Das Magma des Eifelplumes sammelt sich in größeren Magmenkammern in etwa fünf bis zehn Kilometern Tiefe unter der Erdoberfläche. Vier dieser Gebilde – jeweils mit mehreren Kubikkilometern Volumen – gibt es allein im Laacher See-Gebiet. Von dort aus ist die Gesteinsschmelze im Laufe der Erdgeschichte immer wieder an die Erdoberfläche geschleudert worden. Eines ist klar: Sollte sich ein derart schwerer Vulkanausbruch wie etwa vor 12.900 Jahren heute noch einmal wiederholen, wären die Folgen viel dramatischer als damals. Denn dann hätten wahrscheinlich auch viele Menschen – etwa in den Ballungsgebieten an Rhein und Ruhr – darunter zu leiden ...

---

## Wie realistisch ist ein neuer Vulkanausbruch?

Nicht nur Filmemacher spielen mit der Angst der Menschen vor drohenden Vulkanausbrüchen, auch Zeitungen oder Internet schüren häufig die Sorge vor Gefahren durch Feuerberge wie in der Eifel. Alles reine Fiktion oder ist doch ein Körnchen Wahrheit dabei? Dies untersuchen Geowissenschaftler schon seit Jahren – und sie haben längst auch einige Antworten parat. Klar ist für Vulkanologen mittlerweile längst, dass der Vulkanismus in der Eifel nicht erloschen ist, wie man früher meinte, sondern nur „schläft“. Für sie steht deshalb außer Frage, dass es dort irgendwann einmal zu einem neuen Ausbruch kommen wird. Denn die Erde unter der Eifel ist geologisch betrachtet auch heute noch alles andere als ruhig. So tritt beispielsweise an zahllosen Stellen Kohlendioxid oder kohlensäurehaltiges Wasser an die Erdoberfläche – ein untrügliches Zeichen der Hitze im Untergrund. Ein gutes Beispiel dafür ist der durch CO<sub>2</sub> angetriebene Geysir bei Wallenborn. Als aufmerksamer Beobachter kann man aber auch am Ostrand des Laacher Sees immer wieder sehen, wie Kohlen- und Schwefeldioxid-Blasen aufsteigen. Wissenschaftler schließen daraus, dass sich tief im Untergrund unter dem Gewässer auch heute noch eine gut gefüllte Magmakammer befindet.

Der Vulkan-Experte Ulrich Schreiber von der Universität Essen, konstatiert vermutlich auch deshalb: „Das Risiko einer Eruption in Deutschland wird missachtet.“ Doch daraus gleich abzuleiten, dass schon bald

ein Ausbruch droht, ist ebenso falsch. „Man kann die Tatsache der CO<sub>2</sub>-Entgasung weder als Zeichen für abklingenden Vulkanismus noch für unmittelbar bevorstehende Vulkaneruptionen deuten“, sagt beispielsweise der Vulkanologe Hans-Ulrich Schmincke. Kein Argument gegen eine neuerliche Vulkanismus-Episode ist jedenfalls die angeblich so lange Zeit von 11.000 Jahren, die seit dem letzten Ausbruch vergangen ist. Denn geologisch gesehen ist das nur ein Klacks. Vulkanforscher kennen heute zahlreiche Vulkane, die viel längere Schlummerphasen eingelegt haben, nur um dann umso heftiger wieder in Aktion zu treten. Warum sollte es in der Eifel anders sein?

Schmincke kommt nach mittlerweile fast 40 Jahren eigener Forschung in der Eifel zu folgendem Fazit: „Es ist zusammengekommen nicht nur nicht ausgeschlossen, sondern sogar wahrscheinlich, dass die Eifel auch in Zukunft Schauplatz vulkanischer Ereignisse sein wird“, konstatiert der Vulkanologe. Wie bald, könne aber niemand vorhersagen. Es kann nur wenige Jahre dauern, aber auch Jahrzehnte, Jahrhunderte oder Jahrtausende. Es gibt also keinen Grund, sich zu sehr in Sicherheit zu wiegen – aber auch keinen Grund zu unnötiger Hysterie. Denn derzeit gibt es keinerlei konkrete Hinweise auf unmittelbar bevorstehende Eruptionen in der Eifel.

---

# Supervulkane – Gefahr im Untergrund 7

Roman Jowanowitsch und Nadja Podbregar

Drei Millionen Menschen besuchen den Yellowstone Nationalpark jährlich. Mit seinen zahlreichen Geysiren, heißen Quellen und brodelnden Schlammlöchern inmitten einer idyllischen Landschaft ist er eine der Haupt-Touristenattraktionen der USA. Nur die wenigsten Besucher wissen jedoch, auf was für einer gigantischen flüssigen Zeitbombe sie stehen. Denn tief unter der Erdoberfläche liegt eines der zerstörerischsten Naturphänomene der Welt – ein Supervulkan. Bricht ein solcher Vulkan aus, ist nicht nur die Region betroffen – die Folgen sind global.

---

## Trügerische Idylle in den Rocky Mountains

Er ist der älteste Nationalpark der Welt und einer der größten der USA: der Yellowstone Nationalpark. Idyllisch auf einem Hochplateau der Rocky Mountains im US-Bundesstaat Wyoming gelegen, zieht er jährlich drei Millionen Besucher an. Schon 1872 erkannte die Regierung, dass diese einzigartige Landschaft absolut schützenswert ist. Üppige Nadelwälder, viele kleine Seen und der für die Höhenlage von 2100 bis 2500 Metern erstaunlich große Yellowstone Lake bieten eine einzigartige Kulisse. Forellenreiche Bäche durchfließen Hochebenen, weite Täler und tiefe Canyons. Die größte Attraktion des Yellowstone Parks aber sind die vulkanischen Phänomene. Unzählige Geysire, heiße Quellen, Öffnungen, aus denen vulkanische Gase hervortreten und brodelnde Schlammlöcher in einer weltweit einzigartigen Konzentration machen das Gebiet zu einem besonderen Naturschauspiel.





Die zahlreichen Geysire und heißen Quellen im Yellowstone Park zeugen von seiner vulkanischen Natur (© National Park Service/Jim Peaco)

Denn so idyllisch der Park wirkt, er birgt ein dunkles Geheimnis. Unter ihm befindet sich eine riesige Magmakammer, die für die thermalen Erscheinungen verantwortlich ist. Das Naturreservat liegt auf dem Gebiet eines ehemaligen Supervulkans, der bisher in der Erdgeschichte regelmäßig ausgebrochen ist und dessen nächster Ausbruch überfällig ist. Supervulkane gehören zu den zerstörerischsten Naturphänomenen der Welt. Normalerweise werden Vulkane durch eine Magmasäule geformt, die aus dem Erdinneren aufsteigt und an der Oberfläche in Form von Eruptionen austritt. Die austretende Lava kühlt ab und erhärtet an den Seiten der Austrittsstelle. Auf diese Weise bildet sich allmählich der typische Feuerberg – meist eine kegelförmige Erhebung mit einem Krater am Gipfel. Der Vulkan wächst mit zunehmender Zahl der Eruptionen, da sich immer neues Material an den Berghängen ablagern kann.

Bei Supervulkanen ist dies jedoch anders: Sie bilden keine Feuerberge und brechen auch nicht einfach aus. Stattdessen explodieren sie und reißen dabei ein gewaltiges Loch in die Erdkruste – eine Caldera, deren Durchmesser bis zu hundert Kilometer betragen kann. Diese Erup-

tionen fördern in der Regel mindestens 450, nicht selten sogar mehrere 1000 Kubikkilometer Gesteinsmaterial und Asche an die Oberfläche und in die Atmosphäre. Asche und Gesteinsfragmente können bei den explosionsartigen Ausbrüchen bis über 30 Kilometer hoch in die Atmosphäre steigen und verheerende Auswirkungen für Klima und Leben auf der Erde haben. Eine solche Katastrophe ist allerdings selten: Sie tritt im Schnitt nur alle 100.000 Jahre auf, in historischer Zeit war keiner der bekannten Supervulkane der Erde aktiv. Daher können sich Forscher nur anhand der überlieferten Asche- und Gesteinsschichten ein vages Bild von diesen Ereignissen machen.

Bekannte Supervulkane sind die Yellowstone-Caldera in den USA, der Toba-See in Indonesien und der Taupo-See in Neuseeland. Aber auch die im Vergleich eher kleinen Phlegräischen Felder bei Neapel zählen zu den rund 20 bisher bekannten Supervulkanen der Erde. Allerdings: Eine wissenschaftlich exakte Definition für Supervulkane gibt es nicht. Normalerweise werden aber Ausbrüche ab dem Vulkanexplosivitätsindex-Wert 7 (VEI-7), teilweise auch erst ab VEI-8, als Supervulkane gewertet. Entscheidend für diesen Indexwert ist dabei vor allem die Menge an ausgestoßenem Material und die Höhe der Eruptionssäule.

---

## Überdruck im Magmakessel

Supervulkane entstehen ähnlich wie normale Vulkane – wenn Magma aus dem Erdmantel aufsteigt und sich in der Erdkruste ansammelt. Die Hitze dieser flüssigen Gesteinsmassen bringt weiteres Gestein zum Schmelzen, so dass sich unter der Erdoberfläche eine große Kammer ausbildet, die mit Magma gefüllt ist. Diese Kammer dehnt sich unter dem Einfluss der ständig nachströmenden Magmamassen immer weiter aus, wobei der Druck immer größer wird. Er wird noch zusätzlich verstärkt durch im Gesteinsbrei gefangene, stark komprimierte Gase. Die gesamte Magmakammer gleicht dadurch einem überhitzten, riesigen Dampfkochtopf. Doch dieser Überdruck allein reicht nicht aus, um die gewaltige Energie zu erklären, die bei der Explosion eines Supervulkans frei wird. Denn die Magmakammer eines Supervulkans kann mehrere Kilometer dick und bis zu hundert Kilometer breit sein. Sie ist deshalb viel zu groß, um allein durch Magma-Nachschub ausreichend Überdruck

zu erhalten. Damit das Magma das Krustengestein über der Magmakammer durchschlagen und sich einen Weg an die Oberfläche bahnen kann, braucht es einen Druck, der 100 bis 400 Mal höher ist als der Luftdruck. Lange Zeit konnte aber über den Auslöser einer Supereruption nur spekuliert werden.

Anfang 2014 dann lieferten Forscher um Wim Malfait von der ETH Zürich entscheidende Hinweise. Ihre Hypothese: Der Überdruck in der Magmakammer könnte durch Dichteunterschiede zwischen dem weniger dichten, geschmolzenen Magma und dem vergleichsweise dichteren festen Gestein in der Umgebung erzeugt werden. „Der Effekt ist vergleichbar mit dem Auftrieb eines mit Luft gefüllten Fußballs unter Wasser, der durch das schwerere umgebende Wasser nach oben gedrückt wird“, erklärt Malfait. Um zu ermitteln, ob die Dichteunterschiede tatsächlich einen derart hohen Druck erzeugen können, haben er und seine Kollegen die Bedingungen in einer solchen Magmenkammer im Labor nachgebaut: Sie analysierten künstlich hergestellte Magmaschmelzen bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen mit Hilfe von Röntgenstrahlen der European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble. Sowohl Schmelze als auch Druck und Temperatur entsprachen dabei den natürlichen Gegebenheiten eines Supervulkans. Zudem variierten die Forscher den Wassergehalt der Schmelze. Über die verschiedenen Parameter formulierten sie mathematische Gleichungen, mit denen es ihnen gelang, die Gegebenheiten in einem Supervulkan zu modellieren.

„Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer ausreichenden Größe der Magmakammer allein der durch Dichteunterschiede verursachte Überdruck genügt, um die darüber liegende Kruste zu durchbrechen und eine Eruption in Gang zu setzen“, sagt Carmen Sanchez-Valle von der ETH. Mechanismen, die herkömmliche Vulkanausbrüche begünstigten, wie etwa Sättigung des Magmas mit Wasserdampf oder tektonische Spannungen, könnten zwar auch ihren Beitrag leisten, seien aber nicht erforderlich, um eine Supereruption in Gang zu setzen. Ihre Hoffnung: Diese Erkenntnisse könnten helfen, die Gefahr durch scheinbar ruhende Supervulkane besser einzuschätzen.

## **Yellowstone: Höllenregen aus Lava und Asche**

Wenn ein Supervulkan ausbricht, sind die Folgen verheerend: Bei seinem letzten Ausbruch vor 630.000 Jahren beförderte der Vulkan unter dem Yellowstone Park 983 Kubikkilometer vulkanisches Material an die Oberfläche. Mit dieser Lavamenge könnte man die gesamten Vereinigten Staaten mit einer 13 Zentimeter dicken Schicht bedecken. Diese Eruption war tausendmal gewaltiger als der letzte Ausbruch des Mount Saint Helens im Jahr 1980. Zehntausende Menschen würden in einem Höllenregen aus Lava, glühenden Gesteinsbrocken und Asche umkommen. Lava, die von der aufgerissenen Kammer mit Temperaturen von ungefähr 800 Grad Celsius wegfießt, bedeckt in wenigen Augenblicken tausende Quadratkilometer Land und zerstört alles Leben. Die Energie, die bei dem Ausbruch eines Supervulkans frei wird, entspricht der eines großen Asteroideneinschlags.

Wenn das gesamte Material an die Oberfläche befördert wurde, leert sich die unterirdische Magmakammer und der Druck lässt nach. Durch die nun fehlende Stütze von unten wird die leere Kammer instabil, zusätzlich wird die Decke der Aushöhlung schwerer, da jetzt das zusätzliche Gewicht der ausgespuckten Lava auf ihr lastet. Schließlich kommt es zu einem kompletten Einsturz der gesamten Deckschicht, der entlang des Ringbruchs voranschreitet. Daraus resultiert ein kesselförmiges Tal von enormen Ausmaßen, das die Geologen als Caldera bezeichnen. Sucht man allerdings im Yellowstone Nationalpark nach diesem Krater, ist er nur schwer zu entdecken. Zum einen hat die Caldera mit einer Länge von 75 und einer Breite von 37 Kilometern eine so gigantische Dimension, dass ihr tatsächliches Ausmaß nur aus dem Flugzeug oder auf Satellitenaufnahmen deutlich wird. Andererseits strömte auch nach dem Einsturz des Magmakessels weiter geschmolzenes Gestein an die Erdoberfläche, so dass sich der Krater wieder zu einem kleinen Teil mit Gesteinsmassen füllte, auf denen der heutige Nationalpark liegt.

## **Vulkanischer Winter und Massensterben – die globalen Folgen**

Jährlich brechen etwa 50 gewöhnliche Vulkane weltweit aus, aber nur wenige Ausbrüche haben weltumspannende Folgen. Im Jahr 1991, als der Pinatubo auf den Philippinen ausbrach, registrierten die Klimafor-scher einen globalen Temperaturrückgang um 0,5 Grad Celsius. Weitaus gravierender waren die Konsequenzen, als 1815 der Tambora auf In-donesien explodierte. Es kam zu einer weltweiten Kältewelle, in deren Gefolge die mittlere Temperatur in Europa um 2,5 Grad Celsius ab-sank. Ein echter Supervulkan aber ist zuletzt vor 74.000 Jahren ausgebrochen – der Toba auf Sumatra. Seine Explosion hinterließ eine Caldera von 100 Kilometern Länge und 60 Kilometern Breite, die heute größtenteils vom Toba-See bedeckt wird. Damals wurden schätzungsweise 3000 Kubikkilometer vulkanisches Material hervorgeschleudert. Durch die emporgestiegene Asche hat sich das Weltklima vermutlich um fünf Grad Celsius abgekühlt – ein vulkanischer Winter war die Folge.

Ein solcher Temperatursturz würde dafür sorgen, dass in Westeuropa, wo heute dank des Golfstromes relativ milde Verhältnisse herrschen, ein Klima wie in Sibirien einkehren würde. Nach einer Theorie von Stanley Ambrose von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign und einiger anderer Wissenschaftler könnte der Ausbruch des Toba durch einen ähnlichen Klimasturz sogar die Menschheit an den Rand des Aussterbens gebracht haben. Mithilfe genetischer Analysen haben Wissen-schaftler herausgefunden, dass die Menschheit vor ungefähr 70.000 bis 80.000 Jahren tatsächlich eine drastische Verringerung ihrer Populations-dichte erlebt hat. Aus Vergleichen genetischer Mutationsraten schließen Forscher, dass damals möglicherweise nur wenige tausend Menschen überlebten. Aber war der Vulkan wirklich der Schuldige?

Anfang 2011 hat ein Forscherteam um Claudia Timmreck vom Max-Planck Institut für Meteorologie diese Frage eingehender untersucht. Die Forscher nutzten ein globales Klimamodell, um die Folgen der Toba-Eruption zu simulieren. Zum ersten Mal berücksichtigten sie dabei auch die kleinmaßstäbigen Wechselwirkungen zwischen den ausgeschleuderten Schwefelpartikeln. Dabei zeigte sich, dass die Sulfat-Aerosole in der Atmosphäre dazu neigen, zusammenzuklumpen. Die größeren Teil-

chen werden zu schwer und sinken damit allmählich aus der Atmosphäre nach unten ab. Nach Berechnungen der Forscher wäre der Höhepunkt dieses Prozesses vier Jahre nach dem Ausbruch des Toba erreicht worden. Der vulkanische Winter fiel daher vor rund 74.000 Jahren weniger drastisch aus als bisher angenommen. Demnach kann die Eruption des Toba maximal eine Reduktion der globalen Mitteltemperaturen um  $3,5^{\circ}$  Celsius bewirkt haben – und nicht eine Abkühlung um zweistellige Gradbeträge, wie teilweise postuliert. Der abkühlende Effekt habe zudem, so die Forscher, nicht mehrere Dekaden oder gar Jahrhunderte angehalten, sondern weniger als ein Jahrzehnt. Damit schwindet die Wahrscheinlichkeit, dass der Ausbruch des Toba schuld an der drastischen Dezimierung der menschlichen Gattung war. Möglicherweise muss nun ein anderer Schuldiger gesucht werden. Klar bleibt aber: Der Ausbruch eines Supervulkans ist eine echte Katastrophe.

---

## **Dekkan-Trapp: Tötete ein Supervulkan die Dinosaurier?**

Auch der sogenannte Dekkan-Trapp im Westen Indiens ist das Resultat einer solchen vulkanischen Superkatastrophe. Der Auswurf gigantischer Lavamassen vor rund 65 Millionen Jahren hinterließ dort ein 600.000 Quadratkilometer großes Gebiet, das noch heute mit einer bis zu zwei Kilometer dicken Basaltschicht bedeckt ist. Datierungen zeigen, dass die Ausbrüche des Dekkan-Trapps sich über eine bis mehrere Millionen Jahre hinweg erstreckten. Mindestens 29 verschiedene Lavaströme konnten Geologen anhand der Basaltschichten identifizieren. Nach Schätzungen von Terrence Gerlach vom Sandia National Laboratory spie die Erde allein zur Hauptausbruchsphase mehr als sechs Millionen Tonnen Schwefel, 30 Billionen Tonnen Kohlendioxid und rund 60 Milliarden Tonnen Chlor und Fluorverbindungen aus. Asche und Gase verteilten sich bis in die Stratosphäre und ließen die Temperaturen weltweit um vier bis fünf Grad sinken, auch hier war ein vulkanischer Winter die Folge.

Die von den unzähligen Vulkanschlotten des Dekkan-Trapp ausgestoßenen Mengen an Schwefel, Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid wurden in der Luft zu Schwefelsäure umgesetzt und fielen als saurer Regen. Das durch den Regen ebenfalls aus der Luft ausgewaschene Chlor

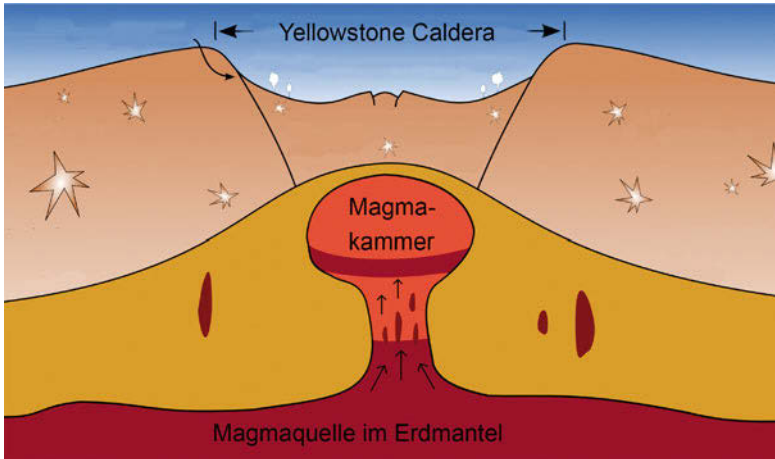
reichte vermutlich aus, um in den obersten Wasserschichten von Meeren und Seen alles Leben auszulöschen. Auch die Ozonschicht litt: Schon der Ausbruch des Krakatau im Jahr 1883 hat durch die von ihm ausgestoßenen 300 Tonnen Salzsäure die irdische Ozonschicht vorübergehend um bis zu acht Prozent dezimiert. Während des Dekkan-Trapps Vulkanismus stiegen jedoch Tausende von Tonnen an Salzsäure in die Atmosphäre auf und zerstörten dort einen Großteil des UV-Schutzfilters der Erde. Sowohl Pflanzen als auch Tiere könnten dadurch erheblich geschädigt worden sein.

Doch bei Kälte und Strahlung blieb es wahrscheinlich nicht. Kaum war der Vulkanwinter vorüber, begann das durch die Vulkane in die Atmosphäre geschleuderte Kohlendioxid, das irdische Klima langsam aufzuheizen. Da gleichzeitig die Meeresalgen durch sauren Regen und Chlor stark dezimiert waren, konnten auch die Ozeane das Treibhausgas nicht mehr binden. Vermutlich wurde durch das saure Meerwasser sogar noch zusätzlich CO<sub>2</sub> aus den Carbonatsedimenten gelöst und an die Atmosphäre abgegeben. Nach Schätzungen von Marc Javoy und Gil Michard von der Universität Paris könnten dadurch die globalen Temperaturen um rund fünf Grad angestiegen sein. Vielen ohnehin durch Kälte und Strahlung angeschlagenen Organismen hätte dies endgültig den Garaus gemacht. Ob dieses Szenario sich so oder so ähnlich tatsächlich ereignet hat, ist nicht eindeutig nachweisbar. Einige Wissenschaftler halten es aber für möglich, dass dieser Supervulkan es war – und nicht ein Asteroiden-Einschlag, der zum Massensterben am Ende der Kreidezeit führte – und damit die Dinosaurier ausrottete.

---

## Die Katastrophe kommt alle 600.000 Jahre

Äußerlich ist dem Yellowstone Nationalpark sein vulkanischer Charakter nicht anzusehen. Lediglich die zahlreichen thermalen Erscheinungen wie Geysire, heiße Quellen und Fumarole zeugen davon, dass unter dem Park nicht alles so ruhig ist wie an der Erdoberfläche. Der Yellowstone liegt auf einer lokal begrenzten Aufschmelzungszone, einem sogenannten Hot Spot, des Erdmantels. Während die meisten vulkanischen Aktivitäten auf der Erde an den Bereich von Plattengrenzen gebunden sind, gibt es einige wenige vulkanische Stellen, die inmitten der Platten liegen. Geologen



Ursache des Yellowstone-Supervulkans ist ein Hot Spot – ein Magma-Aufstrom aus dem Erdmantel (National Park Service (© NPS))

haben herausgefunden, dass sich unter ihnen ortsfeste Magmareservoire befinden. In mehr oder weniger regelmäßigen Abständen dringt das Magma an die Erdoberfläche und führt dort zu einem Vulkanausbruch.

Im Umkreis des Nationalparks lassen sich Spuren früherer Superausbrüche finden. Meterdicke Schichten alter, erhärteter Vulkanasche zeugen von Eruptionen aus längst vergessener Zeit. Geologen haben diese Lavaschichten datiert und kamen zu dem Ergebnis, dass die Magmakammer unter dem Yellowstone in der Vergangenheit dreimal unvorstellbare Massen an flüssigem Gestein an die Erdoberfläche befördert hat: Der erste Ausbruch fand vor etwa zwei Millionen Jahren statt. 1,3 Millionen Jahre vor unserer Zeit spie der Vulkan zum zweiten Mal Lava und die dritte und bisher letzte Eruption formte vor 640.000 Jahren die Caldera, auf der der heutige Yellowstone Nationalpark zum größten Teil liegt. Doch dieser Krater ist nur der Überrest des letzten Ausbruchs. Zwei weitere Calderen existieren in unmittelbarer Nachbarschaft des heutigen Kraters. Aus diesen drei Ausbrüchen des Supervulkans ergibt sich ein regelmäßiger Zyklus von ungefähr 600.000 Jahren.



Vulkanologen gehen davon aus, dass sich diese Regelmäßigkeit fortsetzt – damit aber wäre der nächste große Ausbruch des Yellowstone-Supervulkans eigentlich längst überfällig. Denn seit der Eruption vor 640.000 Jahren gab es nur kleinere vulkanische Ausbrüche auf dem Yellowstone Plateau, die die Calderen wieder mit neuen Gesteinsschichten bedeckten. Die kumulativen Effekte dieser Eruptionen, haben die hügelige und bewaldete Topographie des Yellowstone Plateaus geschaffen. Durch weiteres Ausströmen von Magma entstanden vor allem zwei strukturelle Formationen: Der Sour Creek Dome im Nordosten der Caldera erhob sich nach der Haupteruption und der Mallard Lake Dome im Süden der Caldera formte sich vor 150.000 Jahren. Beide Formationen bildeten sich durch Magmaausstrom und werden als aktive, vulkanische Gebilde angesehen. Nach der explosiven Eruption sackte die Yellowstone Caldera einige hundert Meter ab, später wurde sie dann durch Lavaströme und Sediment wieder aufgefüllt.

---

## Überwachung – Wann ist es soweit?

Dass der Supervulkan unter dem Yellowstone Park irgendwann ausbrechen wird, darin sind sich die Vulkanexperten einig. Die Frage ist nur: wann? Bei einem so langen Zyklus wie bei dem des Yellowstone-Vulkans, kann der nächste Ausbruch nächstes Jahr, in 100 Jahren, vielleicht aber auch erst in 1000 Jahren stattfinden. Daher haben die Forscher schon seit längerem ein Auge auf den Park geworfen. Über den gesamten Park sind seismographische Stationen verteilt, die jede noch so kleine Erschütterung registrieren. Die Aufzeichnungen der Messungen enthüllen, dass sich jedes Jahr Hunderte von Erdstößen unter dem Yellowstone Park ereignen. Die meisten sind jedoch so winzig, dass sie ohne die empfindlichen Messgeräte gar nicht wahrgenommen würden. Es kommt aber immer wieder vor, dass auch größere Erdbeben das Naturreservat kräftig durchrütteln. So ereignete sich 1959 ein Beben der Stärke 7,5, das die Gegend um den Park aufschrecken ließ. Die zahlreichen Beben und Erdstöße sind allerdings ein untrügliches Zeichen dafür, dass der Untergrund äußerst aktiv ist und es unter der Oberfläche brodelte.

Zusätzlich sind über den gesamten Park GPS-Stationen verteilt. Denn wenn sich der Druck in der Magmakammer im Lauf der Zeit verän-

dert, dann macht sich dies auch durch eine Hebung oder Senkung des Erdbodens bemerkbar. Tatsächlich registrieren die Geräte solche Veränderungen, der Boden unter dem Yellowstone Park scheint zu atmen: Von 1923 bis 1985 hob sich der Untergrund um 74 Zentimeter an, dann senkte er sich bis 1995 etwas ab und seitdem wölbt der Boden sich wieder auf. Die Ursache für diese Bewegungen kann nur eine riesige unterirdische Magmakammer sein, die sehr aktiv ist, schlussfolgern die Forscher.

Wie diese Magmenkammer aussieht und was darin passiert, verraten wiederum seismische Messungen. Denn je nachdem, welches Material Erdbebenwellen durchlaufen, ändert sich ihre Geschwindigkeit. Und heißes, geschmolzenes Gestein wirkt sich dabei anders aus als festes, kaltes. Durch Auswertung dieser Daten kamen Forscher zu dem Schluss, dass das Reservoir unter dem Yellowstone Park ungeheure Ausmaße haben muss. Die Kammer ist etwa 40 bis 50 Kilometer lang, 20 Kilometer breit und zehn Kilometer dick. Der abgeflachte Kopf des Yellowstone-Hot Spots, der diese Kammer nährt, liegt dabei rund 80 Kilometer unter der Erdoberfläche und breitet sich vermutlich etwa 480 Quadratkilometer weit aus. Von ihm lösen sich immer wieder gewaltige Blasen von heißem, teilweise geschmolzenem Gestein ab und steigen weiter auf bis zur nur sechs bis 15 Kilometer unter der Oberfläche liegenden Magmakammer.

Während jedoch die Form und Lage der Magmenkammer recht gut untersucht ist, gab es lange Zeit nur wenige Daten über den Hotspot selbst und darüber, wie genau das heiße Gestein vom Hot Spot in die Kammer gelangt. Erste Messungen aus dem Jahr zeigten, dass sich die „heiße Zone“ von Yellowstone aus in einem Winkel von rund 60 Grad nordwestwärts in die Tiefe zieht. Etwa 660 Kilometer unter der Oberfläche und 240 Kilometer nordwestlich von Yellowstone verlor sich dann die Spur des Hot Spots, denn weiter reichte das „Sehvermögen“ der seismischen Messungen nicht. Im Jahr 2011 dann präzisierten US-Geophysiker das Bild des Hotspots – diesmal jedoch mit Hilfe einer völlig anderen Technologie. Die Wissenschaftler nutzten magnetotellurische Daten, um den Verlauf des Hotspots zu modellieren. „Wir nutzen dabei magnetische und elektrische Felder, die an der Erdoberfläche aufgenommen werden, um daraus Informationen über die tiefen geologischen Strukturen der Erde zu gewinnen“, erklärt Studienleiter Michael Zhdanov von der Universität von Utah. Diese von den Spezialinstrumenten aufgezeichneten elektromagnetischen Felder sind extrem niederfrequent und dringen hun-

derte von Kilometern in Erde ein. Je nach Leitfähigkeit des Untergrunds verändert sich ihr Muster. In Bereichen mit teilweise geschmolzenem Gestein mischen sich beispielsweise Schmelze und heißes, salzhaltiges Wasser, sie sind elektrisch sehr leitfähig. Aus den Daten berechneten die Forscher ein Modell dieser Leitfähigkeitsverteilung. Dieses 3D-Modell zeichnete ein leicht von den seismischen Messungen abweichendes Bild der Prozesse unter der Magmenkammer: Demnach verläuft der leitfähige und damit geschmolzene Teil des Plumes in einem 40 Grad-Winkel nach Westen und erstreckt sich rund 640 Kilometer von Ost nach West. Diese im Vergleich zu den seismischen Messungen geringere Neigung könnte nach Ansicht der Forscher darauf hindeuten, dass der eigentliche Plume von einer größeren Hülle aus teilweise geschmolzenem Gestein und heißer Sole umgeben ist. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass der Hotspot aktiv ist und nach wie vor Magma fördert.

---

## Es kann sehr schnell gehen

Nicht nur der Supervulkan unter dem Yellowstone-Nationalpark zeigt Anzeichen für Aktivität, auch unter den Phlegräischen Feldern in Italien gibt es seit einiger Zeit immer wieder einmal Phasen geologischer Unruhe. Doch was diese Aktivitäten bedeuteten und ob ein Ausbruch droht, ist unklar – denn Supervulkane sind noch unberechenbarer als normale Feuerberge. Wie schnell aber ein Supervulkan von scheinbar schlafend auf aktiv umschalten kann, das zeigte eine Untersuchung im Jahr 2012. Für ihre Studie analysierten Timothy Druitt von der Universität Blaise Pascal in Clermont-Ferrand und seine Kollegen Magma des Vulkans unter der griechischen Insel Santorin. Als dieser Vulkan etwa 1650 vor Christus ausbrach, überzog er den gesamten östlichen Mittelmeerraum mit Asche und Rauch und zerstörte weite Teile der Insel Thera – heute Santorin.

Was sich im Untergrund vor dem Ausbruch abspielte, rekonstruierten die Forscher mit Hilfe von Kristallen des Minerals Feldspat, die in dem Magma des Supervulkans unter Santorin gebildet worden waren. Die Form und Zusammensetzung dieser Kristalle spiegelt wider, wann sie in die Magmakammer gelangten und wie lange sie dort bis zur Eruption blieben. Anhand dieser Kristallanalysen identifizierten die Wissenschaftler drei Phasen der Aktivität vor dem Ausbruch: Weniger als hundert

Jahre vor der Eruption begann Magma, aus einem tiefen Reservoir in die Magmakammer unter Santorin aufzusteigen. Weniger als zehn Jahre vor der Eruption mischte sich dann diese Gesteinsschmelze einige Kilometer unter der Oberfläche mit bereits vorhandenem Magma anderer chemischer Zusammensetzung. Einige Monate vor der Eruption strömten dann noch einmal verschiedene Magmen in die Kammer ein.

„Unsere Ergebnisse zeigen, wie schnell ein großes Vulkansystem aus dem Ruhezustand bis an den Rand der Eruption gelangen kann“, berichten die Forscher. Das Magmareservoir eines solchen Vulkans füllt sich demnach nicht langsam und kontinuierlich, sondern sprunghaft in mehreren Pulsen. Dies macht sich durch Erdbeben und Verformungen des Untergrunds bemerkbar. Trotz einer 18.000 Jahre dauernden Pause benötigte der Santorin-Vulkan weniger als hundert Jahre, um ausreichend Magma für den gewaltigen Ausbruch vor gut 3600 Jahren anzusammeln. Das aber bedeutet: Der Ausbruch eines Supervulkans kündigt sich schon an, aber offenbar erst mehrere Jahrzehnte bis Monate vorher. „Eine Langzeit-Überwachung von großen, schlafenden Supervulkan-Systemen – selbst in abgelegenen Teilen der Erde – ist daher notwendig“, warnen die Wissenschaftler. Nur dann könne man die letzten Wachstumsschübe der Magma-Reservoirs rechtzeitig vor einem großen Ausbruch entdecken.

---

# Erdrutsche – wenn der Hang den Halt **8** verliert

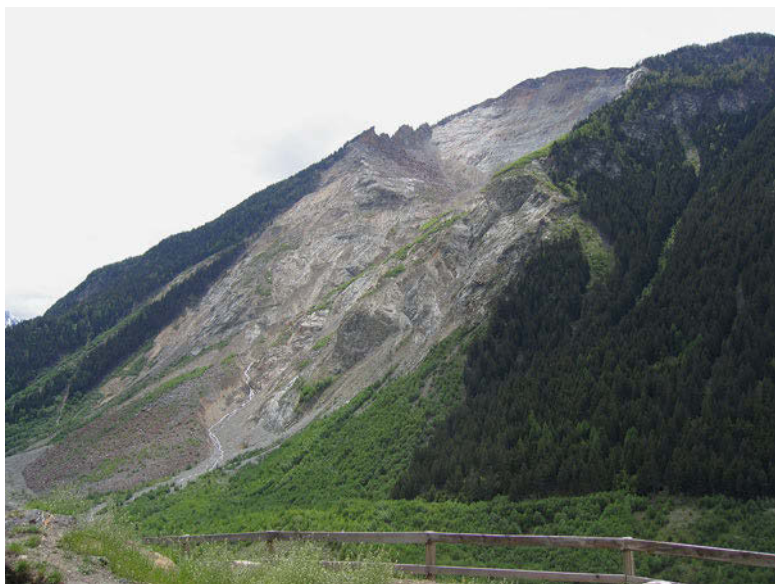
Nadja Podbregar

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. Überall dort, wo es Hänge, Böschungen und Steilkanten gibt, kann eine Rutschung passieren. Ihre Ursachen und Auslöser allerdings sind fast so vielfältig wie die Landschaften, in denen sie vorkommen. Verhindern lassen sich diese Naturereignisse meist nicht. Deshalb versuchen Forscher, Frühwarnsysteme zu entwickeln, die anzeigen, wenn ein Hang abzurutschen droht. Allerdings: Der beste Schutz vor solchen Katastrophen wäre es, gefährdete Gebiete gar nicht erst zu besiedeln. Denn im Zweifelsfall ist die Natur stärker.

---

## Veltlin und Nachterstedt – zwei Fallbeispiele

Juli 1987. Das Veltlin in Italien. Hier liegen mehrere Ortschaften in einem vom Fluss Adda durchströmten Tal unterhalb des 3066 Meter hohen Pizzo Coppetto. Auch eine Staatsstraße führt durch das Tal. Dass die Felsmassen oberhalb des Tales nicht unbedingt extrem stabil sind, ist schon länger bekannt. Denn schon 1961 entdeckten Geologen einen 500 Meter langen Riss quer über einen Hang. Dennoch wird zunächst nichts unternommen, auch die Straße verläuft ungeschützt ohne Galerien oder Tunnel. Doch wie gefährlich die Situation ist, zeigt sich erst jetzt, nach einem besonders regenreichen Sommer. Seit Mitte Juli häufen sich kleinere Felsstürze im Tal, Geologen registrieren am 24. Juli eine Sackung der Felsmassen um 1,50 Meter innerhalb weniger Stun-



Die Spuren des Bergsturzes von 1987 im Veltlin bei Morignone sind noch heute sichtbar (© Peter Sturm/gemeinfrei)

den und schlugen Alarm. Gerade noch rechtzeitig: Am 28. Juli 1987 kollabiert plötzlich der Hang und rund 50 Millionen Kubikmeter Gestein stürzen mehr als tausend Meter in die Tiefe. Die Masse brandet am Gegenhang noch 300 Meter nach oben und bedeckt die Talsohle auf 3,5 Kilometern Länge. Der Bergsturz ist von einer orkanartigen Druckwelle begleitet, der Wälder und Kirchtürme knickt wie Streichhölzer. Drei Dörfer, darunter der Ort Morignone, werden komplett begraben, 28 Menschen sterben, weitere rund 25 werden vermutlich verschüttet, während sie auf der Staatsstraße unterwegs sind.

Doch die Katastrophe ist noch nicht vorbei: Das im Tal verteilte Gestein staut die Adda zu einem gewaltigen See auf, der unterhalb gelegene Orte zu überfluten droht. Das obere Veltlin ist von der Außenwelt abgeschnitten. Zudem droht der vom Erdbeben aufgestaute See jeden Moment seine natürliche Barriere zu überfluten. Vorsorglich werden da-

her mehr als 20.000 Bewohner des unteren Veltlintals evakuiert. Starke Regenfälle tragen dazu bei, dass der Wasserspiegel des neuen Stausees schneller anwächst als erwartet. Um einen katastrophalen Dammbruch zu verhindern, graben Bagger eine Schneise in die aufgetürmten Schuttmassen und leiten so eine gesteuerte Überflutung ein. Der Felssturz gilt heute als eine der größten geologischen Katastrophen des 20. Jahrhunderts.

Szenenwechsel. Sommer 2009. Der Ort Nachterstedt in Sachsen-Anhalt. Hier wird bereits seit dem 19. Jahrhundert Braunkohle im Tagebau gefördert, zeitweise ist das Gebiet sogar die größte Braunkohlegrube Preußens. Die Grube wandert dabei immer weiter, die Siedlung muss ihr weichen und wird am Rand des Abbaugebiets neu errichtet. Während der Kohleförderung wird Grundwasser in den offenen Gruben abgepumpt, die bis zu 100 Meter tief sind. Als 1990 der Tagebau in der Region eingestellt wird, entsteht rund um die Gruben das Naherholungsgebiet Seeland. Dafür werden die Gruben mit Flusswasser geflutet, so dass künstliche Seen mit meist sehr steilen, hohen Ufern entstehen. Eine Siedlung liegt unmittelbar an einer Abbruchkante, rund 100 Meter über dem Ufer des in einem Tagebauloch künstlich angelegten Concordia-Sees.

Am 18. Juli 2009 um 05:00 Uhr morgens dann ereignet sich die Katastrophe: Nach heftigen Regenfällen löst sich auf einer Länge von 350 Metern der Hang und kommt ins Rutschen. Mehr als eine Million Kubikmeter Erdschutt stürzen in die Tiefe und reißen ein Doppelhaus und einen Teil eines Einfamilienhauses samt Bewohnern mit sich in die Tiefe. Auch die Straße und ein Aussichtspunkt werden durch den Erdbeben zerstört. Der Einschlag der Erd- und Trümmerrmassen im See löst zudem eine Flutwelle aus, die einen am Seeufer ankernden Ausflugsdampfer ans andere Ufer schleudert und die Anlegestelle unter meterdickem Schlamm begräbt. Und auch Tage später ist die Gefahr ist noch nicht gebannt: An der Unglücksstelle sind weitere Risse aufgetreten. Noch hängt ein Gebäude halb am Hang und könnte ganz abstürzen. 42 Einwohner der Siedlung dürfen nicht in ihre Häuser zurückkehren, die Gefahr weiterer Rutsche oder Senkungen ist zu groß.

## Rutschung ist nicht gleich Rutschung

Schon diese beiden Beispiele zeigen, dass es ganz verschiedene Arten von Erdrutschen gibt. Sie unterscheiden sich nicht nur in ihren Dimensionen und Folgen, sondern auch in ihrem Wesen. Je nach Material, das sich bewegt, und der Geschwindigkeit, mit der es abrutscht, unterscheidet man Bergrutsche oder Felsstürze, Schutt- und Steinlawinen, Schuttrutschungen, Muren oder Bodenkriechen. Entscheidend ist dabei, ob das Material gleitet, stürzt oder fließt – die Übergänge sind allerdings oft fließend.

In festem Gestein treten Massenbewegungen vor allem im Hochgebirge auf, wie im Fall des Veltlins An geologischen Schichtgrenzen lösen sich dabei große Gesteinsmassen und stürzen als Felssturz, Bergsturz oder als Steinlawine zu Tal. Brechen immer wieder kleine Gesteinsbrocken ab, spricht man von Steinschlag. Die Geschwindigkeiten solcher Bewegungen sind sehr hoch, meist liegen sie deutlich über fünf Kilometern pro Stunde. Gleitet dagegen Erdreich oder anderes Lockermaterial schnell über den Untergrund, wie im Falle von Nachterstedt, spricht man von einem Erdrutsch. Besonders gefürchtet sind Muren und Schlammströme. Diese gefährlichen Mischungen aus Wasser, Erde und Gesteinschutt bilden sich bei plötzlichen starken Regenfällen oder während der Schneeschmelze. Meist fließen sie schnell in bereits vorhandenen Rinnen zu Tal. Dort angekommen können diese Schlammströme Wege, Siedlungen oder Land verschütten.

In beiden Fällen entfalten solche Rutschungen eine unmittelbare und dynamische Wucht. Sie reißen meist alles mit, was sich auf dem Hang befindet. Menschen, Autos und ganze Häuser werden verschüttet oder von den Geröll- und Schuttmassen talwärts transportiert. Solche Massenbewegungen riegeln gelegentlich sogar ganze Täler ab und stauen die Flüsse oder Bäche zu neuen Seen an. Gelingt es dem aufgestauten Wasser, sich einen Weg durch die Geröllmassen zu bahnen, drohen talabwärts Flutwellen.

Nicht immer aber sind Massenbewegungen so dynamisch: Beim langsamsten Vorgang, dem Bodenkriechen, bewegt sich der Untergrund wie in Zeitlupe. Meist ist dies nur daran erkennbar, dass sich mit der Zeit Zäune oder Masten neigen oder Gebäude sich verziehen. Betrifft das Bodenkriechen einen größeren Hang, dann kann es sein, dass alle darauf





Heftige Regenfälle verursachten am 22. März 2014 diesen Erdrutsch im US-Bundesstaat Washington. Ein ganzer Hang rutschte dabei ab (© USGS/Jonathan Godt)

stehenden Gebäude langsam mit hangabwärts wandern – wie auf einem langsamen Förderband. Wenn der Hang in sich stabil bleibt, verursacht dies kaum Schäden – alles auf dem Untergrund Stehende wandert einfach mit. Bewegt sich aber der Untergrund schneller und zerfällt in einzelne Blöcke, ist das für Häuser oder Industrieanlagen fatal, sie werden durch die reißen und stauchenden Kräfte zerstört.

---

## Ursachen und Auslöser: Was Hänge ins Rutschen bringt

14. Dezember 1991, in den Südalpen Neuseelands. Alles ist ruhig, dann ertönt plötzlich ein donnerndes Getöse. Nahe des Gipfels vom Mount Cook löst sich plötzlich eine gewaltige Steinlawine. Aus heiterem Himmel kollabiert ein Teil des Hanges und zwölf Millionen Kubikmeter Geröll und Gestein rasen die Eisfelder des Osthangs hinab. Sie erreichen dabei teilweise Geschwindigkeiten von mehr als 200 Kilometern pro

Stunde. Glücklicherweise ist die Gegend zu dieser frühen Stunde menschenleer, eine Hütte mit schlafenden Bergsteigern entgeht der Steinlawine allerdings nur sehr knapp. Interessant aber macht diese Rutschung weniger ihre Auswirkung, als vielmehr ihre Ursache – oder vielmehr das Fehlen eines klaren Auslösers.

Denn ereignet sich ein Erdbeben oder bringt ein Vulkanausbruch einen Hang ins Rutschen, dann ist der Auslöser klar. Bei dem schweren Erdbeben am 12. Mai 2008 in chinesischen Sichuan kamen beispielsweise viele der mindestens 87.000 Toten nicht durch den Erdstoß oder die Nachbeben ums Leben, sondern durch Erdrutsche. Ähnlich war es auch beim Beben in Kaschmir, das im Oktober 2005 rund 86.000 Menschenleben forderte. Aber was ist in den Fällen, in denen keine solche vorangehende Katastrophe ausfindig zu machen ist wie am Mount Cook? Es gab weder sintflutartige Regenfälle, noch Erdbeben oder andere Faktoren. Ähnlich rätselhaft scheint auch, warum die Hänge mancher Küstenregionen jahrhundertlang jedem noch so starken Wettergeschehen ohne Probleme trotzten, um dann unter ganz ähnlichen Bedingungen geradezu kollektiv und wie nach Absprache von Erdrutschen heimgesucht zu werden.

Bei der Suche nach den Gründen für solche Phänomene, gilt es den subtilen Unterschied zwischen Ursache und Auslöser zu unterscheiden. Die Ursachen machen einen Hang anfällig für ein Abrutschen und prädestinieren ihn dafür, destabilisiert zu werden. Oft wirken dabei gleich mehrere ungünstige Faktoren zusammen, beispielsweise die Zusammensetzung des Gesteins, ein fehlender Bewuchs und die Hangneigung. Ist der Hang dadurch quasi vorgeschädigt, dann reicht ein kleiner Tropfen, um das Fass sprichwörtlich um Überlaufen zu bringen – der Auslöser. Ein Erdrutsch kann daher viele Ursachen haben, aber ausgelöst wird er dann meist durch ein einzelnes Ereignis. Dies können Erdbeben oder Vulkanausbrüche sein, aber auch Starkregen oder eine Wärmeperiode, die stabilisierendes Eis abtauen lässt.

In der Mehrheit aller Fälle ist ein starker Regen der Auslöser. Eine Studie im Jahr 2003 zeigte beispielsweise, dass weltweit von den 210 als zerstörerisch eingestuften Erdrutschen 90 Prozent durch Starkregen ausgelöst wurden. Besonders häufig sind heftige Niederschläge während eines Wirbelsturms oder Gewitters schuld. In Asien bringt die Regenzeit des Monsuns oft Erdrutsche mit sich. In diesem Fall muss der

Auslöser nicht einmal ein besonders starker Regen sein. Weil der Boden durch die wochenlangen Niederschläge bereits durchgeweicht ist, kann dann schon ein mittlerer, normalerweise folgenloser Regenguss als Auslöser wirken. Aber auch in Mitteleuropa macht sich dieser Effekt des Regens bemerkbar: Immer dann, wenn zwei oder drei Jahre hintereinander überdurchschnittlich viel Niederschlag fällt, häufen sich auch Erdbeben ereignen. In den letzten 120 Jahren gab es bereits vier solcher Phasen.

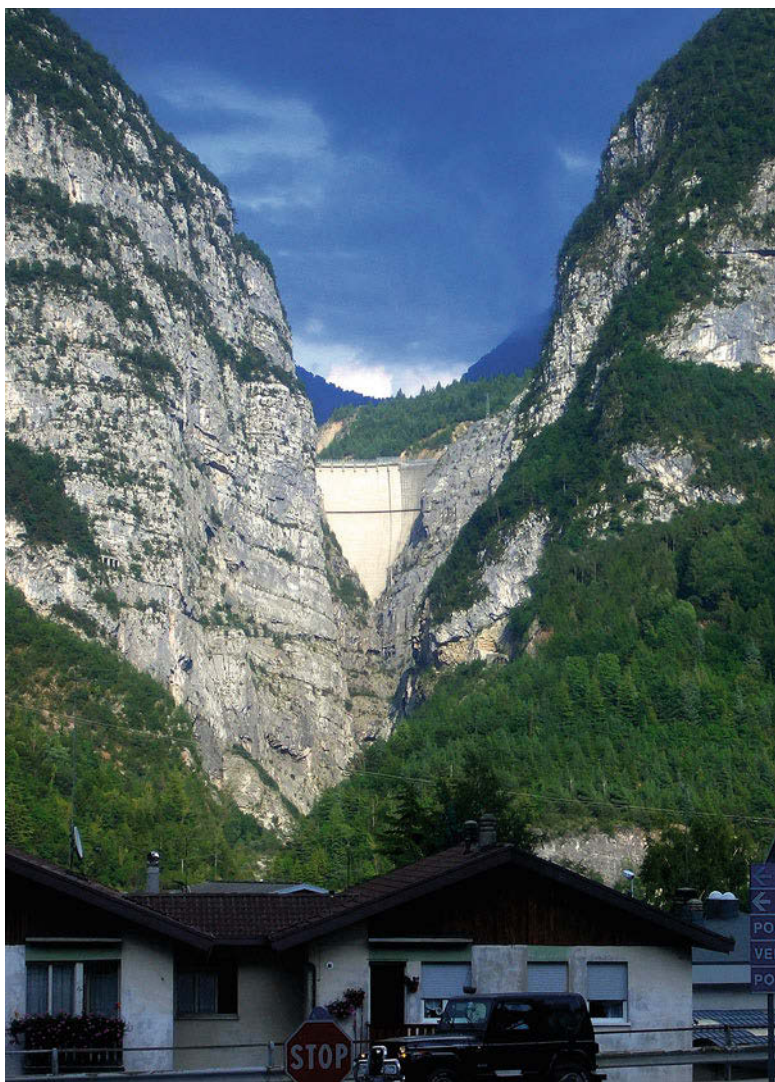
Der Grund für die auslösende Wirkung des Regens liegt in der Feinstruktur des Untergrunds verborgen. Denn zwischen den kleinen Partikeln des Bodens existieren winzige Hohlräume, die Bodenporen. Sie können von Luft oder aber Wasser gefüllt sein. Solange der Boden nur feucht ist, ist alles noch in Ordnung. 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 ein Erdbeben.

---

## **Menschliches Verschulden: der Fall Vajont**

Durch diesen Effekt kann Wasser auch in anderer Form Hänge ins Rutschen bringen: durch eine Änderung im Wasserstand eines Flusses oder Sees. Ein klassisches Beispiel dafür ist das Erdbeben von Vajont in Italien, das bis heute als tödlichste Rutschung in der europäischen Geschichte der Neuzeit gilt. Begonnen hatte alles 1956 mit dem Bau einer Talsperre in der Schlucht von Vajont, die den gleichnamigen Fluss aufstaute. Der gut 260 Meter hohe Staudamm und das angeschlossene Wasserkraftwerk sollten unter anderem die rund 100 Kilometer südlich gelegene Stadt Venedig mit reichlich Energie versorgen. 150 Millionen Kubikmeter sollte der Stausee fassen. Auf den ersten Blick schienen auch die geologischen Voraussetzungen für das Projekt nicht schlecht: Die enge Schlucht mit den steilen Kalksteinwänden wirkte stabil.

Zwar ergaben geologische Untersuchungen Hinweise auf Erdbebenreste im Untergrund und auch die Gesteinsschichten waren in den Wänden schräg zur Schlucht hin abfallend geschichtet. Aber Probebohrungen



Blick auf die Vajont-Staumauer. Deutlich ist zu erkennen, wie eng und steil die Schlucht ist (© Emanuele Paolini/gemeinfrei)

und seismische Analysen sprachen dennoch für ausreichend Stabilität – so schien es jedenfalls. 1960, kurz nach Beginn der Befüllung des Reservoirs, schickte die Natur den Ingenieuren eine erste eindrückliche Warnung: An der südlichen Flanke des Stausees rutschte ein kleiner Teil des steilen Berges ab. Wenig später zeigte sich ein großer Riss im Untergrund, der ein 1,7 Kilometer lang und rund einen Kilometer breites Gebiet umgrenzte. Dennoch ging die Füllung des Stausees weiter. Die Geologen und Ingenieure erkannten zwar, dass der Hang instabil war, hofften aber, ein Abrutschen durch eine stufenweise, immer wieder durch leichtes Ablassen des Wassers unterbrochen Befüllung zu verhindern.

Am 9. Oktober 1963 um 22:39 Uhr ereignete sich die Katastrophe. 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. Die Folge: eine riesige, bis zu 70 Meter hohe Flutwelle, die auch die Krone des Dammes überschwappte. Knapp 30 Millionen Kubikmeter Wasser ergossen sich in das tiefer gelegene Tal. Die Wassermassen überraschten die meisten Menschen im Städtchen Longarone und seiner Umgebung im Schlaf. Zeit für Warnmeldungen oder Evakuierungsmaßnahmen blieb nicht, dafür ging alles zu schnell. 2500 Bewohner des Vajont-Tals starben am Ende in den Fluten, fünf Ortschaften wurden ausradiert. Der Damm selbst blieb unbeschadet.

Wie aber konnte es zu dieser Katastrophe kommen? Im Fall Vajont kamen offenbar gleich mehrere ungünstige Faktoren zusammen. So entstehen Massenbewegungen besonders leicht an Hängen, bei denen mehrere geologische Schichten parallel zur Hangneigung aufeinander liegen. Genau dies war auch in der Vajontschlucht der Fall. Kalkstein aus dem Jura und der Trias lagerten hier schräg aufeinander. Hinzu kam: Der Kalkstein war von dünnen, teilweise nur 5 bis 15 Zentimeter dicken Schichten aus Ton durchsetzt, wie der Geologe Dave Petley von der Durham University erklärt. Ton und Lehm aber wirken im Untergrund wegen ihrer sehr feinen Partikel wie ein Schmiermittel. Auch die Ablagerungen alter Erdbebenrutsche könnten dazu beigetragen haben, die Hänge zu destabilisieren und anfällig für eine Rutschung zu machen.

Der Auslöser des Unglücks von Vajont aber war menschengemacht: Das Auffüllen des Reservoirs mit Wasser durchnässte die angrenzen-

den Hänge und drang auch in die dünnen Tonschichten. Dadurch stieg der Porendruck und die Tonpartikel wurden auseinander gedrängt. Diese Masse wurde dann endgültig zu einem fast flüssigen Brei, als die Ingenieure kurz vor dem 9. Oktober den Wasserspiegel im Stausee wieder absenkten. Dadurch lagen einige der Tonschichten frei und das darin gesammelte Porenwasser strömte, seines Gegendrucks beraubt, ins Freie – und nahm dabei den Ton gleich mit. Als Folge verloren die auflagernden Gesteinsschichten plötzlich ihren Halt und rutschten ab. Damit war das Unglück nicht mehr aufzuhalten.

Der Fall Vajont zeigt, dass auch der Mensch an vielen Erdrutschen schuld ist. In sogar fast 40 Prozent aller Fälle ist er es, der ein solches Ereignis auslöst, zum Beispiel durch das Füllen von Talsperren wie in Vajont, aber auch, indem er für den Straßenbau, Aufschüttungen oder andere Baumaßnahmen Hänge anschneidet. 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. Nicht unerheblich zum Erosionsproblem trägt zudem 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.

---

## **Erdrutschforschung: mit Plastikkugeln und Riesenkondomen**

Aber woher weiß man, was bei einem Erdrutsch im Untergrund passiert? Und wann ist der Punkt erreicht, an dem Porendruck, Erschütterungen oder sonstige Trigger die Rutschung auslösen? Um diese Fragen zu klären, wären normalerweise jede Menge vor Ort Beobachtungen nötig – auch und gerade im mikroskopischen Maßstab. Aber bei den eher unberechenbar und spontan auftretenden Rutschungen ist das schwierig bis unmöglich. Forscher stellen daher meist die Vorgänge vor und während eines Erdrutsches im Experiment nach oder studieren sie an Computermodellen.



Ein klassisches Rezept für einen Erdrutsch im Labormaßstab: Verglaste Gefäße werden mit einer Mischung aus Wasser sowie weißem und schwarzem Sand gefüllt. Dann wird diese feuchte Pampe ins Kippen gebracht und ein künstlicher Erdrutsch ausgelöst. Hochgeschwindigkeitskamera nehmen dabei die Bewegungen der einzelnen Sandkörner und Fraktionen auf. Für einen nachgebauten Schuttstrom greifen Wissenschaftler auch schon mal zu Material aus dem Baumarkt: Tapetenkleister, gemischt mit kleinen PVC-Kugeln, Wasser und Kohlenschlacke eignen sich prima, um das Erde-Sand-Schuttgemisch von Schlammströmen zu simulieren.

Für das weltweit größte Erdrutsch-Experiment im Oregon's Willamette National Forest karren Wissenschaftler des US Geological Survey sogar Wagenladungen voll mit Materialien herbei. Sie entsprachen in ihrer Zusammensetzung denen zweier großer Schlammströme in der nordamerikanischen Geschichte: dem Erdrutsch nach dem Ausbruch des Mount St. Helens im Jahr 1980 und der Osceola-SchlammLawine, die das Aussehen des Mount Rainier vor 5000 Jahren komplett veränderte. Viel kleiner, aber genauso spektakulär war ein anderes Projekt, bei dem Forscher ein überdimensionales, schlammgefülltes Kondom eine Sperrholzrampe herunterschickten, um festzustellen, wie es sich deformiert. Besonders interessierte die Geologen, wie schnell das Latex-Modell während dieses „Erdrutsches“ seine Form verliert und wieder gewinnt.

Heute allerdings geht es in der Erdrutschforschung eher digital zu: Hunderttausende von virtuellen farbigen Kugeln stehen dann für Sand, Gestein oder Geröll. Auch die Geophysikerin Katrin Huhn vom DFG-Forschungszentrum Ozeanränder der Universität Bremen nutzt solche Modelle. Sie helfen ihr, herauszufinden, welche Faktoren für Erdrutsche unter Wasser verantwortlich sind. Solche submarinen Rutschungen, beispielsweise an den Rändern der Kontinentalschelfe, können enorme Mengen Wasser verdrängen und so Tsunamis auslösen. Sie vorhersagen zu können und ihre Auslöser zu verstehen, ist daher enorm wichtig. „Im Grunde ist es ein wenig wie im Sand zu spielen. Nur dass ich im Rechner genau die Eigenschaften der einzelnen Sandkörner beziehungsweise Kugeln bestimmen kann“, erklärt die Geophysikerin.

In ihrem Modell steht jede einzelne Kugel für ein kleines Erdpaket mit veränderbaren Eigenschaften. Zum Beispiel kann Huhn der untersten Kugelschicht die Eigenschaften von Ton zuweisen, die darüber wird

Schlamm, der wesentlich fester ist. Dann kommt eine Lage grober Sand, der das ganze System nach oben hin abdichtet und das Wasser im Ton bindet. Kippt sie jetzt ihren virtuellen Kontinentalhang, so fängt das Sedimentpaket irgendwann an zu rutschen. Die Tone wirken dabei als Schmiermittel, auf dem die Rutschung abwärts gleitet. Der Winkel, bei dem dies geschieht, und wie viel vom Hang abrutscht, hängen unter anderem davon ab, wie viel Wasser in den einzelnen Schichten vorhanden ist, wie grob die Partikel sind und wie viel Material auf den Tonen lagert. All diese Parameter kann die Forscherin im Rechner mit wenigen Klicks verändern. Ihr und ihren Kollegen weltweit hilft dies, herauszufinden, welche Faktoren einen Hang stabil machen oder aber ihm den Halt nehmen.

---

## **Vorbeugung: Schutzbauten, Wälder und Sperrzonen**

Solange sich Massenbewegungen in weitgehend unbesiedelten Gebieten abspielen, bleiben die Schäden überschaubar. Zur echten Katastrophe aber werden Erdrutsche immer dann, wenn Menschen davon betroffen sind. Das aber kommt immer häufiger vor. Denn durch das Bevölkerungswachstum und die immer stärkere Nutzung auch von entlegenen Gebirgsregionen rückten menschliche Siedlungen und Infrastrukturen bis in erdrutschgefährdete Gebiete vor. Dadurch steigt das Risiko, dass sich ein Erdbeben in bewohntem Gebiet ereignet, drastisch an. Die Folgen, die sich dann aus so einem Ereignis ergeben, sind häufig katastrophal.

Vielerorts versuchen Wissenschaftler und Techniker daher, gefährdete Hänge durch technische oder biologische Maßnahmen zu stabilisieren. Halt verleihen sollen beispielsweise Betonaufgaben verbunden mit Erdankern, die bis in stabile Gesteinsschichten reichen und so aufliegende instabile Schichten befestigen können. Eher oberflächlich gegen weitere Erosion schützen dagegen Stützmauern, Netzwerke aus Spezialmaterialien und Erdnägeln. An engen Schluchten oder von Auswaschung bedrohten Bachbetten können zudem querliegende Holzstämmen als Schutz dienen. Sie halten den Boden fest und verhindern, dass er weiter abgetragen wird. Dem Problem der Staunässe – einem der Hauptauslöser von Erdrutschen – versuchen Wissenschaftler dagegen mit ausgeklügelten



Drainagesysteme Herr zu werden. Diese leiten das Wasser ab und verhindern so, dass größere Erdmassen in Bewegung geraten.

Der vielleicht effektivste natürliche Schutz vor einem Erdbeben ist aber 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. Sind an Hängen schon kleinere Rutschungen aufgetreten, werden diese instabilen Flächen durch Buschlagenbau befestigt. Dabei sollen quer zur Hangneigung verlaufende Reihen von Holzpfählen und Reisigwällen frisch gesetzte Jungpflanzen vor Auswaschung schützen. Oft werden Rasenmatten oder Rasensaaten genutzt, um kahle Hänge zu stabilisieren. Die feinen, weit verzweigten Wurzeln der Gräser halten den Untergrund fest und verhindern so, dass er ausgewaschen wird oder ins Rutschen gerät. Billiger und langfristig vielversprechender ist es allerdings, gefährdete Gebiete von vornherein nicht zu bebauen oder zu besiedeln. In vielen Regionen der Welt wird deshalb eine weitere Bebauung der erdbebenanfälligen Gebiete gezielt verboten oder stark reglementiert. Geologische Kartierungen oder die Auswertung zurückliegender Ereignisse unterstützen die Verantwortlichen dabei, solche Zonen festzulegen.

---

## Frühwarnsysteme: Ohr am Boden

Alle vorbeugenden Maßnahmen haben aber ihre Grenzen: Die Riesen unter den Erdbeben, bei denen sich Millionen Kubikmeter Fels, Erde und Geröll auf einmal lösen, lassen sich durch solche Methoden nicht aufhalten. Deshalb überwacht man inzwischen besonders gefährdete Hänge beispielsweise in Europa oder den USA mithilfe modernster Technik. Oft zeigen sich in den Hängen schon vor einem Erdbeben langsame Bewegungen des Erdreichs oder Gesteins, die gemessen werden können. Die Resultate verschiedener Messinstrumente, darunter Regenmesser, Bodenmikrofone, Dehnungsmesser und Sensoren für eine Porendruckmessung, können daher zumindest anzeigen, ob das Risiko für eine Rutschung hoch ist oder beispielsweise plötzlich steigt.

Einen Prototyp für ein solches System haben Forscher der Universität Bonn gemeinsam mit Kollegen vor einigen Jahren in der Schwäbischen Alb installiert. Ihr Frühwarnsystem basiert auf ingenieurtechni-

schen Messungen und setzt auf ein Ampelprinzip: „Es geht uns vor allem auch darum, die Warnungen für die Nutzer so aufzubereiten, dass sie damit etwas anfangen können“, erklärt Jürgen Pohl von der Universität Bonn. Im Boden eingebrachte Sensoren messen verschiedene Frühindikatoren wie Bewegungsraten des Hanges und Bodenfeuchte. Diese Daten werden über Internetverbindungen an die verantwortlichen Experten in den zuständigen Behörden weitergeleitet. Die Daten sind aber auch online für angemeldete Nutzer zugänglich. Werden Grenzwerte überschritten, schaltet die Warnampel von Grün nach Gelb. Unter bestimmten Umständen wechselt sie dann schließlich nach Rot – entweder nach Prüfung durch Experten oder auch automatisch. Im Anschluss daran sind verschiedene Maßnahmen möglich. „Dann werden zum Beispiel Schranken aktiviert, die akut gefährdete Straßen sperren“, erläutert Pohl.

Ein Nachteil dieser bisher meist erst im Pilotstadium existierenden Frühwarnsysteme: Es müssen am Hang viele Geräte installiert werden. Das aber ist aufwändig und teuer. Solche Überwachungssysteme günstiger zu machen, war daher das Ziel eines Projekts von Forschern der Technischen Universität und der Universität der Bundeswehr in München. Auch sie bohren an mehreren Stellen in den Untergrund des potenziell instabilen Hanges. „Die Bohrlöcher bestücken wir aber mit ganz simplen Koaxialkabeln, wie man sie beispielsweise von Antennenkabeln kennt“, erklärt der Ingenieurgeologe Kurosch Thuro. Gerät die obere Erdschicht ins Rutschen, wird das Kabel am Übergang zur unbeweglichen Schicht gequetscht. Ein kleines Übertragungsgerät an der Oberfläche registriert dies und leitet die Information weiter. Daneben verteilen die Forscher Sensoren über den Hang, deren Position mittels GPS bestimmt werden kann. Als Drittes setzen die Wissenschaftler eine neue Generation von Messgeräten ein, so genannte Videotachymeter, die mit Laserscanner und Kamera arbeiten. Musste man früher noch künstliche Reflektoren aufstellen, um Richtung, Entfernung und Höhe eines Ziels zu messen, erkennen die Geräte heute auch natürliche Ziele, beispielsweise Steine oder Baumstümpfe. Der Tachymeter zeichnet die Struktur etwa eines Felsens auf, vermisst diese regelmäßig neu und registriert dabei Veränderungen. „Wenn wir keine Reflektoren aufstellen müssen, sparen wir erneut Geld“, sagt Thomas Wunderlich vom TUM-Lehrstuhl für Geodäsie. „Und wir müssen nicht fürchten, dass sie von weidenden Kühen umgerannt werden.“

Mit diesen drei Komponenten knüpfen die Wissenschaftler ein dichtes Netz an Beobachtungspunkten über den Hang. Zusammengeführt werden die Daten in einer zentralen Datenbank. Das Gehirn des Systems wertet die Informationen zusammen mit weiteren Kennziffern aus, vor allem mit Wetterdaten. Dreieinhalb Jahre lang haben die Forscher ihre Entwicklung auf dem Sudelfeld im oberbayerischen Oberaudorf getestet. Dort bewegt sich eine Bergflanke und bedroht mehrere Almen und eine Bundesstraße. „Die Datenreihen zeigen uns eindrucksvoll, was der Hang durchlebt, wie sich Niederschlag und Frost bemerkbar machen, was mechanisch vor sich geht“, sagt Thuro. „Wir verstehen jetzt viel mehr von dieser Bewegung.“ Mehr noch: Die Auswertung der Daten ermöglicht sogar Frühwarnungen, bevor der Hang sich überhaupt bewegt hat. „Weil wir nun wissen, wie sich dort Regenfälle auswirken, konnten wir einen Grenzwert festlegen“, erklärt Thuro. Überschreitet der Grundwasserdruck einen bestimmten Wert, schlägt das System Alarm. „Dann gibt es noch circa zweieinhalb Tage Zeit zwischen dem Anstieg des Pegels und einer Hangbewegung.“

Einen anderen Weg geht das interdisziplinäre Projekt KASIP (Knowledge-based Alarm System with Identified Deformation Predictor): „Die Installation von Sensoren in hochaktiven Zonen des Berges ist sehr gefährlich“, erklärt Andreas Eichhorn von der Technischen Universität Darmstadt. „Wir haben nach einem Verfahren gesucht, das unter anderem eine berührungslose Beobachtung möglich macht.“ Beim Test mehrerer Methoden kamen die Forscher auf die Idee, gefährdete Hänge mit Mikroradar zu durchleuchten. Diese werden zwar schon länger bei der Vermessung eingesetzt, nicht aber für die Überwachung von Hängen. Dabei wird ein Hang auf ganzer Fläche mit Mikrowellen bestrahlt, die von der Oberfläche zurückgeworfen werden und dann analysiert werden können. Entsprechende Auswerte-Algorithmen rechnen dabei meteorologische Störeinflüsse heraus und erzeugen aussagekräftige 3D-Bilder des Hangs.

Auf diese Weise können die Wissenschaftler selbst Bewegungen im Millimeterbereich noch registrieren. Anhäufungen oder Abtragungen von Felsmaterial oder auch der Beginn einer größeren Rutschung können so erfasst werden. Das zeigte Anfang 2014 ein Pilotprojekt am Hang Steinlehnen in Nordtirol, an dem sich zuletzt 2003 ein Felssturz ereignete. Allerdings: Die Mikrowellen-Radargeräte sind noch sehr teuer.

Dennoch sind die Forscher zuversichtlich, dass das Verfahren großes Potenzial für ein gutes Frühwarnsystem hat: „Wenn man kritische Hänge damit beobachten würde, könnte man zuverlässig feststellen, wo gerade etwas geschieht“, sagt Eichhorn. „Dort könnte man dann gezielt günstigere Messsysteme mit ihren Sensoren zum Einsatz bringen.“

---

## **Düstere Aussichten: Erdrutsche, Bevölkerungswachstum und der Klimawandel**

Wie nötig Forschung und Frühwarnsysteme sind, 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 meiden. 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 durch Erdrutsche gefährdeten Menschen steigt weiter an, auch das Klima könnte künftig solche Naturkatastrophen begünstigen. Denn weil wärmere Luft mehr Feuchtigkeit speichern kann, wächst mit den steigenden Temperaturen der Atmosphäre in vielen Regionen auch die Wahrscheinlichkeit für Starkregen. Während des El Niño-Phänomens häufen sich beispielsweise in Kalifornien und in anderen Gebieten entlang der nord- und mittelamerikanischen Westküste regelmäßig sintflutartige Regenfälle. In der Folge kommt es auch zu ungewöhnliche viele Erdrutschen. Extrem fiel dies im starken El Niño-Jahr 1997 aus: Damals gab es entlang der kalifornischen Küstenkette von Big Sur bis Mendocino eine unglaubliche Zahl an Schlamm- und Gerölllawinen. 18.000 dieser Extremereignisse sollen damals in kürzester Zeit aufgetreten sein. Durch den Klimawandel könnten solche Extreme in vielen Gebieten zur Normalität werden – auch ohne einen EL Niño.

Und noch einen Effekt hat der Klimawandel: Die wärmeren Winter unter anderem in Mitteleuropa lassen auch die höheren Lagen der Gebirge tauen. So wird sich die Grenze des dauerhaft gefrorenen Bo-

dens 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 bindender 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 Erwärmung der Atmosphäre verursacht wird.

Nadja Podbregar

Plötzlich ist die Bergidylle zerstört: Wo vorher noch eine stille Schneelandschaft war, stürzt donnernd und tobend eine Schneemasse zu Tal. Für Flucht ist es jetzt meist zu spät, der überraschte Skifahrer oder Bergwanderer wird von der Lawine erfasst und mitgerissen. Löst sich die Schneemasse oberhalb einer Ortschaft, kann auch sie verschüttet werden. Jedes Jahr werden Hunderte von Menschen Opfer von Lawinen. Unter allen tödlichen Unfällen, die sich in den Bergen ereignen, ist die Hälfte auf Lawinen zurückzuführen. Ob sich eine Lawine löst und was für eine, wird durch das Zusammenwirken mehrere Faktoren bestimmt. Ist es aber soweit, dann zählt für die Verschütteten jede Minute.

---

## Mount Everest: tödliche Schneemassen aus dem Nichts

18. April 2014, Basislager des Mount Everest. Noch hat die Bergsteigersaison am höchsten Gipfel der Erde nicht angefangen. Doch schon jetzt bereiten sich Sherpas darauf vor, die Routen zum Gipfel zu prüfen und neu zu präparieren. An diesem Freitag scheinen die Bedingungen dafür optimal: strahlender Sonnenschein, blauer Himmel. Kurz nach Tagesanbruch macht sich eine Gruppe von Sherpas daher auf den Weg aus dem Basislager hinauf in den Hang, um die klassische South Col Route anzugehen, der schon Edmund Hillary im Jahr 1953 folgte. Sie wollen die Seile sichern und erneuern, die später hunderten von Bergsteigern unter anderem beim Überqueren des tückischen Khumbu-Eisfalls Halt geben sollen.

Um 06:45 Uhr Ortszeit haben einige Sherpas gerade das Popcorn Field getaufte Eisfeld auf 6400 Metern Höhe erreicht, als es passiert: Am Hang über ihnen löst sich eine Lawine. Die Schneemassen rasen den Hang hinunter und erfassen die nepalesischen Sherpas so schnell, dass diese keine Chance zur Flucht mehr haben. „Es kam aus dem Nichts, dieser große Block aus Eis, der von oben herabfiel“, schildert später einer der Überlebenden die Katastrophe. „Wir wollten wegrennen, aber konnten nicht.“ Die Lawine verschüttet 25 Sherpas, für zwölf kommt jede Hilfe zu spät, sie können nur noch tot geborgen werden. Rund 100 weitere Bergführer sitzen oberhalb des Lawinengebiets fest, ihnen ist der Weg zurück ins Basislager abgeschnitten. Das Lawinenunglück ist damit das schwerste der gesamten neueren Geschichte am Mount Everest.

Aber nicht nur im Himalaya, auch in den Alpen und zahlreichen anderen Gebirgen kostet der „weiße Tod“ jedes Jahr Hunderte von Menschen das Leben, die meisten von ihnen Skifahrer oder Bergsteiger. Jährlich gehen weltweit etwa 25.000 größere Lawinen zu Tal, ungezählte kleinere bleiben weitgehend unbemerkt. Die meisten von ihnen verlaufen ohne jeden Schaden für Menschen oder Siedlungen. Doch durch den Tourismus und die zunehmende Besiedlung lawinengefährdeter Regionen und Hänge kommt es immer häufiger zu Lawinenunglücken, bei denen Menschen sterben und Ortschaften verschüttet werden. Unter allen tödlichen Unfällen, die sich in den Bergen ereignen, ist heute die Hälfte auf Lawinen zurückzuführen.

---

## Ursachen: Wie 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. Die Lawinengefahr steigt mit zunehmender Hangneigung. Als besonders kritisch gelten Neigungen zwischen 35 und



Abbruchstelle einer Lawine am Mount Iliamna in Alaska (© AVO/USGS/Game McGimsey)

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.

Ein entscheidender Faktor aber ist die Schneebeschaffenheit. Denn von dem Moment an, in dem eine Schneeflocke den Boden berührt, ist sie ständig Veränderungen unterworfen. Wind, Sonne, Regen, Druck und Temperatur – alle diese Faktoren wirken auf sie ein. Je länger sie schon am Boden liegt und je tiefer die Schicht, in der sie sich befindet, desto stärker sind die Umwandlungen. In frischem Pulverschnee, wie er bei Temperaturen weit unter dem Nullpunkt fällt, haben die Schneekristalle die Form filigraner sechsarmiger Sternchen. Durch die vielen Zwischen-



räume der langen Strahlen ist dieser Schnee sehr locker und enthält viel Luft, er wiegt nur etwa 100 Kilogramm pro Kubikmeter. Die feinstrahligen Verästelungen verschwinden jedoch sehr schnell. Selbst wenn die Temperaturen gleichmäßig kalt bleiben, entstehen durch Verdunstung von Wasser aus tieferen Schneelagen und Wiedergefrieren dieses Wassers neue Kristalle, die Strahlen verbreitern sich, an den Verästelungen bilden sich die ersten rundlichen Schneekörner.

Je älter der Schnee wird, desto mehr schreitet die Körnerbildung fort. Schmelzen und Gefrieren wechseln sich ständig ab, Wasserdampf und Schmelzwasser bilden sich. Die Schneekristalle werden runder und verschmelzen teilweise miteinander, die Hohlräume verkleinern sich. Der Schnee wird immer feuchter und schwerer, sein Gewicht kann bis zu 500 Kilogramm pro Kubikmeter betragen. Dieser Festschnee nimmt mit zunehmender Körnergröße und Nässe an Beweglichkeit zu und kann zum Ausgangsmaterial für Festschneelawinen werden. Noch lawinengefährlicher ist aber der sogenannte Schwimmschnee. Er entsteht, wenn Wasserdampf aus bodennahen, wärmeren Schneeschichten nach oben steigt und in der darüber liegenden Schicht erneut gefriert. Dabei bilden sich große becherförmige Kristalle, die durch ihre Hohlform extrem instabil sind. Wird nun die Schneedecke über dem Schwimmschnee plötzlich schwerer, wird es gefährlich: Die gesamte schwache Schicht kann großflächig zusammenbrechen und wirkt dann wie eine Gleitflüssigkeit für darüber liegende Schneeschichten. Die Folge: Ein ganzes Schneebrett löst sich.

Besonders kritisch ist daher immer der erste schöne Tag nach einer Schlechtwetterperiode. Das Gewicht des frischen Neuschnees kann für die 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. Aber auch kleine zusätzliche Belastungen, zum Beispiel das Gewicht eines einzelnen Wintersportlers, können ausreichen, um das Gleichgewicht zu zerstören und eine Lawine auszulösen. Tiefe Temperaturen nach Schneefällen verzögern die Verfestigung der Schneedecke und erhöhen dadurch ebenfalls 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.

Wenn bei Schneefällen Wind herrscht, wird der Schnee aufgewirbelt und in Windschattenhängen abgelagert. Solche so genannten Trieb-schneeansammlungen 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. Ebenfalls kritisch wird es, wenn auf einer sehr kalten Schneeoberfläche feuchte Luft zu Reif gefriert und darauf wieder Schnee fällt. Diese nur millimeterdünne, extrem brüchige und glatte Schicht ist in einem Schneeprofil kaum sichtbar, kann aber für den darüber liegenden Schnee zur Rutschbahn werden.

---

## **Lawinenarten: von rasend schnell bis langsam kriechend**

Eine Lawine kann mit 140 Stundenkilometern ins Tal donnern oder mit nur wenigen Millimetern pro Tag bergab kriechen – beide Extreme entwickeln Kräfte, die Bäume entwurzeln, Felsblöcke aus dem Boden wuchten und Hütten zermalmen können. Welche Lawinenart sich entwickelt, ist vor allem von der Schnee- und Geländebeschaffenheit und dem Wetter abhängig. Bei der Klassifizierung spielen außerdem die Form der Abbruchkante und der Bahn und die Art, wie sich die Lawine bewegt, eine Rolle. Die am häufigsten vorkommenden und am besten untersuchten Lawinen gehören zu den Fließlawinen. Bei ihnen strömt nasser oder trockener Schnee den Hang hinunter und behält dabei den Kontakt zum Boden („Grundlawine“) oder der Gleitschicht („Oberlawine“).

Besonders gefährlich ist dabei die Schneebrettlawine, eine Variante der Fließlawinen: Innerhalb weniger Sekunden rutscht durch Zunahme der Belastung oder durch Abnahme der Festigkeit eine ganze Schneeschicht gleichzeitig ab. Während andere Lawinenarten oft unterhalb oder in einer Störungsstelle, zum Beispiel der Spur eines Skifahrers, entstehen, bricht eine Schneebrettlawine meist oberhalb der Spur ab. Die Abbruchkante ist dabei typischerweise breit, scharfkantig und senkrecht zum Gleitwinkel des Schneebretts. Skifahrer werden augenblicklich erfasst und meist vollständig verschüttet. Eine solche Schneebrettlawine donnert mit einer Geschwindigkeit von acht bis zehn Metern in der Sekunde zu Tal und kann dabei einen Druck von 30 bis 40 Tonnen pro

Quadratmeter entwickeln. In Extremfällen wurden auch schon Werte von 100 Tonnen pro Quadratmeter gemessen. Zum Zerschlagen einer Ziegelsteinmauer genügt bereits ein Druck von einer halben Tonne pro Quadratmeter.

Weitaus seltener, und für die Lawinenforscher deshalb nur schwer einzuschätzen, sind Staublawinen. Eine solche Lawine beginnt als Fließlawine mit trockenem, wenig verfestigtem Schnee oder als Eislawine von einem Gletscher. Im Gegensatz zu Schneebrettlawinen ist die Anriss-Stelle der Staublawine punktförmig, erst im Laufe ihres Weges bergab vergrößert sie sich. Durch Luftturbulenzen an der Lawinenspitze wird der Schnee aufgewirbelt und fein zerstäubt. Immer mehr Schnee und Luft werden aus der Umgebung in diese Schneewolke hineingezogen, die Lawine wächst schnell zu Höhen bis zu 100 Metern an. Ihre Dichte liegt nur bei fünf bis zehn Kilogramm pro Kubikmeter, der Druck nur bei vergleichsweise geringen drei bis vier Tonnen pro Quadratmeter. Aber in Verbindung mit der extrem hohen Geschwindigkeit von 50 bis 100 Metern pro Sekunde reicht das vollkommen aus, um Siedlungen kurz und klein zu schlagen und ganze Wälder umzumähen. Menschen und Tiere können in dem mit Staudrücken von bis zu drei Atmosphären umherwirbelnden Schneestaub regelrecht ertrinken, die Lungen irreparabel geschädigt werden.

In einer Schneedecke auf geneigtem Hang findet nicht nur eine langsame Umwandlung der Schneekristalle statt, die Schneeschichten bewegen sich auch langsam hangabwärts: Der Schnee kriecht. Diese Bewegung ist mit nur einem bis dreißig Millimeter am Tag extrem langsam. Dennoch steht die Zerstörungskraft dieser „Zeitlupenlawine“ den „normalen“ Lawinen kaum nach. Kriechschnee kann Bäume entwurzeln und ganze Felsblöcke aus dem Boden wuchten, sogar massive Gebäude wurden schon von der Kraft des Schnees von ihren Fundamenten gedrückt und zerstört.

---

## **Lawinenforschung: Blick in die Feinheiten des Schnees**

„Der aktuelle Lawinenlagebericht – täglich um 8:00 Uhr neu ...“, „Die aktuelle Lawinensituation für den bayrischen Alpenraum ...“. Pünktlich zu Beginn der Wintersportsaison beginnt in den Alpenländern auch

für die Schnee- und Lawinenforscher die Hochsaison. Täglich werden aktuelle Lageberichte zur Lawinengefahr in Fernsehen, Rundfunk und im Internet veröffentlicht, Lawinenwarndienste und Bergungstrupps sind in ständiger Bereitschaft. Für die Schneebeobachter und Lawinenforscher des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung in Davos (SLF) beginnt der Tag im Winter bereits in den frühen Morgenstunden: Der Zustand des Schnees wird begutachtet, die Daten von Messstationen gesammelt und ausgewertet. Die enorme Datenflut, die aus solchen Messnetzen anfällt, lässt sich ohne die Hilfe von Computern nicht mehr verarbeiten und interpretieren. Wenn früher Lawinenexperten noch aus ihrer oft langjährigen Erfahrung schöpfen konnten und schon nach einem Blick auf die Daten eine erste Einschätzung zur Lawinewahrscheinlichkeit geben konnten, helfen den Wissenschaftlern heute aufwendige Prozess- und Prognosemodelle.

Doch auch wenn die unmittelbaren Risikofaktoren inzwischen gut bekannt sind, noch sind längst nicht alle Prozesse aufgeklärt, die sich im Inneren einer Lawine oder bei ihrer Auslösung abspielen. Lawinenforscher nutzen daher sowohl Experimente als auch Computermodelle, um ihr Wissen zu erweitern – denn dies kann dabei helfen, die Lawinenprognosen genauer zu machen. Um mehr über das „Innenleben“ des Schnees zu erfahren, analysieren die Forscher Schneeproben unter anderem mit speziellen Tomografen. Aus den dabei entstehenden 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 Kanton Wallis, in der sehr große Lawinen künstlich ausgelöst und ganz genau vermessen werden können. Die Forscher überwachen die Lawine von einem Bunker aus, der etwas erhöht am Gegenhang steht – bei besonders großen Versuchslawinen müssen die Beobachter von ihren Kollegen anschließend ausgegraben werden. Leider sind Versuche 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 dann 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 belegen, dass im Lawinenschutz in den letzten fünfzig Jahren große Fortschritte erzielt wurden: So verloren beispielsweise noch 1951 fast hundert 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 Lawinenforscher 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 Schneevalgen – mit dem Schnee zurechtkommen.

---

## **Schadensbegrenzung: Bollwerke 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 ausgebaute Zufahrtsstraßen und Bahnlinien noch in die entlegenste Bergregion. Jahrhundertlang haben die Bergbewohner mit der 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 jedoch 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 einem 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 Waldgebiete



Lawinenbremsbauwerk oberhalb von Mühlau in Innsbruck, diese Konstruktion soll verhindern, dass Lawinen den Flusslauf hinunter rasen (© Hafelekar/CC-by-sa 3.0)

ten nieder, können sie auch dort erhebliche 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 Gefahrenzonenplänen erfasst. Der Neubau in diesen Zonen ist verboten. Die bereits bestehenden Siedlungen und Gebäude sind jedoch 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 aufwendige Lawinenschutzmaßnahmen sind allerdings hoch: Allein in der Schweiz wurde seit 1950 mehr als eine Milliarde Franken für Lawinenschutzmaßnahmen ausgegeben. Auch aus diesem Grund setzt man heute wieder verstärkt auf natürlichen Lawinenschutz durch Bergwälder. 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 müssen auch bis zu einem gewissen Alter durch zusätzliche Schutzbauten vor Kriechschnee und Lawinen geschützt werden.



Zusätzlich zu den langfristigen Lawinenschutzmaßnahmen geben Lawinenwarndienste während der Wintersaison mehrmals täglich aktuelle Lawinenbulletins und -warnungen heraus. Messstationen überwachen kontinuierlich die Wetter- und Schneebedingungen an ausgewählten Standorten und ermöglichen so den Schnee- und Lawinenforschern eine Einschätzung der Lawinengefahr. Aber trotz aller Warnsysteme und Schutzmaßnahmen: Ganz verhindern lassen sich Lawinen nicht, sie gehören zur Bergwelt dazu – zumindest solange es dort Schnee gibt.

---

## **Lawinenrettung: Der Tod wartet nur 15 Minuten**

Was aber, wenn sich eine Lawine löst? Was kann man dann noch tun? 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. Wenn das Lawinopfer vollkommen von den Schneemassen verschüttet ist, läuft die Zeit. Denn sehr schnell wird der Sauerstoff knapp. Hat ein Verschütteter keine luftgefüllte Atemhöhle unter dem Schnee, stirbt er meist schon nach 15 bis 35 Minuten – er erstickt. Mit einem rettenden Luftraum im Schnee kann man zwar bis zu 90 Minuten in der Lawine überleben, kommt dann aber keine Hilfe, führen Sauerstoffmangel und Unterkühlung meist zum Tod. Nur mit sehr großen Atemhöhlen oder einer Luftverbindung nach außen sind auch längere Überlebenszeiten möglich. Statistiken des Eidgenössischen Instituts 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-Sauerstoff-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 Schneemasse.

Weitaus 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 Schweizer Lawinenforschungsinstituts in Davos (SLF): 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. Auch die Lawinenrettungstrupps 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 daher 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 solange fortgesetzt, bis der Rettungshubschrauber oder ein Motorschlitten den Verletzten ins nächste Krankenhaus bringt.

---

# Feuriges Inferno – Wald- und Buschbrände

# 10

Nadja Podbregar

Lodernde Flammen, gewaltige Hitze, Qualm, der einem den Atem nimmt und die Augen tränen lässt: Waldbrände sind ebenso unberechenbar wie zerstörerisch. In kurzer Zeit können sie ganze Landstriche entwalden, Ortschaften abbrennen und alles mit einer dichten Glocke aus Rauch und Smog überziehen. Verheerende Feuer sind dabei keine Domäne trockener Gebiete wie dem australischen Outback, auch im Regenwald Südostasiens oder in der Taiga des hohen Nordens können Brände ausbrechen – und tun dies immer häufiger. Ein Grund dafür: Der Klimawandel bringt Hitze und Dürre zunehmend dorthin, wo früher genügend Regenfälle die Gefahr gebannt haben. Die unberechenbaren Naturkatastrophen bringen aber nicht nur Zerstörung, für die Natur sind sie auch eine Chance zur Verjüngung und zum Neuanfang.

---

## Australien: Feuer im Outback

Wald- und Buschbrände haben in Australien eine lange Tradition. Jahrhundertlang 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 inzwischen gehört das Land „Down under“ zu den Regionen weltweit, die am häufigsten und am heftigsten unter unkontrollierten, gefährlichen Wald-



Bedrohlich nah an bebautem Gebiet: Buschfeuer in Queensland, Australien (© Thin-boyfatter/CC-by-sa 3.0)

bränden zu leiden haben – zahlreiche Todesopfer und zerstörte Natur inklusive.

So wie im Februar 1983, als in Südastralien 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 Sydney 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 feuererprobten 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 Grad Celsius und einer extre-

men 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.

Aber auch die Vegetation trägt dazu bei, die Waldbrände weiter anzufachen. Gerade die Eukalyptusbäume sind besonders reich an Harz und ätherischen Ölen und daher leicht entflammbar. Hinzu kommt, dass die Bäume ihre Borke abwerfen und diese sich als Brennmaterial am Waldboden ansammelt. 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-Brände entfachen. Dadurch breiten 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.

Zu einer Gefahr werden unkontrollierte Brände aber 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 2500 Häuser und 440 Appartements. Die Schäden lagen bei 1,5 Milliarden US-Dollar. Das „Jahrhundertfeuer“ in Australien 2009 machte 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, 1800 Häuser lagen in Schutt und Asche, die Sachschäden gingen in die Milliarden. Die „Black-Saturday-Bushfires“ gingen als die bisher schlimmste Brandkatastrophe Australiens in die Annalen ein.

## Russland: Torf und Taiga in Flammen

Eine Katastrophe ähnlichen Ausmaßes erlebte im Sommer 2010 Russland. Sie begann Ende Mai mit einer über Wochen anhaltenden Hitzewelle in weiten Teilen des Landes. Ein stabiles Hochdruckgebiet zog stetig warme Luft aus dem Süden heran. Regen blieb aus und das Thermometer kletterte bis auf über 40 °C selbst in normalerweise kühleren Taigagebieten. Mitte Juli fielen vielerorts reihenweise die Hitzerekorde, in Moskau stiegen die Durchschnittstemperaturen für den Monat Juli auf über 40 °C. Solche Werte waren in dieser Region seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im 19. Jahrhundert noch niemals erreicht worden. Und auch bis in den August hinein ließen Dürre und Hitze nicht nach. Das hatte Folgen: Ab Ende Juli brachen in immer mehr Gebieten Wald- und Torffeuere aus. Den Anfang machten Torfbrände in der Region Nischni Nowgorod, wo Wind und Dürre dafür sorgten, dass sich die Feuer mit bis zu 100 Metern pro Sekunden ausbreiteten.

Wenig später begann es auch in der Umgebung von Moskau zu brennen. Hier waren in den 1980er Jahren gewaltige Moorflächen trockengelegt worden, um Raum für Felder und Forste zu schaffen. Diese wurden jedoch nach Ende der Sowjetzeit kaum mehr bewirtschaftet, als Folge blieben dürre Bäume und andere abgestorbene Pflanzenreste stehen oder liegen. Sie aber boten den Bränden einen leichten Ansatzpunkt. Im unter dem Wald liegenden, trockenen Torf fand das Feuer zudem ergiebige Nahrung. Insgesamt registrierten die Behörden während des Sommers mehr als 1000 Brandherde in trockengelegten Torfgebieten.

Solche Torfbrände aber sind doppelt gefährlich: Zum einen setzen sie gigantische Mengen von schädlichen Gasen und Schwebeteilchen frei. Vor allem Kohlendioxid und das giftige Kohlenmonoxid, aber auch Ruß überzogen schnell die gesamte Region Moskau mit einer dichten Smogdecke. Die Sichtweiten sanken bis auf unter 50 Meter, in der Stadt Moskau warnten die Behörden die Bevölkerung davor, ihre Häuser zu verlassen. Die Kohlenmonoxid-Werte erreichten gesundheitsgefährdende Ausmaße. Zum anderen aber breiten sich Torfbrände unterirdisch weiter aus und sind daher nur schwer zu löschen. Das Feuer frisst sich durch die trockenen Torfschichten und kann Monate, manchmal sogar Jahre weiter schwelen. Ein Moor in Südafrika beispielsweise brennt auf diese Weise

bereits seit Jahren. Und auch in Russland schwelten die Brände in den Torfgebieten selbst im Winter 2010 noch weiter – trotz Kälte und Schnee.

Aber auch Wälder brannten: Mehr als 30.000 Brandherde, verteilt über fast das gesamte Land, waren es insgesamt. Betroffen waren auch 60 Biosphärenreservate und Naturparks. Besonders heikel aber: Die Feuer breiten sich auch im nahen Umfeld gleich mehrerer Atomanlagen und in radioaktiv verseuchten Gebieten aus. Als Folge schleuderten die Flammen nicht nur Rauch und Gase in die Luft, mit ihnen wurden auch radioaktive Substanzen freigesetzt und mit dem Wind verteilt. Das Problem dabei: Die durch Wind und Dürre angeheizten Feuerstürme waren vom Boden aus kaum zu bekämpfen. Obwohl zeitweilig bis zu 240.000 Feuerwehrleute und 2000 Soldaten im Einsatz waren, ließen sich die Flammen kaum eindämmen. Am effektivsten waren noch Löschflugzeuge, von denen hatte Russland aber nur 25 einsatzbereit. Zum Vergleich: In den USA gibt es mindestens 100 davon.

Trotz aller Bemühungen brannten im Sommer 2010 zeitweise mehr als 188.000 Hektar Wald und Torf. Bis Ende August hatten die Brände mehr als 50 Todesopfer gefordert, die Getreideernte war durch Dürre und Feuer so dezimiert, dass die russische Regierung für fast ein Jahr ein Exportverbot für Getreide aussprach. Präsident Dmitri Medwedew verhängte über sieben Regionen zeitweilig den Notstand. Am 7. August erklärte er in einer Fernsehansprache: „Praktisch alles brennt. Das Wetter ist anormal heiß. Was mit dem Klima gerade passiert, muss ein Weckruf für uns alle sein . . . energischere Maßnahmen gegen die globalen Veränderungen des Klimas zu unternehmen.“

---

## **Ursachenforschung: Zufall oder Klimawandel?**

Aber war es wirklich der Klimawandel? Oder doch nur ein ungünstliches Zusammentreffen ungünstiger Umstände? Nach Ende der Brandperiode in Russland untersuchten diese Frage gleich mehrere Forscherteams. So kamen Stefan Rahmstorf und sein Kollege Dim Coumou vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung im Jahr 2011 zu dem Schluss, dass das anhaltende Hochdruckgebiet über Russland und die damit verbundene Hitzewelle kein Zufall gewesen ist. In Russland sind die Sommertemperaturen in den letzten 30 Jahren um rund zwei Grad Celsius gestie-

gen, im globalen Durchschnitt dagegen nur um rund 0,5 Grad, ermittelten die Forscher. Diese Erwärmung erhöhte die Wahrscheinlichkeit für neue Hitzerekorde um 50 Prozent. Der Rekordsommer sei damit fast schon vorhersehbar gewesen, so die Wissenschaftler. Denn bei steigenden Durchschnittstemperaturen verschiebt sich der gesamte Komplex der natürlichen Schwankungen in den wärmeren Bereich – Rekordwerte inklusive.

Ein weiteres Argument für eine Mitschuld des Klimawandels lieferten Forscher der NASA. Sie hatten in Vergleichsstudien festgestellt, dass Wald- und Torfbrände vor allem in den höheren nördlichen Breiten auffallend stark zugenommen haben. Der Grund: Die globale Erwärmung macht sich im hohen Norden überproportional stark bemerkbar, die Temperaturen steigen hier schneller als im Weltdurchschnitt, die Niederschläge nehmen ab. Das macht die Nadelwald- und Torfgebiete besonders anfällig für Brände. „Wir sehen bereits die beginnenden Zeichen des Klimawandels und Feuer sind ein Teil davon“, erklärt Amber Soja vom National Institute of Aerospace (NIA) in Hampton.

Aber auch auf der Südhalbkugel macht sich der Klimawandel bemerkbar, denn auch in Australien wird es in einige Regionen zunehmend heißer und trockener. So gehen Klimaforscher für Sydney beispielsweise von einem Temperaturanstieg von 4,8° Celsius bis zum Jahr 2070 aus. Das aber wirkt sich auch auf das Risiko von Buschfeuern aus: „Der Klimawandel, das Wetter und die Trockenheit verändern die Art, die Stärke und die Dauer von Waldbränden“, erklärt Gary Morgan, Leiter des Bush-fire Cooperative Research Center in Melbourne. Neben Dürre und Hitze tragen dabei auch zunehmende Stürme dazu bei, die alljährlich auftretenden Buschfeuer kräftig anzufachen und stärker als bisher auch in dichter besiedelte Gebiete zu treiben. Studien des australischen Bureau of Meteorology 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 könnte.

Sichtbar wird der anheizende Effekt des Klimas auf die Waldbrände auch vor unserer Haustür, im Mittelmeerraum. In Spanien hat sich die Zahl der Waldbrände seit den 1960er Jahren verzehnfacht. Portugal gilt als eines der feuergefährdetsten Länder des Mittelmeerraums. Forscher gehen davon aus, dass sich im südlichen Mittelmeerraum der Zeitraum, in dem die höchste Alarmstufe für Waldbrände gilt, durch die

Klimaerwärmung erheblich verlängert. Allerdings: Gerade in Südeuropa ist das Klima nicht der einzige Schuldige. Auch die durch Landflucht und Wirtschaftskrise veränderte Landnutzung trägt dazu bei. So werden viele Felder nicht mehr bewirtschaftet und liegen brach. „Das Land liegt dadurch brach und wächst zu – es verbuscht“, erklärt Johann Goldammer von der Arbeitsgruppe Feuerökologie am Max-Planck-Institut für Chemie. Zudem gibt es in den nicht bewirtschafteten Wäldern mehr brennbares Material und Feuer brechen so leichter aus und lodern dann auch heißer.

Aber Hitze allein macht noch kein Feuer – irgendwo muss auch der buchstäblich zündende Funke herkommen. Entgegen landläufiger Annahme haben die allermeisten Brände keinen natürlichen Auslöser. Forscher schätzen, dass nur rund vier Prozent aller Brände durch Blitze verursacht werden, der Rest geht auf das Konto von bewusster Brandstiftung oder nachlässigen Touristen und Einheimischen. Manchmal reicht schon eine weggeworfene Zigarette oder ein nicht richtig gelöschter Grill, um das Inferno in Gang zu setzen.

---

## **Feuer mit Absicht: Brände als Mittel der Landschaftsgestaltung**

Wenn das Feuer für eine Region charakteristisch ist, dann für die afrikanische Savanne. Diese Gebiete der Tropen und Subtropen sind die größten Vegetationsflächen, in denen es regelmäßig brennt. Weltweit umfasst diese Landschaftszone ungefähr 2,6 Milliarden Hektar, die in einem Intervall von ein bis drei Jahren in Flammen gesetzt werden. Dabei werden die Brände als notwendiger Teil des natürlichen Lebenszyklus der afrikanischen Landschaft angesehen. Zahlreiche Savannen entstanden sogar erst durch die Eingriffe des Menschen. Da abgestorbene Pflanzen in der trockenen Savanne kaum verrotten können, sorgen erst regelmäßige Feuer für eine natürliche Auslese unter der Vegetation, verwandeln trockenes Gras und Gestrüpp in nährstoffreiche Asche und schaffen Platz für neue Pflanzen. Das Gras verbrennt, während die am Boden liegenden Samen und Wurzeln unversehrt bleiben. So werden mit der Zeit feuerempfindliche Pflanzen verdrängt und zurückbleibt nur die widerstandsfähige Vegetation.



Der Einsatz des Feuers als Mittel zur Brandrodung und somit zur Schaffung von freien Flächen zur Land- und Weidewirtschaft, ist in diesen Regionen immer noch weit verbreitet. Im Winter werden die Weiden regelmäßig abgebrannt, damit im Frühjahr saftiges Gras für die Rinder sprießt. Die Feuer dienen somit auch der Wild- und Haustierbewirtschaftung. Die Intervalle, in denen die Savanne in Flammen gesetzt wird, richten sich dabei nach deren Produktivität. Die westafrikanischen Feuchtsavannen brennen beispielsweise alle ein bis zwei Jahre. In dem Zeitraum hat die Grasschicht ein Auflagegewicht von fünf bis zehn Tonnen pro Hektar gebildet, die in der Trockenzeit verdorrt und abstirbt.

Die zweite Region, die eng mit Waldbränden verknüpft ist, sind die tropischen Regenwälder. Hier geht es allerdings weniger darum, die bestehende Landschaft zu pflegen und zu erhalten. Stattdessen soll das Feuer die Baumriesen beseitigen und neue Flächen für Plantagen und Weidewirtschaft schaffen. In Indonesien beispielsweise nutzen private Firmen die Brände, um den Wald in großem Maßstab für Ölpalmen- oder Papierholzplantagen zu roden. Die Fläche, die bei Brandrodungen in den Tropen insgesamt zerstört wird, umfasst eine Milliarde Hektar Land – Deutschland würde 30 Mal hineinpassen. In extremen Trockenzeiten, die durch das El Niño-Phänomen noch verstärkt werden können, kann es bei solchen Brandrodungen schnell zu unkontrollierten Flächenbränden kommen. 1997 bis 1998 wurden dadurch alleine in Indonesien ungefähr neun Millionen Hektar Regenwald zerstört. Besonders schwer betroffen waren nach monatelangen Bränden Borneo und Sumatra. Teile Indonesiens verschwanden im Rauch – sogar in Singapur herrschte Smog – die Menschen litten an Atemwegserkrankungen und die in den Regenwäldern beheimateten Orang-Utans wurden von den Flammen bedroht.

Aber auch ohne bewussten Einsatz von Feuer zur Landschaftsgestaltung werden Brände künftig das Gesicht zumindest einiger Regionen verändern, wie eine Studie im Jahr 2011 zeigte. Forscher um Monica Turner von der University of Wisconsin-Madison hatten für den Yellowstone-Park in den USA eine Feuervorhersage bis 2100 erstellt und untersucht, wie dies die Vegetation im Weltnaturerbe der UNESCO beeinflussen wird. Ihr Ergebnis: Bisher sind große Brände im stark bewaldeten Yellowstone-Gebiet eher selten. Spätestens ab Mitte des Jahrhunderts aber wird sich dies durch das zunehmend trockenere, wärmere Klima ändern. Dann sind große Feuer, die 200 Hektar Fläche auf einmal verbrennen, so-



Waldbrand im Yellowstone-Nationalpark im August 2013 (© National Incident Management Organization)

gar jährlich zu erwarten. Rund 100.000 Hektar Land könnten jedes Jahr Raub der Flammen werden. Statt 100 bis 300 Jahre dauert es dann nur noch 30 Jahre, bis der gesamte Boden dieses Gebiets einmal vollständig verbrannt ist. Insbesondere für die dominante Küstenkiefer ist dies zu wenig Zeit, um ihren Bestand zu regenerieren.

„Yellowstone wird dadurch nicht zerstört, aber die Brände werden unzweifelhaft zu einem großen Wandel in der Vegetation führen“, sagt Turner. Die bisher von Nadelbäumen dominierte Waldlandschaft wird dann von offenerem Bewuchs und Buschland abgelöst. Das aber beeinflusst auch die Tierwelt und das gesamte Ökosystem. „Uns hat an den Ergebnissen überrascht, wie schnell und umfassend die vorhergesagten Veränderungen durch Feuer im Yellowstone-Gebiet sind“, erklären die Forscher. Aber dieses ist nicht das einzige: Ihrer Ansicht nach könnte auch anderen subalpinen Wäldern weltweit ein ähnlicher Wandel bevorstehen.

## Lokales Ereignis – globale Folgen?

Wald- und Buschbrände haben aber nicht nur lokale Folgen, ihre Auswirkungen können sogar globale Ausmaße erreichen. Das gilt vor allem für die in Südostasien und im hohen Norden häufigen Torffeuer: Die Wälder in diesen Gebieten stehen meist auf einer Torfschicht, in der im Laufe der Jahrtausende Pflanzenreste zu einer dichten, kohlenstoffreichen Masse verdichtet sind. In den gesamten Tropen erstrecken sich überwaldete Torfgebiete über 30 bis 45 Millionen Hektar. Das macht die tropischen Torfgebiete zu einem der größten oberflächennahen Speicher für organischen Kohlenstoff. Dabei findet sich etwa die Hälfte dieser Torfgebiete in nur einem Land: Indonesien. Alleine der Kohlenstoffgehalt in den indonesischen Torfgebieten wird auf mehr als 50 Gigatonnen geschätzt. Solange diese Torfwälder naturbelassen bleiben, ist das kein Problem, denn der Untergrund ist meist zu feucht, um sich zu entzünden. Anders aber, wenn Entwässerung und Entwaldung sie austrocknen lassen. Dann können sich gewaltige Brände entwickeln – die ebenso gewaltige Mengen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> und anderer Gase freisetzen. Eine Studie deutscher Forscher ergab, dass allein im Jahr 2006 durch Torfbrände in Indonesien bis zu 900 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt wurden. Das ist mehr als die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands im selben Jahr – und entspricht etwa 16 Prozent aller Emissionen durch Entwaldung weltweit.

Neben Treibhausgasen befördert jeder Waldbrand auch eine große Menge an Aerosolen – winzigen Staub- und Rauchpartikeln – in die Atmosphäre. Dort aber entfalten diese Schwebeteilchen je nach Ausprägung und Begleitfaktoren unterschiedliche Klimawirkungen. Ihre wichtigste: Sie fördern die Wolkenbildung, indem sich an ihnen Wasserdampf der Luft niederschlägt und Tröpfchen bildet. Je nach Wolkentyp können diese das Sonnenlicht verstärkt reflektieren und so kühlend auf das Klima einwirken – oder aber wie ein Treibhaus wirken und das Abstrahlen der Hitze in den Weltraum verhindern. Das treibt die Temperaturen in Bodennähe hoch und verstärkt so die Klimaerwärmung. Als Wolkenkeime beeinflussen Schwebstoffe aus Bränden außerdem, wie viel Wasser am Ende in einer Wolke steckt und wie groß die einzelnen Wassertröpfchen innerhalb der Wolke werden. Beides entscheidet darüber, wann und

wo Niederschläge auftreten. Das macht Aerosole zu einem wesentlichen Faktor auch im Wasserhaushalt der Atmosphäre. Studien zeigen zudem, dass Ruß von Bränden, aber auch aus Abgasen, sich auf den Gletschern der Gebirge ablagert. Ihre Oberfläche wird dadurch dunkler und kann das Sonnenlicht weniger gut reflektieren. Als Folge absorbiert die Gletscheroberfläche mehr Wärme und das Abtauen beschleunigt sich. Für den Himalaya, aber auch für Gletscher der Alpen und der Arktis haben Forscher diesen Effekt inzwischen nachgewiesen.

---

## **Bekämpfung: warnen, finden, löschen**

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 andere Helfer, die Brandherde einzudämmen und eine weitere Ausbreitung der Flammen zu verhindern. Um gefährlichen 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 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 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 haftet. Aufgrund seiner hohen Zähigkeit fließt das Gel nur sehr lang-



US-„Firefighter“ im Einsatz bei einem Waldbrand in Kalifornien (© FEMA/Andrea Booher)

sam ab und bleibt deshalb länger löschwirksam. 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.

Um Brandherde gezielt bekämpfen zu können, müssen Löschflugzeuge allerdings präzise eingewiesen werden. Ein erprobtes Hilfsmittel hierfür sind satellitengestützte Infrarot-Kameras, weil das heiße Feuer im Infrarotbereich am intensivsten strahlt. Die Kameras messen die Wärmestrahlung und können so Brandherde lokalisieren. Zudem liefern sie hochaufgelöste Bilder. Allerdings können diese Bildaufnehmer bei starker Rauchentwicklung die Ausbruchsstellen nicht finden, da Infrarotstrahlen durch Partikel von Staub und Rauch zu stark gedämpft werden.

Eine Lösung dieses Problems entwickelten Forscher des Fraunhofer-Instituts für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR in Wachtberg im Jahr 2011: ein Radiometer, das Brände auch bei eingeschränkter Sicht überwachen kann. Der Prototyp eines radiometrischen Sensors arbeitet nicht im Infrarot-, sondern im Mikrowellenbereich zwischen 8 und 40 Gigahertz. Bei diesen niedrigen Frequenzen fällt die Streuung der Strahlen an Staubpartikeln deutlich geringer aus als bei den höheren Infrarotfrequenzen. „Partikel aus Staub und Rauch sind im Mikrowellenbereich quasi transparent“, erklärt Nora von Wahl vom FHR. Testflüge, bei dem Forscher ihren Prototyp an einem Zeppelin befestigten, waren erfolgreich: „Aus einer Höhe von 100 Metern konnten wir selbst bei eingeschränkten Sichtverhältnissen noch ein Feuer mit einer Fläche von fünf mal fünf Metern detektieren“, berichtet von Wahl. Mit dem Sensor sei man sogar in der Lage, Brandnester durch Blattwerk hindurch zu bestimmen.

Löschen ist gut, Feuer verhindern ist besser: Damit Feuerwehrleute, Löschschaum und Notfallflugzeuge gar nicht erst zum Einsatz kommen müssen, ist gute Vorbeugung nötig. Hauptmaßnahme dabei sind Früherkennung und eine Einschätzung des Waldbrandrisikos. In den USA erstellen die Forscher des Wildland Fire Assessment System für alle Bundesstaaten tagesaktuelle Karten des Waldbrandrisikos. Herzstück dieser

Gefahrenkarten sind die Vorhersagedaten von über 1500 Wetterstationen. Diese 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 auf einen fünfstufigen Gefahrenindex und geben diesen dann an die Öffentlichkeit weiter. Ähnliche Warnstufen gibt es aber auch in Deutschland: Wann und wo man im Wald als Spaziergänger oder Jogger besonders vor sichtig sein muss, darüber informiert in Deutschland der Deutsche Wetterdienst (DWD) jedes Jahr von März bis Oktober in seinem Waldbrandgefahrenindex. Darin sind Waldbrandgefahrenstufen von eins (niedrig) bis fünf (sehr hoch) für die einzelnen Bundesländer festgelegt. Bei der höchsten Gefahrenstufe dürfen die Wälder sogar gar nicht mehr betreten werden.

---

## Fluch und Segen für das Ökosystem

Die Auswirkungen von Waldbränden auf die Natur sind zwiespältig: Einerseits vernichten die schwer aufzuhaltenden Feuerwalzen Tausende von Hektar Wald- und Buschfläche – darunter auch allzu oft die ohnehin stark bedrohte einzigartige Tier- und Pflanzenwelt der tropischen Regenwälder. Andererseits sind Waldbrände nicht nur alles zerstörende Feuer, denn sie können auch neues Leben mit sich bringen. Schon nach kurzer Zeit erholt sich die Vegetation und erwacht zu neuem Leben. 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.

So gehören die nordamerikanischen Sequoia Mammutbäume sogar zu den Pflanzen, für die das Feuer lebensnotwendig ist: Sie benötigen es für ihre Fortpflanzung. Die Giganten unter den Bäumen warten sogar regelrecht auf die Flammen. Nur nach Durchzug eines Feuers und durch die nach oben steigende heiße Luft öffnen sich die Zapfen der manchmal über 100 Meter hohen Bäume. Dann können die Samen auf den durch mineralreiche Asche frisch gedüngten Boden fallen, einsinken und anfangen zu keimen. Zu Gute kommt den Mammutbäumen dabei auch, dass viele ihrer Konkurrenten nicht so feuerresistent wie sie sind und

verbrennen. So haben die riesigen Bäume genügend Platz und Licht für sich. 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.

Für ganz „normale“ Wälder kann ein Feuer aber ebenfalls positive Auswirkungen haben: 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. Die folgenden Pflanzengenerationen wachsen daher nach einem Brand im wahrsten Sinne des Wortes wie Phoenix aus der Asche. Feuerökologen haben das inzwischen erkannt. Nicht jeder kleine Waldbrand – vorausgesetzt es besteht keine Gefahr für Menschen – wird daher heute sofort gelöscht. Positiver Nebeneffekt dieser Strategie: Gibt es regelmäßig kleinere Brände, dann vernichten sie das brennbare Totholz am Waldboden. Beobachtungen zeigen, dass in Wäldern, in denen es regelmäßig brennt, seltener große Brandkatastrophen entstehen. Denn ein Waldbrand wird viel gefährlicher, wenn es schon lange Zeit nicht mehr gebrannt hat. Durch die reichliche Nahrung bleiben die Flammen dann nicht am Boden, sondern breiten sich bis in die Baumkronen aus. Die Flammen springen in so einem Fall von Krone zu Krone weiter und die Brände nehmen schnell riesige Dimensionen an.

Verlierer und Gewinner eines Waldbrands gibt es auch in der Tierwelt. Nicht alle Tiere können schnell genug vor den Feuerwalzen in Höhlen, Löcher oder unter Steine flüchten – vor allem viele Kleintiere werden getötet. Ungefähr 40 Insektenarten aber lieben das Feuer. Unter ihnen der australische Feuerkäfer, der durch seinen wärmeempfindlichen Sensor immer weiß, wo es gerade in der Umgebung brennt. Das Infrarot-Organ ist in der Lage, feuerbedingte Temperaturveränderungen noch über 60 Kilometer Entfernung hinweg zu orten. Reagiert der Sensor, macht sich der Käfer umgehend auf den Weg zu den Brandherden. Dort angekommen, paart er sich inmitten der verbrannten Vegetation. Nach der Paarung legt das Weibchen die Eier in die verbrannte Baumrinde und infiziert sie mit einem Pilz. Drei Wochen später ist die Rinde von Pilzhyphen



durchsetzt und genügend totes Pflanzenmaterial vorhanden – Nahrung für den Käfer-Nachwuchs. Die Vorliebe für verbranntes Holz hat dabei einen einfachen Grund: Die Larven des Käfers können nur in totem Holz wachsen, in lebendem Holz würden sie durch das Harz getötet und vom Holz zerquetscht.

Ähnlich auf das Feuer angewiesen ist auch der Schwarze Kiefernprachtkäfer, der unter anderem in den Kiefernwäldern Brandenburgs heimisch ist. Auch er paart und vermehrt sich nach Waldbränden. Für viele andere Tiere sind die Flammen aber auch gleichbedeutend mit einem Festmahl. In den Savannen Afrikas nutzen Störche und Greifvögel Brandzeiten zur Nahrungsaufnahme. Während die Störche die Feuerfront nach vom Rauch betäubten Insekten absuchen, kreisen die Greifvögel hoch über der Feuersbrunst, um nach panisch flüchtenden Tieren Ausschau zu halten und diese zu schlagen.

---

# Hurrikans, Taifune und Co – Tropische Wirbelstürme

11

Nadja Podbregar

Ob als Taifun, Zyklon oder Hurrikan – tropische Wirbelstürme gehören zu den gewaltigsten und zerstörerischsten Wetterphänomenen unserer Erde. Ihre gigantischen Wolkenwirbel können halbe Kontinente überspannen, die in ihrem Inneren tobenden Winde zerstören im Extremfall alles im Weg stehende und treiben gewaltige Fluten an die Küsten. Liegen dicht besiedelte und bebaute Küstengebiete auf dem Weg dieser rotierenden Stürme, ist die Katastrophe vorprogrammiert. Wie dramatisch die Folgen eines Wirbelsturms aussehen können, zeigten nicht zuletzt die Hurrikans Katrina im Jahr 2005 und Sandy im Jahr 2012. Solche Superstürme aber werden künftig immer häufiger werden – denn der Klimawandel schafft ihnen optimale Bedingungen.

---

## Hurrikan Sandy – der Supersturm

Mitte Oktober 2012. Über der westlichen Karibik braut sich ein Tiefdrucksystem zusammen, zunächst aber ohne sonderlich bedrohlich zu wirken. Das ändert sich schnell: Während das Tief langsam in Richtung Jamaika zieht, saugt es weitere vom Meer aufsteigende, warme, feuchte Luft auf. Das hat Folgen: Schon am 22. Oktober hat sich Tief „Sandy“ zu einem ausgewachsenen Tropensturm gemausert, am 24. Oktober wird es von den Meteorologen des US National Hurricane Center zum Hurrikan aufgewertet. Aus dem eher formlosen Tief ist ein Wirbelsturm, komplett mit Auge und spiraligen Wolkenbändern, geworden. Im Laufe des Tages kreuzt Sandy Jamaika und nimmt nun Kurs auf Kuba. In Vorbereitung auf den Wirbelsturm werden 340.000 Menschen evakuiert. Währenddes-

sen wächst Sandy weiter, bis zum Landfall in Kuba ist er zum Hurrikan der Kategorie 3 herangewachsen, in seinem Inneren herrschen Windgeschwindigkeiten von bis zu 185 Kilometern pro Stunde.

Nach der Passage Kubas scheint Sandy aber an Schwung zu verlieren. Die Wolkenwirbel werden diffuser, das Auge verschwindet sogar. Meteorologen stufen ihn daher wieder auf „nur“ noch Kategorie 1 hinunter. Doch Entwarnung gibt es nicht. Denn Sandy steuert nun weiter nach Nordosten, passiert die Bahamas und zieht ostwärts an Florida vorbei. Statt im Golf von Mexiko zu bleiben, wie viele seiner „Artgenossen“, bewegt sich Wirbelsturm Sandy in den Atlantik hinaus. Parallel zur US-Ostküste zieht er weiter nach Norden. Dabei aber dehnt er sich immer weiter aus. Zu diesem Zeitpunkt ist den Meteorologen bereits klar: Der Hurrikan wird höchstwahrscheinlich in der Gegend von New Jersey und New York City wieder auf die Küste zusteuern. Noch schlimmer: Auf seinem Weg nach Norden wird der Hurrikan einem Wintersturm begegnen und mit diesem verschmelzen. Dieser sogenannte Fujiwhara-Effekt, das wissen die Meteorologen, kann einen einzelnen Sturm enorm intensivieren und vergrößern.

Und genau so kommt es auch: Sandy vereinigt sich am 28. Oktober mit dem Wintersturm und wächst sich zu einem wahren Giganten aus: Sein Wolkenwirbel reicht nun von South Carolina im Süden bis zur kanadischen Grenze im Norden – er hat einen Durchmesser von mehr als 1850 Kilometern. Er ist damit schon jetzt einer der größten Wirbelstürme in der US-Geschichte. Unter seinem Wolkenschirm erreichen die Windgeschwindigkeiten immerhin noch bis zu 135 Kilometer in der Stunde. Noch bevor der Hurrikan auf Land trifft, haben die Gouverneure mehrerer voraussichtlich betroffener Gebiete den Notstand ausgerufen. Ab dem Nachmittag des 28. werden mehr als 5000 Flüge von und zur US-Ostküste abgesagt, das US-Eisenbahn-Unternehmen Amtrak stellt einige Zugverbindungen ein. Mehr als 45.000 Angehörige der US Air Force und der Nationalgarde werden in Alarmbereitschaft versetzt. In Washington DC schließen fast alle Behörden, öffentlichen Einrichtungen und Schulen, ebenso in anderen Ballungsräumen der US-Ostküste. In New York City werden 375.000 Bewohner niedrig gelegener Gebiete in Manhattan und Brooklyn vorsorglich evakuiert. Das gesamte öffentliche Leben ist nur auf eines konzentriert: Sich auf den kommenden Sturm vorzubereiten.



Wolkenwirbel des Hurrikans Sandy, aufgenommen am 30. Oktober 2013, während sich der Wirbelsturm die US-Ostküste hinaufbewegte (© NASA)

Am 29. Oktober gegen 08:00 Uhr Ortszeit ist es dann soweit: Nachdem seine Ausläufer bereits in South und North Carolina und Virginia überzogen haben, erreicht Sturm Sandy nun in New Jersey die Küste und wenig später die Millionenmetropole New York. Weil die von Sandy an die Küste gedrückten Wassermassen mit einer Springflut zusammentreffen, gibt es an der gesamten Küste Überschwemmungen und bis zu sieben Meter hohe Flutwellen. Wasser kommt aber auch von oben: Während des Hurrikans fallen stellenweise insgesamt 300 Liter Regen pro Quadratmeter. Die 50.000 Einwohner-Stadt Hoboken in New Jersey ist schnell zur Hälfte überflutet, in der Küstenstadt Atlantic City reißen Wind und Wasser die Strandpromenade auf 50 Metern Länge weg, auch hier steht das Wasser in den Straßen. Das Atomkraftwerk Oyster Creek in New Jersey muss wegen des steigenden Hochwassers Alarm auslösen. Das zwei Meter hoch stehende Wasser droht die Funktion der Kühlpumpen zu behindern, glücklicherweise geht alles gut.

In New York City werden tausende von Gebäuden und rund 250.000 Autos vom Sturm zerstört, 53 Menschen sterben. Die vom Hurrikan ausgelöste Sturmflut überschwemmt Teile Manhattans, reißt Stromleitungen ab, stürzt Bäume auf Straßen und Gleise und lässt die U-Bahn-Tunnel volllaufen. Durch die überlaufende Kanalisation mischt sich Abwasser mit dem vom Sturm in die Stadt getriebenen Meeres- und Regenwasser. Eine Explosion in einem Umspannwerk beschert 250.000 Menschen in der Stadt einen sofortigen Blackout. Im New Yorker Universitätskrankenhaus fallen die Notstromgeneratoren aus, Patienten müssen verlegt werden. Die New Yorker Börse bleibt zum ersten Mal in ihrer Geschichte zwei Tage in Folge geschlossen.

Als der Sturm dann Ende Oktober schließlich über dem Landesinneren der USA langsam abebbt, hat er verheerende Folgen hinterlassen. In den sieben von ihm gestreiften oder überquerten Ländern sind 286 Menschen gestorben, hunderttausende obdachlos geworden und Millionen Menschen noch über Tage ohne Strom. Auf Kuba gilt Sandy als schwerster Hurrikan seit 1963, in den USA ist er nach Hurrikan Katrina im Jahr 2005 der zweitschwerste. Die gesamte Ostküste der USA hat zum Teil schwere Schäden, ganze Strandabschnitte sind komplett weggespült, Ortschaften stehen unter Wasser. Schätzungen nach belaufen sich die Schäden auf mindestens 75 Milliarden US-Dollar.

---

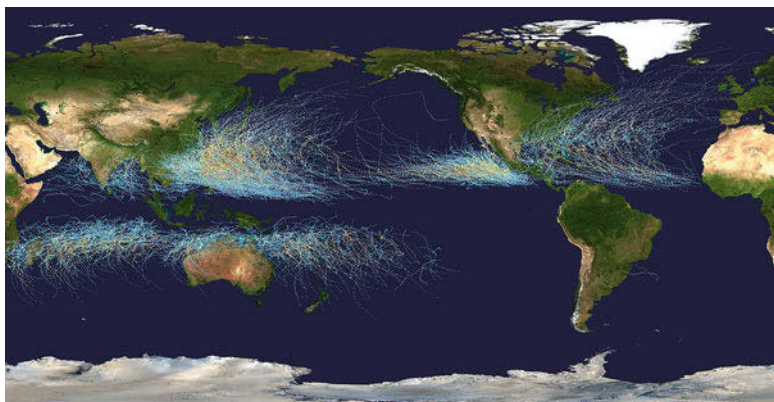
## Feuchte Luft und warme Meere – die Ursachen

Dass Hurrikan Sandy seinen Ursprung im tropischen Atlantik hatte, ist kein Zufall. Denn Wirbelstürme wie er bilden sich dort, wo die Oberflächentemperatur des Meeres die Schwelle von etwa 27 °C überschreitet. Nur dann verdunstet genügend Wasser, um über dem Ozean große Mengen feuchtwarmer Luft aufsteigen zu lassen. Dieser beim Verdunstungsprozess entstehende Wasserdampf gilt als Hauptenergiequelle und Motor der Wirbelbildung. Die feuchtwarmen Luftmassen steigen bis in Höhen von 20 Kilometern auf und bilden dabei gewaltige Wolkentürme. Gleichzeitig sinkt über dem Meer der Luftdruck immer weiter ab, dadurch werden weitere feuchtwarme Luftmassen aus der Umgebung ins Innere des Sturmtiefs gesaugt. In den oberen Bereichen der Sturmwolke kühlt die Luft ab, durch die Kondensation des Wasserdampfs wird

Wärme und somit Energie frei, die den Prozess weiter antreibt. Die abgekühlte Luft strömt zur Seite weg und sinkt weiter außen wieder nach unten – ein fataler Kreislauf beginnt.

Damit allerdings diese atmosphärische Wärmekraftmaschine zu einem Wirbelsturm wird, müssen auch Wind und die Erdrotation mitspielen. Denn erst durch die ablenkende Kraft der 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 in seine Drehung versetzt. Und noch etwas benötigt ein angehender Wirbelsturm zum Wachsen: möglichst wenig störende Scherwinde. Denn weht es über dem Meer zu heftig, zerstreut der Wind das sich aufbauende Sturmtief, es kann seine „Staubsaugerwirkung“ nicht entfalten und wächst gar nicht erst nicht zum typischen Wirbel mit Auge heran. Dieses Zusammenwirken von Meer, Wind und Rotation erklärt auch die Lage der typischen Wirbelsturm-„Wiegen“: Sie sind sowohl im Atlantik wie auch im Pazifik auf ein Gebiet zwischen dem 15. nördlichen und südlichen Breitengrad beschränkt, mit einer Lücke jeweils direkt am Äquator. Nur in diesen Streifen stimmen alle Voraussetzungen, um einen Wirbelsturm entstehen zu lassen.

Haben sich die riesigen atmosphärischen Wärmekraftmaschinen erst einmal in Gang gesetzt, sind sie kaum zu stoppen, da sie sich mehr oder weniger selbst mit neuer Energie versorgen. Durch die ständige Energiezufuhr schießt immer mehr Luft spiralförmig in die Höhe und rotiert um die Achse des Wirbels. Mit der Zeit bildet sich im Zentrum eine kreisförmige Tiefdruckzone heraus – das Auge des Hurrikans, in dem es fast windstill ist. Die Größe des Auges schwankt zwischen acht Kilometern und bis über 200 Kilometern; meistens erreicht sie jedoch einen Durchmesser von 30 bis 60 Kilometern. Hier sinkt die kalte, trockene Höhenluft ab, dadurch bleibt es in diesem Bereich niederschlagsfrei. Blauer Himmel oder Sterne werden so im Zentrum des gewaltigen Wirbelsturms sichtbar, während rings um das Auge der Hurrikan tobt. Aus der bedrohlichen, dunklen Wolkenwand des Wirbelsturms ergießen sich sintflutartige Regenfälle auf die Umgebung. In wenigen Stunden können 500 bis 1000 Millimeter Niederschlag fallen. Bis zu 3,6 Millionen Tonnen Luft kann ein Hurrikan bewegen und Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 Kilometer pro Stunde erreichen.



Entstehungsgebiete und Zugbahnen von tropischen Wirbelstürmen zwischen 1985 und 2005 (© NASA/Nilfanion)

Das Tempo, mit der ein Wirbelsturm als Ganzes wandert, erscheint dagegen gering: In tropischen Regionen liegt die Zuggeschwindigkeit bei acht bis 32 Kilometer pro Stunde, in höheren Breiten können es bis zu 80 Kilometer pro Stunde werden. Die Zugbahnen der tropischen Wirbelstürme verlaufen meist nicht gerade, sondern parabelförmig. Auf der nördlichen Halbkugel ziehen die Tiefdruckwirbel zu Beginn in nordwestliche Richtung, um danach häufig nach Nordosten abzdrehen. Die atlantischen Hurrikans wandern daher oft vom Ostatlantik bis in die Karibik und nach Mittelamerika, um dann in Richtung Südküste der USA abzdrehen. Die Taifune in Südost- und Ostasien bedrohen am häufigsten die Philippinen, Japan und die Ostküste Chinas einschließlich Taiwans. Die Zyklone, die sich im Golf von Bengalen und dem Indischen Ozean entwickeln, verursachen die größten Schäden in Bangladesch. Auf der südlichen Erdhalbkugel gibt es im Atlantik keine Wirbelstürme, hier sorgen kalte Meeresströmungen dafür, dass das Meer zu kalt für die Bildung der Wirbelstürme ist. Im Pazifik dagegen entstehen diese Stürme beiderseits des Äquators. Die südliche Variante zieht dabei oft in Richtung Australien.

## Kategorie 1–5: Die Klassifizierung von Wirbelstürmen

Wenn in Deutschland Windstärke 12 vorhergesagt wird, müssen wir uns auf einen Sturm mit einer Geschwindigkeit von mindestens 118 Kilometern pro Stunde gefasst machen. Um die Stärke eines Hurrikans auszudrücken, reicht die 12-teilige Beaufort-Skala aber längst nicht aus. Windgeschwindigkeiten von über 118 km/h sind hier erst die Grenze, ab der Meteorologen überhaupt von Hurrikans sprechen. Daher musste für deren Klassifizierung eine neue Skala – die Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala – geschaffen werden. Sie wurde 1969 entwickelt und beinhaltet fünf Stufen, die an die Beaufort-Skala anschließen. Namensgeber und Entwickler waren der Ingenieur Herbert Saffir und Bob Simpson, damaliger Direktor des National Hurricane Center (NHC).

Bei der Klassifizierung von Wirbelstürmen ist die maximale Windgeschwindigkeit der am stärksten mit einfließende Wert. Sie bestimmt Art und Umfang der möglicherweise verursachten Schäden, die Wellenhöhe auf dem offenen Meer und die Sturmfluthöhen an den Küsten. Sie ist zudem ein guter Indikator sowohl für den Luftdruck in der Nähe des Auges als auch dafür, wie viel Luft und Wasser durch den Sturm bewegt werden. Ein Wirbelsturm der niedrigsten Kategorie 1 hat Windgeschwindigkeiten von 118 bis 153 km/h. Das reicht beispielsweise bereits aus, um Schäden an nicht verankerten Wohnwagen, einigen Bäumen und Büschen anzurichten und Küstenstraßen zu überfluten. Ein starker Hurrikan der Kategorie 3 entwickelt Windgeschwindigkeiten von 178 bis 209 km/h. Er hat bereits genügend Kraft, um auch große Bäume umzureißen und auch befestigte Gebäude zu beschädigen. Küstengebiete, die weniger als 1,5 Meter über dem Meeresspiegel liegen, können bis zu 13 Kilometer landeinwärts unter Wasser stehen.

Ein Beispiel für einen Hurrikan der höchsten Kategorie 5 ist Katrina. Dieser Wirbelsturm hinterließ im August 2005 besonders in den US-Bundesstaaten Florida, Louisiana, Mississippi, Alabama und Georgia Schäden von umgerechnet mehr als 125 Milliarden Euro. 1800 Menschen starben als Folge des Hurrikans, fünf Millionen waren tage- bis wochenlang ohne Strom, eine Million Menschen wurden obdachlos. Besonders schlimm betroffen war die Stadt New Orleans. Zahlreiche Deichbrüche ließen die in weiten Teilen zwei Meter unter dem Meeres-



spiegel liegende Stadt innerhalb kürzester Zeit in den Fluten versinken. Besonders fatal wirkte sich der Bruch des Damms aus, der die Wassermassen des Lake Pontchartrain von der Metropole fernhielt. Rund 80 Prozent von New Orleans standen danach bis zu 7,60 Meter hoch unter Wasser. Der Hurrikan Katrina gilt bis heute als eine der verheerendsten Naturkatastrophen in der Geschichte der USA.

---

## **Klimawandel: Mehr Superstürme und mehr Regen**

8. November 2013. Der Taifun Haiyan rast über die Philippinen hinweg. Mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 270 Kilometern pro Stunde und Böen von bis zu 379 Kilometern pro Stunde mäht der Sturm alles nieder, was ihm in den Weg kommt. Auch der Landfall bremst seine Wucht kaum ab. Entsprechend verheerend sind die Folgen: Der Super-Taifun hat Schätzungen zufolge mindestens 10.000 Todesopfer gefordert. In den am stärksten betroffenen Regionen, darunter die Inseln Leyte und Samar, sind bis zu 80 Prozent der Behausungen zerstört, über 4,3 Millionen Menschen sind obdachlos. „Der Taifun Haiyan, der über die Philippinen fegte, war wahrscheinlich der stärkste Tropensturm, der seit Beginn der Beobachtungen auf Land traf“, sagt der Klimaforscher Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Und auch in punkto Luftdruck und Windgeschwindigkeiten gehört Haiyan zu den stärksten seiner Art.

Solche Wirbelstürme der Stufe 5, wie Haiyan oder im Jahr 2005 Katrina, galten bisher allerdings eher als die Ausnahme: Im 20. Jahrhundert ereignete sich ein Wirbelsturm dieser Intensität nur rund alle 20 Jahre. Schon seit einigen Jahren vermuten Klimaforscher jedoch, dass der Klimawandel auch die Häufigkeit und Intensität solcher Tropenstürme verändern könnte. Denn sie gewinnen ihre Energie aus dem Wasserdampf, der von den warmen, tropischen Meeren aufsteigt. Werden diese wärmer, stünde den Hurrikans daher theoretisch auch mehr Energie zur Verfügung. Erste Anzeichen dafür gibt es bereits: In den letzten drei Jahrzehnten sind solche Superstürme bereits häufiger aufgetreten als früher. Auch der aktuelle Weltklimabericht des IPCC konstatiert, dass Hurrikans und Taifune der stärksten Kategorien 4 und 5 seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970er Jahren deutlich zunehmen, vor allem im Nordatlantik, in geringerem Maße auch im Nordpazifik.

Und Klimamodelle lassen für die Zukunft eine weitere Verstärkung dieses Trends erwarten: Steigen die Temperaturen um mehr als ein Grad, könnten Hurrikans der Kategorie 5 drei bis vier Mal häufiger vorkommen. Das ermittelten Aslak Grinsted vom Zentrum für Eis und Klima der Universität Kopenhagen und seine Kollegen im Jahr 2013 anhand von Klimamodellen und Hurrikandaten. „Wenn sich das globale Klima um zwei Grad erwärmt, dann könnte ein Katrina-Sturm sogar jedes zweite Jahr auftreten“, so Grinsted. Die Häufigkeit solcher Ereignisse würde sich gegenüber heute damit um das Zehnfache erhöhen. Aber nicht nur das, auch die Begleiterscheinungen der Wirbelstürme verstärken sich durch den Klimawandel: „Etwa extreme Regenfälle, die ein Tropensturm mit sich bringt und die zu Überschwemmungen und Erdbeben führen“, so Rahmstorf. Der Grund: Wärmere Luft kann mehr Feuchtigkeit speichern. Diese Fracht wiederum entlädt sich dann in den Wirbelstürmen in entsprechend sintflutartigen Regenfällen. „Hinzu kommen Sturmfluten an den Küsten, denn der Meeresspiegel steigt infolge der globalen Erwärmung“, so Rahmstorf.

Den Modellrechnungen nach sind es dabei vor allem zwei Faktoren, die die Zunahme der Wirbelstürme begünstigen: Zum einen nimmt die Temperatur der Meeresoberfläche immer weiter zu. Das aber bedeutet, dass die kritische Schwelle von 27 Grad Celsius, die ein Wirbelsturm für seine Entstehung benötigt, häufiger und in mehr Meeresregionen erreicht wird. Die Entstehungsgebiete für Wirbelstürme werden damit größer, gleichzeitig wird die nötige Wärme des Meerwassers früher im Jahr erreicht und hält im Herbst länger an. Dadurch verlängert sich auch die Hurrikansaison. Zum anderen sorgt der Klimawandel dafür, dass die Temperaturdifferenz zwischen der warmen unteren Atmosphäre und der kalten oberen Atmosphäre immer größer wird. Denn die Erdoberfläche erwärmt sich und die darüberliegenden Luftschichten immer mehr, gleichzeitig sorgt der Ozonschwund dafür, dass sich die Stratosphäre weiter abkühlt. „Es ist das Temperaturgefälle, aus dem der Sturm seine Energie zieht“, erklärt Rahmstorf. Beide Faktoren zusammen sorgen nach neuen Modellrechnungen dafür, dass künftig sowohl die Intensität als auch die Häufigkeit der starken Wirbelstürme zunehmen werden.

## Wirbelstürme bald weiter im Norden

Und noch etwas bahnt sich im wahrsten Sinne des Wortes an: Die Wirbelstürme rücken näher. Bisher sind Wirbelstürme ein Phänomen der Tropen – mit nur sehr wenigen Ausnahmen. Aber mit dem Klimawandel verschieben sich auch die Klimazonen und die Bereiche im Meer, die ausreichend warm sind, um als „Brutgebiet“ für Hurrikans und Taifune zu dienen. Wie sich dies auf die Bahnen und Entwicklung der Wirbelstürme auswirkt, untersuchten James Kossin vom NOAA National Climatic Data Center in Madison und seine Kollegen im Mai 2014. Dafür werteten sie meteorologische Satellitendaten der Zeit von 1981 bis 2012 aus und analysierten dabei im Speziellen die jeweilige Position, an der der Sturm seine höchste Intensität erreichte.

Das Ergebnis: Die Wirbelstürme wandern. Der Ort, an dem sie ihre größte Intensität erreichen, verschiebt sich immer weiter in Richtung der beiden Pole, wie die Forscher berichten. Auf der Nordhalbkugel rücken die Stürme bereits pro Jahrzehnt um 53 Kilometer nach Norden vor, auf der Südhalbkugel um 62 Kilometer nach Süden. Dieser Trend sei klar ablesbar und statistisch signifikant, konstatieren Kossin und seine Kollegen im Fachmagazin „Nature“. Das Ausmaß dieser Wanderung ist dabei von Ozean zu Ozean leicht verschieden: Am stärksten macht sie sich im nordwestlichen Pazifik bemerkbar – einer Region mit ohnehin sehr vielen Wirbelstürmen. Etwas weniger im Nordatlantik und Ostpazifik. „Doch trotz dieser regionalen Unterschiede deuten die Daten darauf hin, dass es sich um ein globales Phänomen handelt“, so die Forscher.

Was diese Polwanderung der Wirbelstürme auslöst, ist noch nicht eindeutig geklärt. Mit Hilfe von Klimamodellen identifizierten die Forscher aber zwei wichtige Einflussfaktoren: Zum einen spielen Scherwinde eine große Rolle. Weht dieser Querwind am Entstehungsort der Wirbelstürme zu stark, dann zerstreut er feuchte Luft und Wolken und verhindert so die Bildung der typischen Sturmwirbel. Wie die Klimasimulationen zeigten, haben die Scherwinde in den Tropen zugenommen, in den angrenzenden Gebieten aber abgenommen. „Das könnte die Polwärts-Wanderung fördern“, so die Forscher. Zum anderen steigt durch den Klimawandel die Oberflächentemperatur der Meere – und damit die Zone, in der Wirbelstürme entstehen können. „Und wenn dieser Gürtel nach

außen wächst, dann bewegen sich die Geburtsregionen der Wirbelstürme mit“, erklärt Koautor Kerry Emanuel vom Massachusetts Institute of Technology (MIT). Wie genau beide Faktoren ineinandergreifen und was vielleicht noch mitspielt, müsse aber in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Sehr klar aber sind dafür die Folgen, die diese Wirbelsturm-Wanderung hat: „Jede Verschiebung in den Positionen, wo die Stürme auf Land treffen, wird offensichtliche Folgen für die Küstenbewohner und Infrastruktur haben“, konstatieren die Forscher. Während viele Regionen in den bisher typischen Hurrikan- und Taifungebieten auf die ständige Gefahr durch diese Stürme eingestellt sind, könnte es die bisher knapp außerhalb der Gefahrenzone liegenden Regionen unvorbereitet treffen. „Das Risiko für Schäden und Todesfälle wird in diesen Gebieten steigen, während es in den Tropen eher absinkt“, prognostizieren Kossin und seine Kollegen. Umso wichtiger sei es daher, diese Entwicklung weiter zu verfolgen und die genauen Gründe dafür aufzuklären.

---

## **Der beste Schutz: die rechtzeitige Vorhersage**

Darauf, wo und wann ein Wirbelsturm entsteht, hat der Mensch keinen Einfluss – verhindern lässt sich dieses Naturereignis nicht. Entsprechend wichtig ist die rechtzeitige Vorhersage von Hurrikans und ihren wahrscheinlichen Zugbahnen für die Bevölkerung in den gefährdeten Regionen. Nur bei ausreichend Vorwarnung können sie rechtzeitig das Weite suchen und ihre Häuser so gut es geht sturmsicher machen. Entsprechend viel Zeit, Geld und Manpower investieren insbesondere die USA in die Hurrikanprognose und -beobachtung. Das US-National Hurricane Center (NHC) in Miami, selbst in einer hurrikangefährdeten Region gelegen, überwacht beispielsweise die Wirbelstürme des tropischen Atlantiks, des Ostpazifiks 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



Zerstörte Häuser in der Ortschaft Breezy Point in New York nach Hurrikan Sandy. Nur eine Evakuierung rettete die Bewohner (© FEMA/Ryan Courtade)

NHC mindestens zehn numerische Modelle zur Berechnung der Zugbahnwahrscheinlichkeiten verwendet. Basis dieser Modelle sind die von Satelliten, Messflugzeugen, Radargeräten sowie seegestützten Aufzeichnungsinstrumenten gesammelten Daten. Anhand dieser Modelle analysieren die Meteorologen das genaue Verhalten des Hurrikans.

Um möglichst genaue Informationen zu erhalten, werden nach der Lokalisierung eines Wirbelsturms zusätzlich Spezialflugzeuge entsandt. Seit 1943 fliegen die „Hurricane Hunters“ der US-Luftwaffe ins Zentrum der riesigen Tiefdruckwirbel, um Windgeschwindigkeiten und -richtungen, Lage und Größe des Auges sowie Luftdruck und thermische Verhältnisse innerhalb des Sturmes zu bestimmen. Wenn die Hurricane Hunters in einen dieser Monsterstürme hinein fliegen, sind sie umgeben von riesigen, schaurig-schönen Wolkenwänden, die senkrecht in den Himmel wachsen. Die Luftmassen drücken auf das Flugzeug und die Sicht geht zurück auf Null. Mitten im Hurrikan muss das Flugzeug durch schwere Turbulenzen fliegen, Luftmassen strömen wild ineinander und rotieren

mit höllischem Tempo bis es plötzlich wieder ganz ruhig wird – das Flugzeug hat den ruhenden Pol des Hurrikans, das Auge – erreicht. Während dieses Fluges werden alle zwei Sekunden Luftdruck, Feuchtigkeit und Windrichtung gemessen.

In der Kommando-Zentrale am Boden werten Meteorologen die Daten aus und aktualisieren die Prognosen. Bis zu zwölf Stunden bleibt die Crew bei ihren Einsätzen in der Luft. Dabei herrscht ruhige Professionalität unter den sturmerprobten Hurrikan-Jägern. Zeit für Absturzgedanken bleibt ohnehin nicht. „Wir haben nun mal eine Mission zu erfüllen“, sagt Navigator Lance Ashland. „Das heißt, wir müssen da durch.“ Hagel in der Wand des Auges hat den Hurricane Hunters schon einmal zwei der vier Turbinen lahm gelegt, aber nach Hause haben sie es bis jetzt immer geschafft. Ashland sagt weiter, „Das ist der beste humanitäre Einsatz, den das Militär zu bieten hat. Wir sammeln Informationen. Die ersparen Menschen viel Leid und manchen retten sie das Leben. Dafür lohnt es sich.“

---

## **Evakuierung: Wenn nur die Flucht bleibt**

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 die betroffenen Gebiete präzisiert. Spätestens eineinhalb Tage vor dem Durchzug des Wirbelsturms laufen die Schutz- und Evakuierungsmaßnahmen dann in vollem Umfang an. Ab jetzt läuft die Zeit. Eine funktionierende Katastrophenplanung ist nun entscheidend dafür, ob die Bevölkerung geordnet und schnell die gefährdeten Regionen verlassen kann oder ob die Evakuierung in ein Chaos ausartet.

Da bei einem Hurrikan vor allem Küstenregionen von Überflutungen bedroht sind, existieren in den USA für die meisten gefährdeten Gebiete entsprechende Evakuierungspläne. Sie geben die besten Rou-

ten landeinwärts an, beinhalten meist aber auch detaillierte Anweisungen darüber, wann welche Gebiete evakuiert werden sollen. Im Kontrollzentrum herrscht nach Herausgabe der Hurrikanwarnung ständige Anspannung: Hat man die Computermodelle korrekt interpretiert und richtige Entscheidungen getroffen? Sollte man noch weitere Landstriche evakuieren? Denn es kostet eine Million US-Dollar, einen Küstenstreifen von anderthalb Kilometern vorsorglich zu evakuieren. Und liegt man falsch, kann sogar erst die Evakuierung die Bevölkerung ins Unheil stürzen: „Mein Alptraum sieht so aus: Wir evakuieren die Menschen. Sie stecken im Stau, und der Hurrikan überrollt sie dort“, sagt Miles Lawrence vom Kontrollzentrum des NHC. „Ich stelle mir das mit Entsetzen vor. Dann sterben mehr Menschen in ihren Autos auf den verstopften Straßen. Und wir haben sie dorthin geschickt.“ Die Folgen einer ausbleibenden oder missachteten Warnung allerdings wären noch dramatischer. Bisher hat sich der Einsatz der Vorhersagen und Katastrophenpläne jedenfalls ausgezahlt: Seitdem die Vorhersagen – mit Hilfe von Satellitenbildern, Messflugzeugen und Computersimulationen – präziser geworden sind, konnte die Zahl der Todesopfer – zumindest in den USA – gesenkt werden. Die Sachschäden sind jedoch vor allem in Küstengebieten immer noch immens.

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 hinweg fließen kann. Elektrogeräte, Boiler oder Heizungen liegen zudem nicht im Keller, wo sie überflutet werden könnten, sondern werden erhöht angebracht.

---

# Tornados – klein, aber zerstörerisch 12

Dieter Lohmann und Ansgar Kretschmer

Tornados gelten als die „kleinen Brüder“ der Hurrikans. Doch trotz schmalerer Wirbel und kürzerer Dauer können auch diese Windhosen enorme Schäden anrichten. So gilt der sogenannte „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. Aber auch bei uns in Mitteleuropa gibt es Tornados und auch sie können Schneisen der Zerstörung hinterlassen – wenn auch in kleinerem Maßstab.

---

## Das Rezept für einen Tornado

Ende April 2014: Ein heranziehendes Tiefdruckgebiet verspricht den US-Bundesstaaten Oklahoma, Arkansas und Missouri – wieder einmal – stürmisches Wetter. Für diese Region ist das nichts Neues, denn sie liegt mitten in der Tornado-Alley – dem Gebiet der USA, in dem Tornados besonders häufig auftreten. Die Sturmfront, die dann tatsächlich von Texas und Kansas aus in Richtung Osten zieht, übertrifft jedoch alle Unwetterwarnungen. Aus sogenannten Superzellen-Gewittern senken sich rasend schnell rotierende, trichterförmige Wirbel herab: Ein Tornado nach dem anderen entspringt der Unwetterfront. Vom 27. bis 29. April ziehen 78 der zerstörerischen Wirbelwinde durch die Region. Besonders schwer betroffen sind die Ortschaften Mayflower und Vilonia im Staat Arkansas sowie Louisville in Mississippi: Zwei Tornados der



zweithöchsten Kategorie EF4 radieren hier mit Windgeschwindigkeiten von über 265 Stundenkilometern ganze Stadtviertel aus, von manchen Straßenzügen bleibt nicht mehr als die Fundamente der Häuser. Die erste schwere Sturmserie der Tornadosaison 2014 fordert insgesamt 35 Todesopfer.

In der Hauptsaison von März bis Mai ist im Mittleren Westen der USA – und dort besonders in Oklahoma – durchaus mit bis zu 800 Tornados zu rechnen. Denn dieses Gebiet liegt mitten in der Tornado-Alley. Hier trifft die feucht-heiße Luft aus dem Golf von Mexiko mit Kaltluft aus dem Norden aufeinander. Dadurch bilden sich schwere Gewitterfronten. Wenn die Kaltluft die Luftmassengrenze durchbricht, stürzt sie mitunter mehrere Kilometer strudelförmig nach unten – das Rezept für einen Tornado: Die herabstürzende 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 aufsteigende Warmluft kondensiert und ein Nebel aus Wassertröpfchen oder Regen macht den für den Tornado typischen, trichterförmigen Wolkenschlauch sichtbar. Dieser ist jedoch nicht immer deutlich ausgeprägt: Manche Tornados verraten sich allein durch eine aufgewirbelte Staubwolke, wenn die Spitze des Trichters den Boden erreicht.

Der Durchmesser von Tornados kann am Boden von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern reichen, in Einzelfällen sogar ein bis zwei Kilometer. Der Tornado dreht sich mit sehr hoher Geschwindigkeit um seine senkrechte Achse. Bei besonders breiten Tornados können auch mehrere Wirbel auftreten, die um ein gemeinsames Zentrum kreisen, oder ein einzelner größerer Sturm wird von kleineren „Satelliten-Tornados“ umkreist. Diese Drehbewegung hat ihre Ursache in der natürlichen Erdrotation. Auf der Nordhalbkugel dreht die eingezogene Luft gegen den Uhrzeigersinn, auf der Südhalbkugel hingegen im Uhrzeigersinn. Durch die Drehbewegung beginnt der Tornado mit einer Geschwindigkeit von 40 bis 50 Kilometern in der Stunde zu wandern, er kann aber Spitzenwerte von fast 120 Stundenkilometern erreichen.

Seine eigentliche Zerstörungskraft erhält der Tornado allerdings erst durch seine rotierenden Winde und den extrem niedrigen Luftdruck im Wolkenschlauch, der bis zu 100 Hektopascal unter dem Umgebungsluftdruck liegt. Dies führt zu Aufwinden, die alles mit sich nach oben rei-



Zerstörerischer Wolkenschlauch: ein Tornado der Kategorie F5 in Manitoba, Kanada  
(© Justin Hobson/CC-by-sa 3.0)

ßen. Sie sind so stark, dass regelmäßig Messgeräte zu Bruch gehen. Mit Radarmessungen lassen sich jedoch auch solche Windgeschwindigkeiten bestimmen: Der stärkste bislang gemessene Tornado brachte es auf 484 Stundenkilometer. Das reicht aus, um Autos, Lokomotiven und Kühe hochzuheben und davonzuschleudern. 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 8000 Häuser in Trümmern, die Spur der Verwüstung war rund 250 Kilometer lang und reichte vom Südwesten Oklahomas fast bis nach Wichita im benachbarten Bundesstaat Kansas.

## Tornados sprengen die Beaufort Skala

Für Tornados gibt es eine eigene Skala der Windgeschwindigkeiten, da die „normale“ Beaufort-Skala mit ihrer maximalen Windstärke 12 (117 Kilometer in der Stunde und mehr) längst nicht ausreicht. Die erweiterte Fujita-Skala (EF) ist nach ihrem ursprünglichen Entwickler Theodore Fujita benannt und gilt in ihrer erweiterten Form seit 2007. Ihre niedrigste Stufe EF1 entspricht der Beaufort-Stärke 12, Tornados mit geringeren Windgeschwindigkeiten werden als EF0 klassifiziert. Die höchste Stufe (EF5) beginnt bei 322 Stundenkilometern.

Entscheidend für die Einteilung ist jedoch nicht nur die Windgeschwindigkeit, die Klassifizierung soll vor allem die verursachten Schäden widerspiegeln. Ausgerechnet in der Tornado-Alley kommt ein weiterer Faktor hinzu, der katastrophale Schäden begünstigt: die relativ leichte Bauweise der typischen Holzhäuser. Ein EF5-Tornado zerstört ein solches Haus nicht nur – er fegt selbst die Trümmer solider Gebäude komplett davon, lässt nur blanke Fundamente zurück und kann sogar Asphalt und Straßenpflaster vom Boden schälen. Als extrem gefährdet gelten vor allem so genannte „trailer homes“, größere Wohnwagen, die vielen Menschen in den USA als Dauerbehausung dienen. Genauso wie Autos und selbst Busse und LKWs werden diese auch schon von schwächeren Tornados umgeworfen, meterweit davongewirbelt oder gar zu Schrott zermahlen. Umherfliegende 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.

In den gefährdeten Gegenden gehören regelmäßige Übungen zum sicheren Verhalten bei Tornados zum Alltag an den Schulen. Sichere Zuflucht bieten allein speziell ausgebaute Sturmschutzräume – in Oklahoma gehören sie zu den Bauvorschriften. Doch viele vermeintlich sichere, selbst gebaute Bunker oder Keller halten einem Tornado nicht stand. Wer nicht zu Hause, sondern draußen von einem Tornado überrascht wird, ist besonders in Gefahr. Zentrale, sichere Schutzräume können oft aus Zeitgründen nicht aufgesucht werden. Katastrophenschützer warnen allerdings ausdrücklich davor, sich unter einer Brücke in Sicherheit zu bringen, denn dies ist alles andere als sicher: Brücken und Unterführungen kanalisieren die Winde noch weiter und sorgen so für noch höhere Windgeschwindigkeiten.



Schäden nach einem Tornado in Oklahoma: Von dem Haus ist nicht mehr viel übrig  
(© FEMA/Win Henderson)

Ein weiterer, mitunter tödlicher Fehler besteht darin, bei einem Tornado die Fenster zu öffnen. Einem verbreiteten Irrglauben zufolge soll dies für einen Druckausgleich gegenüber dem enormen Unterdruck im Inneren des Tornados sorgen und so das Haus vor einer regelrechten Explosion schützen. Durch die geöffneten Fenster gelangt der Sturm jedoch noch leichter ins Haus und reißt es so von innen auseinander. Ein Tornado mit der Kraft, ein Haus allein durch seinen Unterdruck zu sprengen, schlägt durch fliegende Trümmer ohnehin ausreichend Luftlöcher in Fenster und Wände, wenn er überhaupt etwas vom Haus übrig lässt. Daher empfehlen die amerikanischen Wetterexperten: Bei einem Tornado weg von den Fenstern, stattdessen so schnell wie möglich sichere Zuflucht suchen. Wer keinen Sturmschuttkeller hat, hat die besten Überlebenschancen in einem zentralen, fensterlosen Raum wie etwa einem Badezimmer im Erdgeschoss seines Hauses, möglichst weit entfernt von den Außenwänden.

## **Tornadogefährde auch bei uns**

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 diese die wirkliche Tornadogefährde, 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 bis 200 Tornados gibt, sind es in den USA über 1000 – davon allein rund die Hälfte entlang der berühmten Tornado-Alley.

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 Häufigkeit von Tornados scheint sich in Mitteleuropa innerhalb der letzten zwanzig Jahre deutlich erhöht zu haben. Dies liegt allerdings vermutlich daran, dass sie wesentlich häufiger entdeckt werden: Vor allem über soziale Medien im Internet sowie weiterentwickelte digitale Fotografie und Handykameras werden seitdem auch schwache Tornados viel häufiger gemeldet als früher. Der Klimawandel gilt ebenfalls als mögliche Ursache für das häufigere Auftreten von Tornados. Hierzu fehlen allerdings bislang ausreichend verlässliche Daten.

Die meisten bei uns auftretenden Tornados sind nur von geringer bis mittlerer Stärke und richten meist nur wenige Schäden an. Denn die stabilere, durch tiefreichende Fundamente gesicherte Architektur hierzulande ist weniger anfällig gegen die Windhosen. Aber auch Tornados mit beachtlicher Intensität hat es in Deutschland schon gegeben. Im Jahr 2006 etwa zog ein Wirbelsturm über die Stadt Hamburg hinweg, stürzte mehrere Baukräne um und forderte zwei Todesopfer. Für 300.000 Menschen riss die Stromversorgung ab, der finanzielle Gesamtschaden lag in Millionenhöhe. Da die erweiterte Fujita-Skala aber zum großen Teil auf der Schwere der verursachten Schäden beruht, ist sie weniger nützlich,

um Tornados in Europa einzuordnen. Stattdessen wird oft noch die ursprüngliche Fujita-Skala verwendet, in Deutschland, Österreich und der Schweiz auch die neuere TORRO-Skala. Letztere lehnt sich enger an die Beaufort-Windstärken an, erweitert diese Skala jedoch um mehrere Stufen nach oben. Die Beaufort-Stärke Acht entspricht dabei etwa der TORRO-Stufe Null (T0). Die verheerenden EF5-Tornados lägen auf dieser Skala bei T10 bis T12. Zum Vergleich: Die Beaufort-Skala müsste mindestens bis Windstärke 30 reichen, um solche Windgeschwindigkeiten zu beschreiben.

Ungewöhnlich für unsere Region war ein regelrechter Tornado-Ausbruch am Pfingstmontag im Jahr 2010: Zwischen einem Tiefdruckgebiet über Skandinavien und einem Hoch über den Alpen bildete sich starke vertikale Windscherung über Ostdeutschland. Vor allem über Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg zogen schwere Unwetter hinweg. Der Temperaturunterschied zwischen den Luftmassen begünstigte die Entstehung von Tornados in der Gewitterfront. Direkt beobachtet wurde zwar kein einziger Tornado, auf einer Länge von rund 100 Kilometern zwischen den Orten Bad Schmiedeberg und Großenhain waren jedoch verwüstete Schneisen in der Landschaft entstanden: Die umgerissenen Bäume zeigten für Tornadoschäden typische Fallmuster. Eine Sturmbö rasierte zudem die oberen zwei Drittel des 96 Meter hohen Schornsteins der ehemaligen Papierfabrik in Großenhain ab, die Fabrik wurde fast vollständig zerstört.

Was zunächst wie die Folgen eines einzigen Rekord-Tornados aussah, erwies sich im Nachhinein als das Resultat von mindestens vier Wirbelstürmen. Einer davon war dennoch außergewöhnlich: Die verursachten Schäden ließen stellenweise auf Windgeschwindigkeiten um 255 Stundenkilometern schließen – dieser Tornado fiel damit bereits knapp in die Kategorie F3. Nicht nur die ungewöhnlich dicht gedrängten Tornados an diesen Pfingstmontag sorgten für schwere Schäden: Im ganzen Land hinterließ das Unwetter umgestürzte Bäume, abgedeckte Häuser und von Trümmern und Ästen verbeulte Autos. Die finanziellen Schäden lagen in dreistelliger Millionenhöhe.

## **Vorhersage schwierig: die Arbeit der Sturmjäger**

Das Beispiel zeigt auch, wie schwer Tornados zu erfassen sein können: Weil sie so kleinräumig sind, extrem schnell entstehen und wieder vergehen können, lassen sich manchmal nur noch die Folgen feststellen. 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 zwar 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. Jedes Jahr gibt es immer einige Tornados, die buchstäblich „aus heiterem Himmel“ entstehen, und Meteorologen und Bewohner der betroffenen Gegend gleichermaßen überraschen.

In den USA versucht man, die Tornados möglichst früh über Dopplerradar zu orten, um die auf seinem Weg liegenden Orte warnen zu können. Mit diesem Hilfsmittel können Windbewegungen zum Radar hin oder vom Radar weg erkannt und stärker rotierende Luftbewegungen frühzeitig identifiziert werden. Darüber hinaus sind diese Systeme so programmiert, dass sie bei gefährlichen Wetterentwicklungen selbstständig Alarm geben. Die 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.

Da sich aber nicht alle Wirbelstürme mit dieser Methode finden lassen, stellen sich in vielen Gegenden der USA freiwillige „Stormspotter“ zur Verfügung, die in den gefährdetsten Gebieten der Tornado-Alley nach herannahenden Wirbelstürmen Ausschau halten. Auch in Europa ist die Tornadobeobachtung durch Freiwillige mittlerweile verbreitet. Haben die Stormspotter einen Tornado entdeckt, melden sie ihre Beobachtung an den nationalen Wetterdienst, der den weiteren Weg mit Radar erfasst und die im voraussichtlichen Pfad des Tornados liegenden Ortschaften über Radio und Fernsehen warnt. Zusätzlich werden auch mobile Messwagen mit modernsten Messinstrumenten eingesetzt.

Die sogenannten 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 und für welches Gebiet eine offizielle Tornadowarnung ausgesprochen wird.

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“ Unwetterisiko ausgegangen. Bei der dritten Warnstufe schließlich besteht hohes Unwetterisiko. 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. Zahlreiche Wissenschaftler arbeiten heute fieberhaft an der Verbesserung von Mess-, Erkennungs- und Vorhersagemethoden für Tornados. Dies ist allerdings eine schwierige Aufgabe: Durch ihre Kurzlebigkeit und Unvorhersagbarkeit sind Tornados, auch wenn sie schon auf dem Weg sind, oft nur schwer zu erwischen. Daher liegen Wissenschaftler, die direkt im Pfad des Tornados Daten sammeln wollen, oft tage- und wochenlang auf der Lauer, nur um dann feststellen zu müssen, dass der erwartete Sturm abdreht und einen anderen Weg nimmt oder sich auflöst, während sich anderswo der nächste zerstörerische Wirbel bildet.



---

# Winterstürme – zerstörerische Tiefs 13 der mittleren Breiten

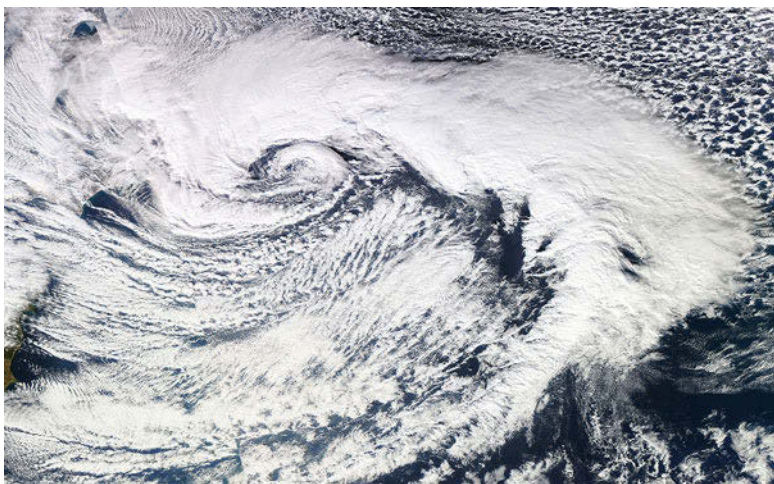
Nadja Podbregar

Fast jedes Jahr rasen winterliche Sturmtiefs wie „Christian“, „Kyrill“ oder „Wiebke“ über Europa hinweg und hinterlassen oft Schäden in Milliardenhöhe. Abgedeckte Hausdächer, kahlrasierte Wälder und Menschen, die mitten im Winter ohne Strom und Telefon auskommen müssen, sind die typischen Folgen. Verhindern lassen sich diese Winterstürme nicht, sie sind eine natürliche Folge der Wetterbedingungen und Luftströmungen unserer Breiten. Umso wichtiger ist daher eine rechtzeitige Vorhersage – denn sie kann Leben retten.

---

## Die Entstehung: Sturmküche über dem Atlantik

Glatte 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 „Christian“ 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. Warme Luft steigt hier auf und macht sich, angetrieben von den globalen Luftströmungen, auf den Weg nach Norden. Dabei erhält sie



Ein typisch kommaförmig gekrümmtes Sturmtief der mittleren Breiten, hier über Japan (© NASA, MODIS Rapid Response System)

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 heran strömende Tropenluft trifft auf die dichte, kalte Polarluft. Diese ist, ebenfalls abgelenkt durch die Erddrehung, 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 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 tausend 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 eine Tagesreise. Ein Beispiel für einen solchen Schnellläufer aus dieser Wetterküche ist der Orkan „Christian“, der im Oktober 2013 Norddeutschlands Küsten den schwersten Sturm seit 1999 beschwerte.

---

## **„Christian“ – ein Schnellläufer überrennt Europa**

25. Oktober 2013. Von dem südöstlich von Grönland liegenden Tiefdruckgebiet Burckhard teilt sich ein weiterer, kleinerer Tiefdruckwirbel ab – ein ganz normales Ereignis bei solchen Tiefs. Noch lässt nichts daran erahnen, welche Konsequenzen es diesmal haben wird. Das neue Tief Christian steuert langsam nach Westen, bis es vom Jetstream erfasst wird, der es quasi huckepack mitreißt. Seine Wanderungsgeschwindigkeit erhöht sich dadurch enorm: In nur 24 Stunden legt Christian mehr als 2000 Kilometer zurück – er wird dadurch zu einem sogenannten Schnellläufer – einem der besonders rasch heranrasenden Sturmtiefs. Doch dessen nicht genug, strömen gleichzeitig von Süden her die Reste eines Tropensturms in das Einzugsgebiet des Tiefs, von Norden folgt ihm kalte Polarluft. Dieser Gegensatz ist für das Sturmtief der reinste Verstärker: Sein Luftdruck sinkt auf unter 990 Hektopascal, der Wolkenwirbel vergrößert und verdichtet sich.

Am frühen Morgen des 28. Oktober hat „Christian“ Europa erreicht und zieht über den Süden Englands und Nordwest-Frankreich hinweg. In Böen erreicht der Sturm jetzt Orkanstärke, in der Bretagne werden Windgeschwindigkeiten von bis zu 133 km/h gemessen. Wenig später rast das Tief über die Niederlande, Dänemark und die deutsche Nordseeküste hinweg. Auf der Insel Borkum registriert die Wetterstation sogar Spitzenwindgeschwindigkeiten von 191 km/h – ein absoluter Rekord. Der Sturm reißt Bäume um, hebt Dächer ab und unterbricht Zug- und Straßenverbindungen. Die Flughäfen von London und Amsterdam werden gesperrt,

andernorts Flüge gestrichen. Allein im Süden Großbritanniens sind zeitweise mehr als 500.000 Haushalte ohne Strom, in Nordfrankreich rund 75.000. In London kippt ein Kran vom Dach des Cabinet Office und blockiert den Verkehr in der City. In Rotterdam wird der Hafen geschlossen, eine aus England kommende Fähre mit mehr als 1000 Passagieren muss auf die offene See zurückkehren und dort das Ende des Sturms abwarten. In Norddeutschland bricht der Zugverkehr zusammen, in Hamburg steht auch die S-Bahn vorübergehend still.

Als Sturmtief Christian weitergezogen ist bis ins Baltikum und schließlich langsam verschwindet, hinterlässt er europaweit Schäden von mehreren hundert Millionen Euro und 14 Tote, davon sieben in Deutschland. Typisch für solche Winterstürme: Weil sie in Europa auf besonders dicht besiedelte und hoch industrialisierte Regionen treffen, sind die Zerstörungen entsprechend hoch. 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 1500 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.

---

## Stürme in Serie

Wie viel Schaden ein Wintersturm 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.

Hinzu kommt: Winterstürme sind 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 gut um 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.

---

## **Klimawandel: Mehr Winterstürme, weniger Polartiefs?**

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 Sturmschutzwall 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 Untersuchungen in den USA, Europa und Australien gezeigt, dass sich die Niederschlagsmuster verändern. Und in Mitteleuropa drohen immer häufiger trockene Sommer und milde, dafür umso 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 daraufhin, 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 Winterstürme wie Christian oder Kyrill 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.

Aber die Klimaerwärmung verstärkt offenbar nicht jede Art von Sturm, wie Forscher des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht im Jahr 2010 feststellten. Sie hatten die Entwicklung von Polartiefs untersucht. Polartiefs sind kleinräumige Stürme, die in den Ozeanen der hohen Breiten auftreten und tropischen Wirbelstürmen ähneln. Auch wenn Polartiefs nicht zu jeder Zeit Orkanstärke erreichen, sind sie für die Seefahrt und Küstengebiete besonders tückisch, da sie sich sehr plötzlich entwickeln können. Hinzu kommt, dass Polartiefs aufgrund ihres geringen Durchmessers von nur einigen hundert Kilometern schwer vorhersehbar sind und von globalen Klimamodellen nicht erfasst werden. Um den Einfluss des Klimawandels auf diese Stürme zu ermitteln, speisten die Forscher Wetterdaten der Jahre 1948 bis 2006 in globale Klimamodelle ein und simulierten die bis zum Ende dieses Jahrhunderts vorhergesagte Klimaerwärmung.

Die Ergebnisse brachten eine Überraschung: Denn sie zeigten, dass die Polartiefs bis Ende des Jahrhunderts sogar deutlich seltener werden könnten – je nach Klimaszenario bis zu 50 Prozent. Der Grund für diese Veränderungen: Durch den Klimawandel erwärmt sich die Luft in den Polarregionen stärker als weiter im Süden. Dadurch aber nimmt der Temperaturunterschied zum ohnehin milderen Meer ab. Dieser aber ist die treibende Kraft für die Stürme. Wird diese schwächer, bleiben auch die Stürme eher mal aus. Wie das Modell zeigte, beeinflusst das sich erwärmende Klima jedoch nicht nur die Anzahl der polaren Wirbelstürme, es verändert auch deren räumliche Verteilung. Demnach werden sich diese Wetterereignisse in Zukunft weiter in Richtung Norden verlagern. Die

heute noch südlich und westlich von Island liegenden Entstehungszonen verschwinden gegen Ende des Jahrhunderts. Dafür nimmt eine Region vor Norwegen an Bedeutung zu, außerdem bewegt sich eine weitere Polartief-„Wiege“ südöstlich von Spitzbergen weiter nach Norden in die grönländische See, so die Ergebnisse.

---

## **Nordsee: Sturm als Küstenschutz?**

Es klingt paradox, stimmt aber: Wenn es an der Nordseeküste künftig mehr stürmt, könnte dies den bedrohten Küstenmarschen gegen den steigenden Meeresspiegel sogar helfen. Denn Sturmfluten spülen immer auch ein bisschen Sand und Schlick auf die überfluteten Salzwiesen und Marschen. Dadurch werden diese millimeterweise höher und können so besser mit dem steigenden Meeresspiegel Schritt halten. Das haben Forscher der Universität Kiel im Jahr 2013 herausgefunden. Den Prognosen der Klimaforscher nach könnten die Pegel der Nordsee bis 2030 um rund 20 Zentimeter steigen. Und auch die Häufigkeit und Stärke der Sturmfluten soll zunehmen. Die meisten Küsten sind durch ihre Deiche ausreichend geschützt. Nicht aber die teilweise vor den Deichen liegenden Salzwiesen und Marschen. „Es gibt zwar Prognosen darüber, wie gut die Salzmarschen dem steigenden Meeresspiegel standhalten können, der Einfluss der häufigeren Stürme wird darin aber nicht berücksichtigt“, berichten Mark Schuerch und seine Kollegen von der Universität Kiel.

Um dies zu klären, haben die Forscher in einer Simulation verglichen, wie Salzmarschen im Wattenmeer vor Sylt auf Meeresspiegelanstieg mit und ohne Zunahme der Sturmhäufigkeit reagieren. Sie analysierten dafür 48 verschiedene Szenarien des Anstiegs und 13 Sturmszenarien, um die kritische Grenze herauszufinden, bis zu der die Salzmarschen trotz Klimawandel bis 2100 überleben können. Das Ergebnis war verblüffend: Gingen die Forscher von einer gleichbleibenden Sturmhäufigkeit aus, lag der maximale von den Marschen überstehbare Meeresspiegelanstieg bei 19 bis 21 Millimetern pro Jahr. Berücksichtigten die Forscher aber die den Prognosen nach ebenfalls zunehmende Sturmhäufigkeit, erhöhte sich die Widerstandskraft der Marschen. Sie tolerierten dann sogar noch weitere drei Millimeter Anstieg mehr, ohne dauerhaft unterzugehen. Nahm

dabei aber auch die Stärke der Stürme zu, reduzierte sich dieser positive Sturmeffekt auf nur noch einen Millimeter – aber immerhin.

Was aber ist der Grund für diese unerwartet positive Wirkung der Stürme? Wie die Forscher erklären, transportieren die ins Land vordringenden Wellen bei einer Sturmflut immer auch viel Sediment, feinen Sand und Schlick, den das Wasser auf seinem Weg über die Wattböden aufgewirbelt und mitgerissen hat. Auf den Marschen ebbt die Flut ab und die Geschwindigkeit des Wassers verlangsamt sich. Als Folge sinken die Sedimentteilchen ab oder verfangen sich im Salzgras. Dadurch bleibt nach der Sturmflut immer ein wenig zusätzliches Material auf den Marschen liegen – und lässt sie so allmählich in die Höhe wachsen. Dieser Effekt ist zwar gering, reicht aber aus, um die Widerstandskraft der Salzmarschen gegen das langsam ansteigende Meer zumindest ein wenig zu erhöhen, wie die Forscher berichten. Das allerdings funktioniert nur so lange, wie auch ausreichend feinkörniges, aufwirbelbares Sediment in der Nähe der Marschen vorhanden sei.

---

## **Blizzards: Stürme mit Schnee und Eis**

7. Februar 2013, vor der Nordostküste der USA: Über dem Atlantik braut sich ein heftiges Sturmtief zusammen. Polare Kaltluft aus dem Norden schiebt sich unter warme, feuchte Luft aus dem Süden. Das Ergebnis ist ein Wintersturm, der mit starken Windböen und heftigem Schneefall über den Nordosten der USA hinweg zieht. In der Folge sind mehr als 650.000 Haushalte in Neuengland tagelang ohne Strom, Flüge und Zugverbindungen werden gestrichen, Autos versinken unter einer fast einen Meter hohen Schneedecke. Wintersturm „Nemo“, wie er getauft wird, ist damit ein typischer Blizzard: ein Schneesturm. 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 Eispanser. 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 Erstickten führen.

---

## **Vorbeugung: Sturmkarten und Vorhersagen**

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 sie 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 aufgebracht zu bekommen.

Aber auch Universitäten und Forschungseinrichtungen forschen auf diesem Gebiet: Sie arbeiten daran, die Auflösung der Gefährdungskarten noch weiter zu erhöhen. Dadurch lassen sich dann lokale Veränderungen der Windgeschwindigkeiten erfassen, wie sie beispielsweise durch die Landschaftsform zustande kommen. Solche Karten zeigen dann, welche Talseite oder welcher Berghang bei einem Sturm besonders stark betroffen sein könnte. 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 flachwurzelnenden Nadelbäume.

Neben solchen eher der langfristigen Risikoeinschätzung dienenden Sturmkarten ist im Falle eines Wintersturms aber vor allem die rechtzeitige konkrete Vorwarnung entscheidend. Die Basis der Vorhersage bildet das „Nowcasting“, eine kontinuierliche Beobachtung der augenblicklichen Wetterlage. Dafür überwachen Dutzende von Wettersatelliten und tausende Bodenstationen weltweit das Wetter rund um die Uhr. So spüren die Meteorologen kleinste Veränderungen auf, verfolgen ihre Entwicklung und ändern gegebenenfalls ihre Vorhersage entsprechend. Die meteorologischen Daten werden in numerische Modelle eingespeist – komplexe Abbilder der Gesetzmäßigkeiten, die die Wetterentwicklung beeinflussen. Mit ihrer Hilfe lässt sich dann errechnen, wie sich die aktuelle Situation in der Zukunft entwickeln wird – ob beispielsweise in Tief über Island zum Sturm heranwächst oder nicht.

Ist klar, dass ein Sturmtief im Anmarsch ist, geben die Wetterzentralen offizielle Sturmwarnungen aus. Auf Karten im Internet ist dann markiert, welche Gebiete in Deutschland betroffen sind und wie stark der Sturm voraussichtlich ausfallen wird. Für die Bewohner der meisten betroffenen Gebiete bedeutet dies: Gegenstände sichern, Häuser und Dächer kontrollieren und im Haus bleiben. Während eines Sturms ist dies sicherer, als beispielsweise zu Fuß oder im Auto unterwegs zu sein. Denn die meisten Toten und Verletzten werden Opfer umstürzender Bäume oder umhergewehrter Trümmer und Objekte.

---

# Sturmfluten – wenn das Wasser kommt

# 14

Dieter Lohmann und Nadja Podbregar

Der Sturm brüllt, meterhohe Wellen türmen sich auf – die Flut kommt. Schon seit Menschengedenken erleben Küstenbewohner immer wieder Sturmfluten, müssen mit überschwemmten Feldern und Weiden, ertrunkenem Vieh und vollgelaufenen Häusern rechnen. Bis heute sorgen Sturmfluten immer wieder für tausende Todesopfer und Sachschäden in Milliardenhöhe. Und in Zukunft könnten sich solche Naturkatastrophen mehren. Denn der steigende Meeresspiegel und die zunehmenden Stürme sorgen gleich doppelt dafür, dass Sturmfluten häufiger und höher ausfallen.

---

## Die große Flut: „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 Elbemündung 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 Elbemündung fällt der Pegel aus, der Wasserstand kann nur noch geschätzt werden. Eines ist klar: Auch



Überschwemmung im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg bei der Sturmflut 1962  
(© Gerhard Pietsch/CC-by-sa 3.0)

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 soweit: 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 erwischt es schließlich den nördlichen Deich des Stadtteils Wilhelmsburg. In rasender Geschwindigkeit strömen die Wassermassen durch die neu entstandene Lücke im Schutzwall: Die Elbinsel versinkt. 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 Unterschlupf 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.

---

## Ursachen: Wenn Flut und Wind sich treffen

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 sechs Stunden lang läuft die Flut auf, bis die Pegel der Messstationen die höchsten Stände beim Gezeitenhochwasser melden. Anschließend folgt die Ebbe, das Wasser läuft wieder ab. Der höchste Wasserstand wird also ungefähr alle zwölf Stunden erreicht. Bei diesem ewigen Wechselspiel schwankt der Wasserspiegel an der Nordsee um rund zwei bis vier Meter, an der kanadischen Bay of Fundy kann der sogenannte Tidenhub jedoch auch schon mal unglaubliche 16 Meter be-

tragen. Was jedoch lässt diesen Routinebetrieb, der maßgeblich durch die Anziehungskräfte von Sonne und Mond gesteuert wird, über alle Maßstäbe und Pegel steigen? 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 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-, Nordwest- und Westwinde, die zur Gefahr werden können: Winde aus diesen Richtungen türmen in der Deutschen Bucht mitunter einen enormen Wasserberg vor sich auf. Wie hoch dieser sogenannte 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 bei einer solchen Naturkatastrophe können darüber hinaus auch Stürme und Tiefdruckgebiete weit draußen auf dem offenen Ozean. Denn sie erzeugen zusätzliche Wasserberge, die als sogenannte 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 hinzu, dass die aufgewühlte Nordsee, der Blanke Hans, die Deiche auf die Probe stellt. Schließlich gibt es noch den Effekt der Springflut: Jeweils bei Vollmond und Neumond stehen Erde, Mond und Sonne in einer Linie, diese Konstellation bewirkt eine höher auflaufende Flut. Treffen Windstau, Fernwelle, Oberflächenwellen und Springflut zusammen, dann sind sogar alle Voraussetzungen für eine Rekordflut gegeben. 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.

## Wenn tropische Wirbelstürme das Meer treiben

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 Bengalen 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 zeigte sich unter anderem am 12. September 2008.

Die Stadt Galveston im US-Bundesstaat Texas, an der Küste des Golfs von Mexico: Nur noch Stunden sind es, bis der Hurrikan Ike mit Windgeschwindigkeiten von über 200 Kilometer pro Stunde auf das Festland treffen wird. Der Sturm treibt gewaltige Wassermassen vor sich her auf die Küste zu und droht, 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 Galveston 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 soweit: Die Wellen überspülen das wichtigste Bollwerk der Stadt, den mehr 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 metertief unter Wasser. Per Helikopter 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, hunderttausende Bewohner der Region



Galveston, Texas: Überschwemmung nach einer von Hurrikan Ike ausgelösten Sturmflut im Jahr 2008 (© FEMA/Jocelyn Augustino)

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.

Sehr viel mehr Todesopfer und Schäden hinterlassen Sturmfluten allerdings entlang der Küsten der Entwicklungsländer. Besonders betroffen ist immer wieder Bangladesch, denn dort liegen weite Landflächen unter oder nur sehr knapp oberhalb des Meeresspiegels. Im Jahr 1970 überrollten bei einem Wirbelsturm bis zu zehn Meter hohe Wellen die flachen Küstenebenen und setzten riesige Flächen unter Wasser. 300.000 beziehungsweise 500.000 Menschen – so genau weiß das niemand – sollen damals in Bangladesch und Indien 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 Einheimische das Leben koste-



te. Die Gesamtschäden lagen bei rund drei Milliarden US-Dollar. Und noch ein Aspekt macht den Sturmflutexperten Sorgen: die zunehmende 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 voraussichtlich sogar zwei Drittel der Weltbevölkerung sein. Einige Wissenschaftler rechnen deshalb künftig bei Sturmfluten mit viel größeren Sachschäden – und mit noch mehr Todesopfern.

---

## **Landschaftsgestalter: 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 Dünen 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 Gegen-

satz 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 vermutlich aber 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 schmaler wird und schließlich in mehrere Teile zerbricht.

---

## **Küstenschutz: 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 tausend Jahren gab es die ersten dieser Klassiker unter den Schutzbauten. Bei den sogenannten 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 Manndrenke“ von 1362 und bei der „Nordstrandflut“ von 1634 trotz der Deiche tausende von Menschen um. Der legendäre Ort Rungholt, ganze Inseln und weite Küstenbereiche verschwanden im Meer, die Fluten prägten die Küstenlinie bis heute. Deshalb wurden die Deiche seitdem immer wieder verstärkt und erhöht, um den Schutz der dahinter liegenden 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 Schafe als „lebende Rasenmäher“ 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 sogenannten 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 sie eine schwere Sturmflut überströmt oder wenn Wellen über sie hinweg schwappen. Fast alle Deichbrüche entstehen dadurch, dass eingedrungenes 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, wenn man bedenkt dass der Bau von zehn Meter neuem Deich in heimischen Gefilden 30 bis 40.000 Euro kostet – mindestens. Und auch jetzt fließen in Deutschland noch jährlich



Die Thames Barrier soll London und die Themse bei einer Sturmflut vor Hochwasser schützen (© Andy Roberts/CC-by-sa 3.0)

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 Dünen, 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 Unbilden 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.

## **Könige des Küstenschutzes – die Niederlande und das Deltaplanprojekt**

„Trendsetter“ und weltweiter Vorreiter in Sachen Sturmflutschutz sind schon lange die Niederlande. Nicht ohne Not allerdings, denn rund ein Fünftel des Staatsgebiets liegt unter dem mittleren Meeresspiegel und insgesamt 60 Prozent weniger als einen Meter über Normalnull. Selbst ein moderater Meeresspiegelanstieg in den nächsten hundert Jahren würde ohne ausreichendes Schutzsystem demnach die Existenz des ganzen Landes gefährden.

Im Rahmen des Deltaplan-Projektes, das nach der verheerenden Sturmflut von 1953 ins Leben gerufen wurde, ließ die niederländische Regierung den gesamten Mündungsbereich von Rhein, Maas und Schelde durch Sperrwerke und Dämme von der Nordsee abriegeln. Die Flüsse hatten hier im Lauf der Jahrhunderte tiefe Risse ins Küstengebiet geschnitten, in die das Wasser bei einer Sturmflut problemlos eindringen konnte. Immer wieder wurden dabei Polder und Landflächen überschwemmt, die vorher zum Teil mühsam dem Meer abgerungen worden waren. Berühmt geworden innerhalb des Deltaplan-Projektes ist vor allem das Abschlusswehr an der Oosterschelde, das im Jahr 1986 fertig gestellt wurde. Dieses Sturmflutwehr besteht aus mehr als 60 gewaltigen Betonpfeilern, zwischen denen bewegliche Stahlschütze aufgehängt 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.

Alle Schutzbauten innerhalb des Deltaplanprojektes sind so bemessen, dass sie selbst einer Jahrtausendflut oder einem deutlichen Meeresspiegelanstieg problemlos standhalten können. 4,5 Milliarden Euro haben die Niederländer sich diese Sicherung des eigenen Landes im Laufe von knapp 50 Jahren kosten lassen. 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 ihren Hafen vor Überschwemmungen. So hoch wie der Eiffelturm 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.

## 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 auch rechtzeitig geschieht, dafür sorgen unter anderem die Wissenschaftler des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Sturmflutwarndienst am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg. Die Seemeteorologen des DWD sitzen dabei quasi Tür an Tür mit der Sturmwarnzentrale des BSH. Vier Mal am Tag geht der Dienst habende Wissenschaftler des BSH persönlich zu seinen DWD-Kollegen, um die Lage zu besprechen. Im Gepäck hat er dann hoch aufgelöste Windvorhersagen für die Zeiten von Hoch- und Niedrigwasser, die in die Berechnungen der Wasserstände zusammen mit aktuellen Pegelständen einbezogen werden. Parallel dazu werden die Computermodelle des BSH ständig mit Wetterdaten aus der DWD-Zentrale in Offenbach 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. Das 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 3 Meter über mittlerem Hochwasser eintreten.“ Wird eine offizielle Sturmflutwarnung herausgegeben, sind die Mitarbeiter der regionalen Ämter entlang der Küste auf ihren Posten. Wenn sich ein Sturm nähert und die Wasserstände zu steigen beginnen, stehen die örtlichen Sturmflut-Bereitschaftsdienste sogar nachts und am Wochenende parat. Ständig kontrollieren sie die Wasserstandsmeldungen der umliegenden Küstenabschnitte.

Ab einer bestimmten Höhe werden Sperrwerke, wie beispielsweise das Eidersperrwerk in der Nähe von Büsum, geschlossen. Freiwillige, aber auch die Feuerwehr, beobachten gezielt besonders gefährdete Stellen der Deiche. 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 Privatleute setzen dann alles daran, gefährdete Deichabschnitte zu verstärken. Droht ihre Mühe vergebens zu sein, müssen Mensch und Tier in den bedrohten Gegenden evakuiert werden.

---

## Sturmfluten im Zeichen des Klimawandels

In den letzten Jahren verursachten Flutkatastrophen weltweit einen Schaden von rund sechs Milliarden Dollar im Jahr – Tendenz steigend. Denn steigende Meeresspiegel, aber auch eine immer dichtere Besiedlung der küstennahen Ballungsräume sorgen dafür, dass Überschwemmungen immer schwerwiegendere Folgen nach sich ziehen. Gleichzeitig sorgt der Klimawandel dafür, dass starke Wirbelstürme häufiger auftreten – und damit auch die von ihnen ausgelösten Sturmfluten. Anfang 2013 untersuchte ein französisch-britisches Forscherteam, welche jährlichen Schäden die 136 größten Küstenstädte der Welt im Jahr 2050 zu erwarten haben – dann, wenn der Klimawandel noch spürbarer wird als jetzt.

Dazu spielten Stephane Hallegatte vom französischen Zentrum für Umwelt- und Entwicklungsforschung CIRED und seine Kollegen in einem Computermodell verschiedene Szenarien durch: In einem Fall berücksichtigten sie lediglich sozioökonomische Faktoren – sprich das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum der Stadt. Denn wo mehr Menschen leben und mehr Wohlstand herrscht, so die Logik, richtet eine Flut auch einen größeren wirtschaftlichen Schaden an. In einem zweiten Szenario gingen die Forscher zusätzlich von einer Absenkung einiger Küstenregionen um 40 Zentimeter bis 2050 aus, wie es geologische Modelle besagen. Im dritten und vierten Szenario ließen sie darüber hinaus den Meeresspiegel entsprechend den aktuellen Klimaprognosen um 20 respektive 40 Zentimeter ansteigen.

Die Auswertungen ergaben: Schon allein das Wachstum der Küstenmetropolen könnte bis zum Jahr 2050 die wirtschaftlichen Schäden durch Überschwemmungen auf 52 Milliarden Dollar jährlich treiben – auf das Neunfache des heutigen Durchschnittswerts. Bezieht man außerdem die steigende Flutgefahr durch den Meeresspiegelanstieg und Bodensenkungen mit in die Rechnung ein, sind Kosten von mehr einer Billion Dol-

lar zu erwarten. Und das, obwohl in den Prognosen nur Schäden durch Flutkatastrophen enthalten waren, nicht aber solche durch andere Extremwetterereignisse wie beispielsweise Wirbelstürme. „Passen sich die Städte nicht an die neue Gefahr an, sind die Auswirkungen dieser Umweltfaktoren viel größer als die der sozioökonomischen Veränderungen“, warnen die Forscher.

Und selbst mit Schutzmaßnahmen, die zumindest dafür sorgen, dass das Meer nicht häufiger über die Deiche vordringt als heute, würden die Kosten dennoch auf bis zu 63 Milliarden Dollar pro Jahr ansteigen. „Es ist daher entscheidend, dass wir uns auf größere Katastrophen vorbereiten, als wir sie heute kennen“, betonen Hallegatte und seine Kollegen. Für die betroffenen Städte heißt das: Sie sollten möglichst schnell ihre Schutzwälle erhöhen und Notfallpläne erarbeiten. Diese Vorsorge kostet jede Stadt zwar geschätzt eine dreistellige Millionensumme pro Jahr. Aber wenn die Sturmflut die Deiche überrennt, ist der Schaden umso größer. „Die Welt wird nicht mehr Flutkatastrophen erleben. Aber jede der Flutkatastrophen wird aufgrund der Absenkung des Bodens und des Anstiegs des Meeresspiegels zerstörerischer sein, selbst bei besseren Schutzvorkehrungen“, konstatieren die Forscher.

Und auch für Deutschland sehen die Prognosen der Klimaforscher eine wachsende Sturmflutgefahr. Simulationen des Küstenklimas zeigen, dass beispielsweise die Stürme über der Nordsee bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich heftiger werden könnten. Dies gilt insbesondere für den Wind aus West und Nord – also genau den Richtungen, aus denen Stürme die Wassermassen besonders stark an die deutsche Nordseeküste drücken. Sturmfluten könnten deshalb in einigen Jahrzehnten durchschnittlich etwa zehn bis 30 Zentimeter höher auflaufen als dies gegenwärtig der Fall ist, wie Wissenschaftler des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht ausrechneten. Hinzu kommt, dass der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee bis zum Ende dieses Jahrhunderts um weitere 50 Zentimeter zulegt. Sind die Simulationen der Klimaforscher korrekt, könnten Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste daher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts insgesamt rund 60 bis 80 Zentimeter höher ausfallen als heute. Das aber bedeutet, dass der Küstenschutz auch an den deutschen Küsten wahrscheinlich bald nachgerüstet werden muss.



---

# Gefährliche Fluten – Hochwasser und Überschwemmungen

# 15

Nadja Podbregar

Gebrochene Deiche, überschwemmte Städte und Landstriche, unterbrochene Verkehrsverbindungen – das Hochwasser im Juni 2013 versetzte halb Mitteleuropa über Wochen in den Ausnahmezustand. Aber auch außerhalb Europas gibt es immer wieder dramatische Überschwemmungen, vor allem in China, Pakistan und Bangladesch sterben dabei teilweise tausende von Menschen. Und es kommt noch schlimmer: Der Klimawandel könnte künftig sehr viel häufiger zu Jahrhundert-Hochwassern führen. Für den Hochwasserschutz bedeutet dies: Neue – und viele altbewährte – Maßnahmen müssen verstärkt werden, um den Wassermassen auch in Zukunft Einhalt zu gebieten.

---

## Land Unter in Mitteleuropa: Das Hochwasser vom Juni 2013

Der Juni 2013 begann mit einer wahren Sintflut: Innerhalb von vier Tagen fielen enorme Regenmengen im Alpenraum und dem südlichen Mitteleuropa. Bis zu 400 Millimeter Niederschlag in vier Tagen registrierten die Meteorologen in einigen Gebieten. Am stärksten war der sintflutartige Regen dort, wo Wolken sich an den Nordrändern der Mittelgebirge und der Alpen stauten. Laut Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes fielen allein in den Bundesländern Bayern, Sachsen, Thüringen und Hessen zwischen dem 30. Mai und dem 2. Juni insgesamt 13,4 Milliarden Kubikmeter Regen. Als Folge traten Weser, Donau, Elbe, Main und Rhein und zahlreiche weitere Flüsse über die Ufer. In den Mittelgebirgen



Hochwasser im Sommer 2013 in Passau: Teile der Innenstadt sind überschwemmt  
(© High Contrast/CC-by-sa 3.0)

und den Alpen lösten Sturzfluten Überschwemmungen aus, viele Tal-sperren mussten Wasser ablassen. Als die Hochwasserwelle nach Norden schwappte, löste sie auch dort umfangreiche Überschwemmungen aus.

In Passau erreichte das Hochwasser am Zusammenfluss von Donau, Inn und Ilz am Abend des 3. Juni einen Rekordpegel von 12,89 Meter. Dies löste in der Stadt die schwerste Überschwemmung seit fünfhundert Jahren aus. Nahe dem bayrischen Ort Deggendorf brachen sowohl Deiche der Isar als auch der Donau und überschwemmten die Niederung. In Fischbeck in Sachsen-Anhalt drückten die Wassermassen so stark gegen den Deich, dass der Deich auf einer Länge von zehn Metern zunächst riss, dann durch die einschießenden Fluten schnell auf 50 Meter ausgeweitet wurde. Der Ort wurde komplett überschwemmt, die rund 500 Einwohner wurden evakuiert. Kurz zuvor war bereits am Zusammenfluss

von Saale und Elbe ein Deich gebrochen, ein mehrere Quadratkilometer großes Gebiet wurde überschwemmt. In Magdeburg erreichten die Pegel einen historischen Rekordwert von 7,46 Metern. Schon zuvor waren rund 23.000 Menschen aus den gefährdeten Stadtteilen evakuiert worden. Die Wassermassen unterbrachen zudem auf mehreren Fern- und Regionalstrecken den Zugverkehr. Die ICE-Verbindung Hannover-Berlin blieb über Monate gesperrt, weil das Hochwasser eine Brücke destabilisiert hatte.

Insgesamt waren von diesem Hochwasser mehr als 40 Prozent des deutschen Gewässernetzes betroffen. Im Gegensatz zur Elbeflut im Jahr 2002 hatten nahezu alle Flüsse Pegelhochstand. Die Schäden durch Überschwemmungen und Deichbrüche beliefen sich allein in Deutschland auf mehr als 6 Milliarden Euro, in Österreich, Tschechien und der Schweiz kamen noch einmal etliche Millionen hinzu. In Bezug auf die betroffenen Gebiete übertraf das Junihochwasser 2013 das Augusthochwasser von 2002 deutlich. Es war in dieser Hinsicht die größte Hochwasser-Katastrophe seit mehr als 50 Jahren. Experten stufen das Ereignis als Jahrhunderthochwasser ein: Sowohl das Ausmaß der Niederschläge als auch des Hochwassers kommen statistisch gesehen nur alle hundert Jahre einmal vor.

Die Ursache dieses Ausnahmehochwassers war eine Verkettung mehrerer unglücklicher Umstände: Ein nasses Frühjahr und ein großes Tiefdruckgebiet mit heftigen Regenfällen über Mitteleuropa spülten mehr Wasser in die Flüsse ein, als diese halten konnten. Denn schon der Mai 2013 war ungewöhnlich nass. In einigen Gebieten Mitteleuropas zählte er zu den niederschlagsreichsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Dadurch aber waren die Böden in den betroffenen Gebieten bereits durchnässt. Ihre Pufferkapazität war voll ausgeschöpft, sie waren mit Wasser bereits gesättigt, wie eine Studie des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) zeigt: Ende Mai wiesen 40 Prozent der Landesfläche Deutschlands neue Bodenfeuchterekorde auf. Statt wie ein Schwamm oder Puffer einen Teil des Regens zu speichern, konnte der Untergrund daher in den meisten Regionen kein zusätzliches Wasser mehr aufnehmen.

Doch Ende Mai und Anfang Juni zog erneut ein umfangreiches Tiefdruckgebiet über Mitteleuropa herein. Oder wie die Meteorologen es formulieren: Ein Tiefdruckkomplex wurde gefolgt von einer 5b-Wetter-

lage, die feuchtwarme Luft aus dem Südosten nach Mitteleuropa brachte. Das hatte Folgen: Es regnete heftig und anhaltend in Deutschland, Tschechien, Österreich und der Schweiz – vor allem dort, wo Wolken sich an den Nordrändern der Mittelgebirge und der Alpen stauten. Doch der schon gesättigte Boden konnte diese zusätzlichen Wassermassen nicht mehr aufnehmen. Die Konsequenz: Der größte Teil der Niederschläge floss direkt über Bäche und Kanäle in die Flüsse ab – und ließ dadurch die Pegel rasant ansteigen. „Insbesondere die Kombination mit den äußerst ungünstigen Vorbedingungen – der Boden konnte die neuerlichen Niederschläge nach einem sehr feuchten Mai nicht mehr aufnehmen – führte zu diesem extremen Hochwasserereignis“, erläutert Bernhard Mühr vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

---

## **Weltweites Phänomen**

Aber katastrophale Hochwasser wie das im Juni 2013 an Weser, Donau, Elbe, Main, Rhein und zahlreichen Nebenflüssen sind dennoch keine Überraschung. Mit ihnen muss man immer rechnen – und sich entsprechend vorbereiten. Denn Hochwasser gibt es schon so lange es Flüsse gibt – und wird es vermutlich auch immer wieder geben. Und 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.

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 3000 Tote wurden 1998 gemeldet, 21,2 Millionen Hektar Ackerland verschwanden unter den Wassermassen. Allein die direkten Schäden beliefen sich damals auf circa 50 Milliarden Euro. 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.

---

## Die Ursachen: Stürme, Regen und Schneeschmelze

Die Ursachen für verheerende Überschwemmungen sind vielfältig. Vor allem an den Küsten des Pazifik und Indischen Ozeans treten sie oft auf, 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, oft brechen die Flussdeiche als Folge. Gleichzeitig bringen die Stürme enorme Regenmengen mit sich, die sich dann nach dem Landfall über die betroffene Regionen ergießen. So verursachte der Taifun Haiyan im November 2013 in Vietnam und China zahlreiche Überschwemmungen durch den ihn begleitenden Starkregen.

Entlang vieler Flüsse wird es aber auch dann brenzlig, wenn mächtige Tiefdruckgebiete ungewöhnlich heftige Regenfälle mitbringen – wie im Juni 2013 in Mitteleuropa der Fall. Ein ähnlicher Rekordregen bescherte auch Pakistan im Sommer 2010 die schwersten Überschwemmungen seiner Geschichte. Knapp 20 Millionen Menschen waren betroffen, mehr als 1500 starben. Ein Fünftel des Landes stand unter Wasser und viele Gebiete waren nur noch aus der Luft erreichbar. Ursache für die Katastrophe war ein extrem starker Monsun, der sintflutartige Regenfälle mit sich brachte. Sie gelten als die stärksten der letzten 80 Jahre. Besonders gefährlich wird es jedoch, wenn Rekordniederschläge und eine Schneeschmelze zusammen auftreten. Wie auf einer überfüllten Autobahn kommt es zum Stau: Die Fluten werden nicht schnell genug abtransportiert und die Wasserstände steigen bedrohlich. Deshalb häufen sich Flusshochwasser oft im Frühjahr, wie beispielsweise am Rhein. Dann sind selbst breite Ströme schnell überfordert.

Ob es aber schließlich tatsächlich zu einem gefährlichen Hochwasser und möglicherweise sogar zu großflächigen Überschwemmungen kommt, hängt auch dann noch von mindestens zwei weiteren 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 beispielsweise: 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.

---

## **Wann wird ein Hochwasser zur Katastrophe?**

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. Ein Beispiel ist die Indus-Kultur: Scheinbar aus dem Nichts entstanden im fruchtbaren Becken des Indusstroms um 2600 vor Christus plötzlich große Städte mit mehreren tausend Einwohnern. Verantwortlich für die Fruchtbarkeit in dieser Region waren damals das Gletscher-Schmelzwasser aus dem Himalaya und der Monsun. Sie sorgten regelmäßig für Sturzfluten, die die Flussufer überschwemmten und für Wassernachschub sorgten. Wie Forscher im Jahr 2013 herausfanden, konnte die Indus-Kultur vermutlich erst entstehen, als ein Klimawechsel die heftigen Sturzfluten entlang des Indus und seiner Nebenflüsse etwas mäßigte, es aber immer noch ausreichend Überschwemmungen gab, um den Boden entlang der Flussufer fruchtbar zu machen.

Zur todbringenden Gefahr werden Hochwasser erst dann, wenn der Mensch Gebiete besiedelt, die in Gefahr sind, überschwemmt zu werden. So sorgen Überflutungen an Flüssen wie Yangtse und Brahmaputra oder Ganges immer öfter für Milliarden Schäden 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 Mega-



Teilweise überschwemmte Rheinaue in Duisburg-Walsum. Solche natürlichen Pufferzonen gibt es an den meisten Flüssen kaum noch (© Stefan Petri/CC-by-sa 3.0)

städte 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.

Die Gefahr von Überschwemmungen steigt aber auch, wenn der Mensch 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. 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 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.

---

## **Mehr Wetterextreme, mehr Jahrhundertfluten?**

„Wie groß eine Hochwasserkatastrophe auch sein mag, es wird immer noch größere geben“ – Diese Weisheit des amerikanischen Präsidenten Truman aus dem Jahre 1950 könnte sich in Zukunft immer häufiger bewahrheiten. Denn die globale Erwärmung fördert sowohl Starkregen als auch Stürme und das Abtauen der Gletscher – und damit Faktoren die den Wasserstand vieler Flüsse beeinflussen. So zeigte eine Studie im Sommer 2013, dass der Klimawandel den indischen Monsun unberechenbarer machen wird. Von einem Tag auf den nächsten schwankt das Wetter dann stärker als bisher. Einem sintflutartigen Regen kann dann Trockenheit



folgen. Die Regelmäßigkeit des Monsuns, mit der indische Bauern die Bewässerung ihrer Felder bisher planen, könnte bald ein Ende haben. Gleichzeitig kann dies auch die Häufigkeit von Sturzfluten und Überschwemmungen steigern, denn wenn dann Regen fällt, dann ist es umso mehr auf einmal.

Aber auch Regionen, die im Schatten der Hochgebirge liegen und einen Großteil ihres Wassers aus dem Abfluss der Gebirgsgletscher bekommen, könnte die Folgen des Klimawandels zu spüren bekommen: Zehn der größten Ströme Asiens, darunter Ganges, Indus, Brahmaputra und Yangtse, werden beispielsweise vom Schmelzwasser des Himalaya gespeist. Mehr als 1,3 Milliarden Menschen – ein Fünftel der Weltbevölkerung – leben im Einzugsgebiet dieser Flüsse. Aber ausgerechnet in den Gebirgen macht sich die globale Erwärmung besonders stark bemerkbar. Dadurch schmelzen die Gletscher immer schneller und stärker. Das aber könnte – zumindest solange die Weißen Riesen noch existieren, ebenfalls zu einer Zunahme der Hochwasser führen. Denn das Schmelzwasser nimmt zu und wird vor allem im Frühjahr die Gletscherflüsse ansteigen lassen.

Hinzu kommt: Im Himalaya sammelt sich das Schmelzwasser der Gletscher oft in Gletscherseen, die nur durch eine Barriere aus Eis und zusammengefrorenem Geröll daran gehindert werden, ihre Wassermassen in die Täler zu ergießen. Allein in Bhutan gibt es mehr als 2600 solcher Gletscherseen in mehreren tausend Metern Höhe. In Nepal oder Tibet sind es noch viel mehr. Nimmt die Gletscherschmelze zu, schwelen diese ohnehin gewaltigen Wasserreservoirs immer weiter an. Gleichzeitig droht die Eisbarriere durch die steigenden Temperaturen instabil zu werden. Bricht ein solcher Damm, entleeren sich diese Gletscherseen innerhalb kurzer Zeit und die Wassermassen rasen als todbringende Sturzfluten bergab. Viele hundert Meter tiefer in den fruchtbaren Tälern zerstören sie dann alles, was sich ihnen in den Weg stellt.

Aber auch bei uns in Mitteleuropa könnte der Klimawandel künftig vermehrt Überschwemmungen bringen. Denn bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sagen Klimaforscher deutlich feuchtere Winter mit teilweise 20 bis 30 Prozent mehr Niederschlag vorher. Viele dieser Niederschläge werden den Prognosen zufolge als Starkregen fallen und damit das Hochwasserrisiko noch zusätzlich erhöhen. Liegen die Klimawissenschaftler mit ihren Modellrechnungen richtig, könnten deshalb Jahrhundertfluten

wie 2013 in Zukunft viel häufiger auftreten. Für den Alpenraum errechneten Forscher vor einigen Jahren: Wenn die globalen Temperaturen um zwei Grad Celsius ansteigen, dann könnten Jahrhundertfluten zukünftig fünf Mal häufiger auftreten als bisher. Schon jetzt zeigten die Daten eine größere Häufigkeit starker Überschwemmungen in den letzten Jahren.

---

## **Hochwasserschutz: Auen, Deiche, Polder und Co**

Hochwasser hat es zu allen Zeiten gegeben und wird es immer geben. Was aber kann man tun, um das Schlimmste zu verhindern? Anlässlich des Jahrhundert-Hochwassers von 2013 haben dies Wissenschaftler des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) noch einmal genauer untersucht. Sie warnen allerdings vor der Illusion, es sei möglich, die Schäden der Fluten praktisch auf Null zu reduzieren, wenn nur genug investiert werden würde. „Wir können uns vor Hochwasser nicht vollständig schützen. Es wird immer ein Restrisiko von Schäden beispielsweise durch Deichbrüche geben“, konstatieren die Forscher. Der Gedanke eines hundertprozentigen Hochwasserschutzes sei genauso irreführend wie der Gedanke, dass zukünftig Schäden vermieden werden könnten, wenn Planfeststellungsverfahren beschleunigt und die Bürgerbeteiligung beschränkt werde.

Die Forschergruppe aus Ökonomen, Geographen und Landschaftsplaner schlägt in ihrer Studie vor, die zukünftige Hochwasservorsorge auf vier Säulen zu stellen, um Schäden so gering wie möglich zu halten und Lasten gerecht zu verteilen. Die erste Säule ist der technische Hochwasserschutz: Deiche, Schutzmauern und mobile Wälle sind ein wichtiger unmittelbarer Schutz gerade für gefährdete, niedrig liegende Städte und Ortschaften. Allein in Sachsen wurde seit der Flutkatastrophe 2002 über eine halbe Milliarde Euro in den technischen Hochwasserschutz investiert. Bis 2020 sind insgesamt rund eine Milliarde Euro für Betonmauern, Spundwände, Deiche etc. geplant. Kommunen und Bewohner erhoffen sich davon, dass ihre Siedlungen künftig besser oder gar vollständig geschützt wären.

Forscher der Universität Karlsruhe haben beispielsweise Bürgersteige entwickelt, die sich bei Hochwassergefahr zum Schutz gegen die Fluten aufrichten lassen. Das Prinzip ist einfach: Die ein oder zwei Me-

ter 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 Sandsackabdichtung 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.

Mindestens ebenso wichtig ist die zweite Säule des Hochwasserschutzes: mehr Raum für Flüsse. Deutschlandweit sind inzwischen zwei Drittel der ehemaligen Überschwemmungsgebiete durch Deichbau und andere Hochwasserschutzmaßnahmen verloren gegangen. An den großen Strömen wie Rhein, Elbe, Donau und Oder ist die Situation zum Teil noch drastischer. Mitunter stehen an vielen Abschnitten nur noch zehn bis zwanzig Prozent der ehemaligen Auen als Überschwemmungsflächen zur Verfügung. Viele der ursprünglichen Auen sind durch Deiche isoliert, um sie zu reaktivieren, müssen daher Deiche rückverlegt werden. Das ist allerdings sehr aufwendig. Denn neben den rein baulichen Maßnahmen muss zunächst geklärt werden, wem die dann später im Überschwemmungsgebiet liegenden Flächen gehören, und die betroffenen Bauern müssen Austauschflächen bekommen oder entschädigt werden. Das erste umgesetzte, großflächige Projekt dieser Art ist die Deichrückverlegung des Roßlauer Oberluchs bei Dessau im Biosphärenreservat Mittel Elbe. Im Rahmen einer Deichrekonstruktion wurde hier nach mehr als zehn Jahren Vorbereitung im Jahr 2006 eine Überschwemmungsfläche von rund 140 Hektar durch das Land Sachsen-Anhalt reaktiviert.

Gleichzeitig greift der Hochwasserschutz auch auf künstliche Flutpolder zurück. Hierzu wird ein großer Uferbereich vollständig eingedeicht und bei Bedarf über Zuleitungen geflutet. Dadurch ahmen diese Rückhaltebecken den wasserspeichernden Effekt natürlicher Auen nach. Die gesteuerte Überflutung großer Flächen zapft einiges Wasser aus den Hochwasser führenden 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.

Nach dem Willen der IKRS – einer länderübergreifenden Kommission zum Schutz des Rheins – sollen allein entlang dieses Flusses bis 2020 insgesamt 1000 Quadratkilometer Überflutungsflächen geschaffen werden. Im Vergleich zu heute würde dadurch der Pegel von Extremhochwassern bis zu siebenzig Zentimeter gesenkt, so die Schätzungen von Experten. Ein ehrgeiziges Ziel, das hohe Investitionen erfordert. Allein der Bau eines Polders am Oberrhein hat 25 Millionen Euro gekostet.

---

## **Risikogebiete: Das Problem der Bebauung**

Der beste Weg aber, um eine Hochwasser-Katastrophe zu verhindern, ist es, von Überschwemmungen gefährdete Gebiete gar nicht erst zu besiedeln. Ein 2005 in Deutschland in Kraft getretenes Gesetz schränkt daher die Nutzung von durch Überflutung bedrohten Flächen stärker ein als zuvor. 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. Im Wasserhaushaltsgesetz werden potenziell Betroffene dazu aufgefordert, „geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor Hochwassergefahren und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen nachteiligen Folgen für Mensch, Umwelt oder Sachwerte durch Hochwasser anzupassen“. Allerdings: In der Praxis greift diese Forderung bisher nur wenig.

Hinzu kommt: Wer schon in einem gefährdeten Gebiet wohnt, dem hilft dies nicht viel. Die Forscher des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung fordern daher als dritte Säule des Hochwasserschutzes, die private Bauvorsorge stärker zu fördern. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise für Hausbesitzer zinsgünstige Kredite bereitgestellt werden, die aber an eine dem Hochwasser angepasste Bauweise bzw. Sanierung gebunden sind. Diese finanzielle Hilfe könnte es dann auch weniger Begüterten ermöglichen, ihre Häuser besser gegen Überschwemmung zu wappnen. Und noch etwas soll den Betroffenen künftig helfen: Als Vierte Säule empfehlen die UFZ-Forscher eine Pflichtversicherung für Hauseigentümer in gefährdeten Gebieten. Das bedeutet zwar eine etwas höhere Belastung durch die Beiträge, zahlt sich aber im Katastrophenfall buchstäblich aus.

Zurzeit ist zwar etwa jedes dritte Gebäude gegen Elementarschäden versichert, wie die Forscher berichten. Allerdings gelten 1,4 Prozent immer noch als „unversicherbar“, weil sie in Gebieten liegen, die statistisch alle zehn Jahre überflutet werden. Damit hat etwa eine Million Menschen keine Chance auf einen regulären Versicherungsschutz. Doch selbst durch eine Kombination von technischer, natürlicher und privater Hochwasservorsorge können nicht alle Schäden vermieden werden – es verbleibt ein Restrisiko. Soforthilfen wie das jetzige Acht-Milliarden-Programm von Bund und Ländern lindern das Leid. Sie helfen aber nicht, das Problem an den Wurzeln zu packen. Nach Ansicht der Forscher ist es daher dringend nötig, eine Möglichkeit zu schaffen, auch für die bisher durch das Raster fallenden Betroffenen eine Chance zur Versicherung zu schaffen. Gleichzeitig könnte dies einen Anreiz für eigenständige Vorsorgemaßnahmen schaffen – wenn beispielsweise die Prämie beim Nachweis solcher Vorbeugungsmaßnahmen sinkt.

---

## 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 Hochwasserereignisse herauszugeben. Längst hat aber auch Deutschland in diesem Bereich nachgezogen. Die Wetterdienste, aber auch spezielle Hochwasserschutzzentralen überwachen ständig die Pegelstände der Flüsse. Bei steigenden Fluten schlagen sie rechtzeitig Alarm und geben Anrainern und Katastrophenschutz 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 dabei heute wesentlich genauer als die Frühwarnungen bei anderen Naturkatastrophen wie Tornados oder Vulkanausbrüchen. Denn dafür sind nur die Messung der Pegelstände, eine halbwegs genaue Wettervorhersage und die Kenntnis der jeweiligen Fließdynamik der Gewässer nötig. Am Rhein ist dieses Vorhersagenetz beispielsweise 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 Hochwasserschutzzentralen 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 zu meist 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 langanhaltenden 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 seinen Nebenflüssen. Minutengenau können die aktuellen Wasserstände von jedermann übers 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 liegt sie inzwischen bei mehr als sechsunddreißig Stunden, am Rheindelta sind es sogar drei Tage.

Für Vorbeugung und Frühwarnung aber gilt: Das alles ist teuer und kostet viel Geld, das hier in Mitteleuropa zwar vorhanden ist, nicht aber in den viel stärker betroffenen Entwicklungsländern. Sie können schon aus Kostengründen beim Hochwasserschutz nicht auf Hightech-Strategien setzen. 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.

---

# Sachverzeichnis

## A

Abbruchkante, [101](#), [121](#)  
Aborigines, [129](#)  
Alpen, [115](#), [118](#)  
Armada, [2](#)  
Armero, [71](#)  
Asche, [79](#), [87](#)  
Aschewolke, [46](#)  
Ätna, [58](#), [59](#)  
Atomkatastrophe, [28](#)  
Auen, [199](#), [203](#)  
Auge, [149](#)  
Auslöser, [104](#)  
Ausnahmezustand, [180](#)  
Australien, [129](#), [134](#)  
Azoren, [58](#), [169](#)

## B

Banda Aceh auf Sumatra, [26](#)  
Bangladesch, [184](#)  
Basaltschicht, [91](#)  
Bauen  
    erdbebensicheres, [22](#)  
    hurrikansicheres, [158](#)  
Bebauung, [111](#)  
Beben, [50](#)  
Beben von Mexico City, [19](#)  
Bergsturz, [33](#), [100](#)  
Besiedlung, [199](#)  
Bevölkerungsexplosion, [114](#)  
Bewaldung, [111](#)

Bimsstein, [79](#)

Black-Saturday-Bushfires, [131](#)  
Blitze, [135](#)  
Blizzards, [176](#)  
Bodenfeuchte, [112](#)  
Bodenkriechen, [102](#)  
Bodenmikrofon, [111](#)  
Bodenporen, [105](#)  
Brahmaputra, [198](#)  
Brandrodung, [136](#)  
Brandstiftung, [135](#)  
Bruchzone, [10](#)  
Buschbrand, [129](#)  
Buschfeuer, [134](#)  
Buschlagenbau, [111](#)

## C

Caldera, [86](#), [89](#)  
Chicxulub-Krater, [35](#)  
Chile-Beben, [18](#)  
CO<sub>2</sub>-Emission, [138](#)  
Computersimulation, [124](#)  
Corioliskraft, [170](#)

## D

Dehnungsmesser, [111](#)  
Deich, [180](#), [186](#), [194](#), [202](#)  
Deichrückverlegung, [203](#)  
Dekkan-Trapp, [66](#), [91](#)  
Deltaplan-Projekt, [189](#)  
Dopplerradar, [166](#)



**E**

Eifel, 73, 82  
 Einschlag, 35  
 El Niño, 114  
 Elbeflut, 195  
 Enriquillo-Verwerfung, 13  
 Erdachse, 11  
 Erdanker, 110  
 Erdbeben, 6, 44, 94, 104  
 Erdbeben von Lissabon, 29  
 Erdbebenrisiko, 22  
 Erdbebenserie, 14  
 Erdbeben-Vorhersage, 21  
 Erdbebenwelle, 16  
 Erdrotation, 149, 160  
 Erdrutsch, 99, 101, 102  
 Erdrutsch-Experiment, 109  
 Eruption, 44, 45, 59, 66, 86, 91, 96  
     effusive, 65  
     phreatomagmatische, 63, 75, 79  
     plinianische, 60, 80  
 Eruptionswolke, 60, 66, 74  
 Eukalyptusbaum, 131  
 Eukalyptuswald, 143  
 Evakuierung, 37, 71, 157  
 Eyjafjallajökull, 46

**F**

Feldspat, 96  
 Felssturz, 101, 102, 113  
 Fernwelle, 182  
 Festschnee, 120  
 Feuerkäfer, 143  
 Feuerökologe, 143  
 Fischbeck, 194  
 Fließlawine, 121  
 Flussbegradigung, 200  
 Flutpolder, 203  
 Flutwelle, 101, 107  
 Frühwarnsystem, 36, 69, 70, 111, 205  
 Fujita-Skala, 162  
 Fujiwhara-Effekt, 146  
 Fukushima Daiichi, 7, 27

**G**

Galtür, 124  
 Galveston, 183  
 Ganges, 198  
 Gasgehalt, 59  
 Gashydrat, 31  
 Gasmessung, 69  
 Gefahrenzone, 155  
 Gefahrenzonenplan, 126  
 Gegenfeuer, 139  
 Genfer See, 32  
 German Indonesian Tsunami Early  
     Warning System, 37  
 Geysir, 80, 82, 92  
 Gezeiten, 181  
 Gletscher, 139  
 Gletscherlauf, 51  
 Gletschervulkan, 41, 66  
 Golfküste, 183  
 GPS-Empfänger, 38, 69  
 GPS-Sensor, 54  
 GPS-Station, 94  
 Grimsvötn, 48, 52  
 Großes Chile-Erdbeben, 9  
 Groten Mannndrenke, 186  
 Grundwasser, 63

**H**

Haiti, 13, 33  
 Halligen, 185, 186  
 Hamburg, 164, 179  
 Hangneigung, 104, 118  
 Hangstabilität, 108  
 Hawaii, 58, 64  
 Hekla, 44  
 Hengill, 55  
 Herculanum, 63  
 Hitzerekord, 132  
 Hitzewelle, 130, 133  
 Hochdruckgebiet, 173  
 Hochwasser, 193  
 Hochwasserschutz, 202  
 Hochwasserschutzzentrale, 205  
 Hochwasserspitze, 198

Hot Spot, [42](#), [58](#), [81](#), [92](#)  
Hurricane Hunters, [156](#)  
Hurrikan, [146](#), [150](#), [157](#), [197](#)  
Hurrikan Ike, [183](#)  
Hurrikan Katrina, [148](#)  
Hurrikans der Kategorie 5, [153](#)  
Hurrikansaison, [153](#)

## I

Indonesien, [138](#)  
Insel Heimaey, [53](#)  
Intensität, [18](#)  
Intraplattenbeben, [15](#)  
Island, [41](#)

## J

Jahr ohne Sommer, [67](#), [78](#)  
Jahrhunderthochwasser, [195](#)  
Japan, [27](#)  
Japangraben, [5](#), [10](#)  
Jetstream, [171](#)  
Jökulhlaup, [51](#)  
Julianenflut, [185](#)

## K

Kanarische Inseln, [32](#)  
Katastrophenübung, [23](#)  
Katrina, [151](#)  
Klimawandel, [31](#), [133](#), [152](#), [164](#), [173](#),  
[191](#), [200](#)  
Kohlenmonoxid, [132](#)  
Kontinentalhang, [31](#)  
Krakatau, [30](#), [62](#), [63](#), [92](#)  
Kriechschnee, [122](#)  
Kublai Khan, [2](#)  
Küstenschutz, [185](#)

## L

Laacher See, [73](#)  
Laacher See-Vulkan, [68](#)  
Lahar, [62](#), [71](#), [79](#)  
Landnutzung, [135](#)  
Langzeitprognose, [21](#)  
Laufzeit, [37](#)

Lava, [65](#), [89](#)  
Lavadelta, [66](#)  
Lavatunnel, [64](#)  
Lawine, [114](#), [118](#)  
Lawinengefahr, [120](#), [123](#)  
Lawinenschutz, [124](#)  
Lawinenschutzmaßnahme, [126](#)  
Lawinen-Airbags, [127](#)  
Lawinen-Verschütteten-Suchgerät, [128](#)  
Lawinenwarndienst, [123](#)  
Leitfähigkeit, [96](#)  
Liquefaktion, [19](#)  
Los Angeles, [20](#), [34](#)  
Löschflugzeug, [141](#)  
Löschschaum, [139](#)  
Luftdruck, [148](#), [151](#)  
Luftmassengrenze, [160](#)

## M

Maar, [63](#), [79](#), [81](#)  
Magma, [45](#), [88](#)  
Magmakammer, [48](#), [82](#), [86](#), [95](#)  
Magmafropf, [60](#)  
Magnitude, [16](#)  
Massenbewegung, [102](#), [107](#)  
Mauna Loa, [64](#)  
Meeresboden, [25](#), [29](#)  
Meeresspiegel, [175](#)  
Meeresspiegelanstieg, [186](#), [191](#)  
Megathrust-Beben, [9](#)  
Mercalli-Skala, [18](#)  
Meteorit, [35](#)  
Meteorologe, [139](#)  
Mexico-City-Effekt, [19](#)  
Mississippi, [197](#)  
Mittelmeerraum, [134](#)  
Mittelozeanischer Rücken, [43](#)  
Moment-Magnitude, [18](#)  
Monsun, [104](#), [196](#), [200](#)  
Morignone, [100](#)  
Mount Everest, [117](#)  
Mount St. Helens, [60](#), [89](#), [109](#)  
Mure, [102](#)

**N**

Nachterstedt, 101  
Nationalpark, 85  
Nevado del Ruiz, 70  
New Madrid, 15  
New Orleans, 151  
New York City, 146  
Niederlande, 189  
Niederschlag, 173, 193, 196, 201  
Nordsee, 192

**O**

Oberflächenspannung, 105  
Oberflächentemperatur des Meeres, 148, 154  
Oberflächenwelle, 19  
Oberrheingraben, 15  
Ojos del Salado, 59  
Oklahoma, 161  
Orkan, 171  
Orkanböen, 179  
Ostafrikanischer Graben, 58

**P**

Pacific Tsunami Warning System, 36  
Pahoehoe-Lava, 65  
Parkfield, 21  
Pazifik, 27  
Pazifischer Feuerring, 57  
Pegel, 195  
Permafrost, 115  
Philippinen, 152  
Phlegräisches Feld, 87, 96  
Pinatubo, 59, 68, 90  
Platte  
    tektonische, 8, 15  
Plattengrenze, 8, 15, 42, 57, 92  
Polarluft, 170  
Polartief, 174  
Polwanderung, 154  
Populationsdichte, 90  
Porendruck, 108  
Primärwelle, 6  
Pyroklastischer Strom, 60, 71, 74, 76

**R**

Regenwald, 136  
Resonanz, 19  
Reykjavik, 54  
Rhein, 76  
Richterskala, 16  
Risikokarte, 177  
Rodung, 108  
Rungholt, 186  
Russland, 132  
Rutschung, 31, 34

**S**

Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala, 151  
Salzsäure, 92  
San Andreas-Verwerfung, 20  
Sandbank, 186  
Sandy, 145  
Santorin, 58, 96  
San-Andreas-Graben, 12  
Savanne, 135  
Schaden, 162  
Scherwind, 149, 154  
Schicht- oder Stratovulkan, 59  
Schild- oder Deckenvulkan, 64  
Schlackenkegel, 79, 81  
Schlamm, 114  
SchlammLawine, 62, 71  
Schlammstrom, 33, 102  
Schmelze, 88, 96  
Schmelzwasser, 51, 201  
Schneebrett, 120  
SchneebrettLawine, 121  
Schneefall, 176  
Schneekristall, 119  
Schneeschnmelze, 197  
Schnellläufer, 171  
Schwebstoff, 67, 138  
Schwefelgas, 68, 78  
Schwefelsäure, 91  
Schwimmschnee, 120  
Sediment, 11, 19, 20, 76, 110  
Seebeben, 28  
Seismischer Zyklus, 14

Seismisches Messnetz, [20](#), [21](#)  
Seismogramm, [16](#)  
Seismologisches Messnetz, [53](#)  
Sekundärwelle, [6](#)  
Sequoia, [142](#)  
Siele, [187](#)  
Sintflut, [1](#)  
Smog, [132](#)  
Sommertemperatur, [133](#)  
Sonnenuntergang, [67](#)  
Soufrière Hills, [62](#)  
Spaltenvulkanismus, [66](#)  
Spannung, [10](#), [22](#)  
Sperrwerk, [188–190](#)  
Springflut, [147](#), [182](#)  
stabil, [99](#)  
Starkbeben, [33](#)  
Starkregen, [104](#), [114](#)  
Staublawine, [122](#)  
Staudamm, [105](#)  
Staunässe, [110](#)  
Steinlawine, [102](#), [104](#)  
Steinschlag, [102](#)  
Storegga-Rutschung, [31](#)  
Stormspotter, [166](#)  
Stratosphäre, [66](#)  
Stromboli, [58](#)  
Sturmdauer, [172](#)  
Sturmflut, [148](#), [153](#), [175](#), [179](#), [181](#), [182](#),  
[190](#)  
Sturmflutgefahr, [192](#)  
Sturmflutwarnung, [181](#), [190](#)  
Sturmhäufigkeit, [175](#)  
Sturmschutzraum, [162](#)  
Sturmserie, [173](#)  
Sturmtief, [171](#)  
Sturmwarnung, [178](#)  
Sturmwarnzentrale, [190](#)  
Sturzflut, [194](#)  
Stützmauer, [110](#)  
Subduktionszone, [9](#), [57](#)  
Supervulkan, [86](#), [97](#)  
Superzellen-Gewitter, [159](#)  
Sylt, [175](#), [185](#)

**T**

Tagebau, [101](#)  
Tageslänge, [12](#)  
Taifun, [150](#)  
Taifun Haiyan, [152](#), [197](#)  
Tambora, [66](#), [90](#)  
Tephra, [45](#), [59](#), [74](#), [76](#)  
Tidenhub, [181](#)  
Tiefdruckgebiet, [159](#), [165](#), [171](#), [182](#), [195](#)  
Tiefdrucksystem, [145](#)  
Toba, [90](#)  
Tohoku-Beben, [5](#), [10](#), [38](#), [39](#)  
Tohoku-Erdbeben, [11](#), [27](#)  
Torfbrand, [132](#), [138](#)  
Torfgebiet, [134](#), [138](#)  
Tornado, [159](#)  
Tornadoschaden, [165](#)  
Tornado-Alley, [159](#), [166](#)  
Tornadowarnung, [167](#)  
Transformstörung, [13](#), [34](#), [44](#)  
Tribschnee, [121](#)  
Trockenheit, [131](#)  
Tsunami, [6](#), [25](#), [27](#), [29](#), [77](#)  
Tsunamiwarnung, [34](#), [37](#)

**U**

Überdruck, [88](#)  
Überschwemmung, [194](#), [198](#)  
Ursache, [104](#)  
US-National Hurricane Center, [155](#)

**V**

Vajont, [105](#)  
Varusschlacht, [2](#)  
Vatnajökull, [41](#), [48](#)  
Vegetation, [137](#)  
Veltlin, [99](#)  
Versatz, [9](#)  
Vesuv, [58](#), [59](#), [62](#)  
Vorbeugung, [141](#)  
Vorhersage, [155](#), [167](#)  
Vorwarnung, [178](#)  
Vulcano, [58](#)  
Vulkan, [44](#), [57](#), [104](#)

Vulkanasche, [46](#), [93](#)  
Vulkanexplosivitätsindex-Wert, [87](#)  
Vulkaninsel, [42](#)  
Vulkanischer Winter, [67](#), [90](#), [91](#)

## W

Waldbrand, [129](#), [139](#)  
Waldbrandrisiko, [141](#)  
Warft, [186](#)  
Warnmeldung, [38](#)  
Wasserhose, [164](#)  
Wasserspiegel, [182](#)  
Wasserstand, [105](#), [179](#)  
Welle, [26](#)  
Wellenfront, [28](#)  
Wellenhöhe, [36](#)  
Wiederaufforstung, [126](#)  
Wiederkehrperiode, [22](#)  
Wilhelmsburg, [181](#)

Windgeschwindigkeit, [146](#), [151](#), [161](#),  
[162](#)  
Windhose, [164](#)  
Windstau, [182](#)  
Wintersturm, [146](#), [172](#), [176](#), [197](#)  
Wirbelsturm, [145](#), [166](#), [191](#)  
Wolkenschlauch, [160](#)  
Wolkenwirbel, [170](#)

## Y

Yangtse, [196](#), [198](#)  
Yellowstone, [85](#)  
Yellowstone-Hot Spot, [95](#)  
Yellowstone-Park, [136](#)  
Yucatan, [34](#)

## Z

Zugbahn, [150](#), [155](#)  
Zyklon, [150](#), [184](#)

---

# License: creative commons – Attribution-ShareAlike 3.0 Unported

THE WORK (AS DEFINED BELOW) IS PROVIDED UNDER THE TERMS OF THIS CREATIVE COMMONS PUBLIC LICENSE (“CCPL” OR “LICENSE”). THE WORK IS PROTECTED BY COPYRIGHT AND/OR OTHER APPLICABLE LAW. ANY USE OF THE WORK OTHER THAN AS AUTHORIZED UNDER THIS LICENSE OR COPYRIGHT LAW IS PROHIBITED.

BY EXERCISING ANY RIGHTS TO THE WORK PROVIDED HERE, YOU ACCEPT AND AGREE TO BE BOUND BY THE TERMS OF THIS LICENSE. TO THE EXTENT THIS LICENSE MAY BE CONSIDERED TO BE A CONTRACT, THE LICENSOR GRANTS YOU THE RIGHTS CONTAINED HERE IN CONSIDERATION OF YOUR ACCEPTANCE OF SUCH TERMS AND CONDITIONS.

## 1. Definitions

- a. **“Adaptation”** means a work based upon the Work, or upon the Work and other pre-existing works, such as a translation, adaptation, derivative work, arrangement of music or other alterations of a literary or artistic work, or phonogram or performance and includes cinematographic adaptations or any other form in which the Work may be recast, transformed, or adapted including in any form recognizably derived from the original, except that a work that constitutes a Collection will not be considered an Adaptation for the purpose of this License. For the avoidance of doubt, where the Work is a musical work, performance or phonogram, the synchronization of the Work in timed-relation with a moving image (“synching”) will be considered an Adaptation for the purpose of this License.
- b. **“Collection”** means a collection of literary or artistic works, such as encyclopedias and anthologies, or performances, phonograms or broadcasts, or other works or subject matter other than works listed in Section 1(f) below, which, by reason of the selection and arrangement of their contents, constitute intellectual creations, in which the Work is included in its entirety in unmodified form along with one or more other contributions, each constituting separate and independent works in

themselves, which together are assembled into a collective whole. A work that constitutes a Collection will not be considered an Adaptation (as defined below) for the purposes of this License.

- c. **“Creative Commons Compatible License”** means a license that is listed at <http://creativecommons.org/compatiblelicenses> that has been approved by Creative Commons as being essentially equivalent to this License, including, at a minimum, because that license: (i) contains terms that have the same purpose, meaning and effect as the License Elements of this License; and, (ii) explicitly permits the re-licensing of adaptations of works made available under that license under this License or a Creative Commons jurisdiction license with the same License Elements as this License.
- d. **“Distribute”** means to make available to the public the original and copies of the Work or Adaptation, as appropriate, through sale or other transfer of ownership.
- e. **“License Elements”** means the following high-level license attributes as selected by Licensor and indicated in the title of this License: Attribution, ShareAlike.
- f. **“Licensor”** means the individual, individuals, entity or entities that offer(s) the Work under the terms of this License.
- g. **“Original Author”** means, in the case of a literary or artistic work, the individual, individuals, entity or entities who created the Work or if no individual or entity can be identified, the publisher; and in addition (i) in the case of a performance the actors, singers, musicians, dancers, and other persons who act, sing, deliver, declaim, play in, interpret or otherwise perform literary or artistic works or expressions of folklore; (ii) in the case of a phonogram the producer being the person or legal entity who first fixes the sounds of a performance or other sounds; and, (iii) in the case of broadcasts, the organization that transmits the broadcast.
- h. **“Work”** means the literary and/or artistic work offered under the terms of this License including without limitation any production in the literary, scientific and artistic domain, whatever may be the mode or form of its expression including digital form, such as a book, pamphlet and other writing; a lecture, address, sermon or other work of the same nature; a dramatic or dramatico-musical work; a choreographic work or entertainment in dumb show; a musical composition with or without words; a cinematographic work to which are assimilated works expressed by a process analogous to cinematography; a work of drawing, painting, architecture, sculpture, engraving or lithography; a photographic work to which are assimilated works expressed by a process analogous to photography; a work of applied art; an illustration, map, plan, sketch or three-dimensional work relative to geography, topography, architecture or science; a performance; a broadcast; a phonogram; a compilation of data to the extent it is protected as a copyrightable work; or a work performed by a variety or circus performer to the extent it is not otherwise considered a literary or artistic work.
- i. **“You”** means an individual or entity exercising rights under this License who has not previously violated the terms of this License with respect to the Work, or who

has received express permission from the Licensor to exercise rights under this License despite a previous violation.

- j. **“Publicly Perform”** means to perform public recitations of the Work and to communicate to the public those public recitations, by any means or process, including by wire or wireless means or public digital performances; to make available to the public Works in such a way that members of the public may access these Works from a place and at a place individually chosen by them; to perform the Work to the public by any means or process and the communication to the public of the performances of the Work, including by public digital performance; to broadcast and rebroadcast the Work by any means including signs, sounds or images.
- k. **“Reproduce”** means to make copies of the Work by any means including without limitation by sound or visual recordings and the right of fixation and reproducing fixations of the Work, including storage of a protected performance or phonogram in digital form or other electronic medium.

## 2. Fair Dealing Rights

Nothing in this License is intended to reduce, limit, or restrict any uses free from copyright or rights arising from limitations or exceptions that are provided for in connection with the copyright protection under copyright law or other applicable laws.

## 3. License Grant

Subject to the terms and conditions of this License, Licensor hereby grants you a worldwide, royalty-free, non-exclusive, perpetual (for the duration of the applicable copyright) license to exercise the rights in the Work as stated below:

- a. to Reproduce the Work, to incorporate the Work into one or more Collections, and to Reproduce the Work as incorporated in the Collections;
- b. to create and Reproduce Adaptations provided that any such Adaptation, including any translation in any medium, takes reasonable steps to clearly label, demarcate or otherwise identify that changes were made to the original Work. For example, a translation could be marked “The original work was translated from English to Spanish;” or a modification could indicate “The original work has been modified.”;
- c. to Distribute and Publicly Perform the Work including as incorporated in Collections; and,
- d. to Distribute and Publicly Perform Adaptations.



e. For the avoidance of doubt:

- i. **Non-waivable Compulsory License Schemes.** In those jurisdictions in which the right to collect royalties through any statutory or compulsory licensing scheme cannot be waived, the Licensor reserves the exclusive right to collect such royalties for any exercise by You of the rights granted under this License;
- ii. **Waivable Compulsory License Schemes.** In those jurisdictions in which the right to collect royalties through any statutory or compulsory licensing scheme can be waived, the Licensor waives the exclusive right to collect such royalties for any exercise by You of the rights granted under this License; and,
- iii. **Voluntary License Schemes.** The Licensor waives the right to collect royalties, whether individually or, in the event that the Licensor is a member of a collecting society that administers voluntary licensing schemes, via that society, from any exercise by You of the rights granted under this License. The above rights may be exercised in all media and formats whether now known or hereafter devised. The above rights include the right to make such modifications as are technically necessary to exercise the rights in other media and formats. Subject to Section 8(f), all rights not expressly granted by Licensor are hereby reserved.

## 4. Restrictions

The license granted in Section 3 above is expressly made subject to and limited by the following restrictions:

- a. You may Distribute or Publicly Perform the Work only under the terms of this License. You must include a copy of, or the Uniform Resource Identifier (URI) for, this License with every copy of the Work You Distribute or Publicly Perform. You may not offer or impose any terms on the Work that restrict the terms of this License or the ability of the recipient of the Work to exercise the rights granted to that recipient under the terms of the License. You may not sublicense the Work. You must keep intact all notices that refer to this License and to the disclaimer of warranties with every copy of the Work You Distribute or Publicly Perform. When You Distribute or Publicly Perform the Work, You may not impose any effective technological measures on the Work that restrict the ability of a recipient of the Work from You to exercise the rights granted to that recipient under the terms of the License. This Section 4(a) applies to the Work as incorporated in a Collection, but this does not require the Collection apart from the Work itself to be made subject to the terms of this License. If You create a Collection, upon notice from any Licensor You must, to the extent practicable, remove from the Collection any credit as required by Section 4(c), as requested. If You create an Adaptation, upon notice from any Licensor You must, to the extent practicable, remove from the Adaptation any credit as required by Section 4(c), as requested.

- b. You may Distribute or Publicly Perform an Adaptation only under the terms of: (i) this License; (ii) a later version of this License with the same License Elements as this License; (iii) a Creative Commons jurisdiction license (either this or a later license version) that contains the same License Elements as this License (e.g., Attribution-ShareAlike 3.0 US); (iv) a Creative Commons Compatible License. If you license the Adaptation under one of the licenses mentioned in (iv), you must comply with the terms of that license. If you license the Adaptation under the terms of any of the licenses mentioned in (i), (ii) or (iii) (the “Applicable License”), you must comply with the terms of the Applicable License generally and the following provisions: (I) You must include a copy of, or the URI for, the Applicable License with every copy of each Adaptation You Distribute or Publicly Perform; (II) You may not offer or impose any terms on the Adaptation that restrict the terms of the Applicable License or the ability of the recipient of the Adaptation to exercise the rights granted to that recipient under the terms of the Applicable License; (III) You must keep intact all notices that refer to the Applicable License and to the disclaimer of warranties with every copy of the Work as included in the Adaptation You Distribute or Publicly Perform; (IV) when You Distribute or Publicly Perform the Adaptation, You may not impose any effective technological measures on the Adaptation that restrict the ability of a recipient of the Adaptation from You to exercise the rights granted to that recipient under the terms of the Applicable License. This Section 4(b) applies to the Adaptation as incorporated in a Collection, but this does not require the Collection apart from the Adaptation itself to be made subject to the terms of the Applicable License.
- c. If You Distribute, or Publicly Perform the Work or any Adaptations or Collections, You must, unless a request has been made pursuant to Section 4(a), keep intact all copyright notices for the Work and provide, reasonable to the medium or means You are utilizing: (i) the name of the Original Author (or pseudonym, if applicable) if supplied, and/or if the Original Author and/or Licensor designate another party or parties (e.g., a sponsor institute, publishing entity, journal) for attribution (“Attribution Parties”) in Licensor’s copyright notice, terms of service or by other reasonable means, the name of such party or parties; (ii) the title of the Work if supplied; (iii) to the extent reasonably practicable, the URI, if any, that Licensor specifies to be associated with the Work, unless such URI does not refer to the copyright notice or licensing information for the Work; and (iv), consistent with Section 3(b), in the case of an Adaptation, a credit identifying the use of the Work in the Adaptation (e.g., “French translation of the Work by Original Author,” or “Screenplay based on original Work by Original Author”). The credit required by this Section 4(c) may be implemented in any reasonable manner; provided, however, that in the case of a Adaptation or Collection, at a minimum such credit will appear, if a credit for all contributing authors of the Adaptation or Collection appears, then as part of these credits and in a manner at least as prominent as the credits for the other contributing authors. For the avoidance of doubt, You may only use the credit required by this Section for the purpose of attribution in the manner

set out above and, by exercising Your rights under this License, You may not implicitly or explicitly assert or imply any connection with, sponsorship or endorsement by the Original Author, Licensor and/or Attribution Parties, as appropriate, of You or Your use of the Work, without the separate, express prior written permission of the Original Author, Licensor and/or Attribution Parties.

- d. Except as otherwise agreed in writing by the Licensor or as may be otherwise permitted by applicable law, if You Reproduce, Distribute or Publicly Perform the Work either by itself or as part of any Adaptations or Collections, You must not distort, mutilate, modify or take other derogatory action in relation to the Work which would be prejudicial to the Original Author's honor or reputation. Licensor agrees that in those jurisdictions (e.g. Japan), in which any exercise of the right granted in Section 3(b) of this License (the right to make Adaptations) would be deemed to be a distortion, mutilation, modification or other derogatory action prejudicial to the Original Author's honor and reputation, the Licensor will waive or not assert, as appropriate, this Section, to the fullest extent permitted by the applicable national law, to enable You to reasonably exercise Your right under Section 3(b) of this License (right to make Adaptations) but not otherwise.

## **5. Representations, Warranties and Disclaimer**

UNLESS OTHERWISE MUTUALLY AGREED TO BY THE PARTIES IN WRITING, LICENSOR OFFERS THE WORK AS-IS AND MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND CONCERNING THE WORK, EXPRESS, IMPLIED, STATUTORY OR OTHERWISE, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF TITLE, MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NONINFRINGEMENT, OR THE ABSENCE OF LATENT OR OTHER DEFECTS, ACCURACY, OR THE PRESENCE OF ABSENCE OF ERRORS, WHETHER OR NOT DISCOVERABLE. SOME JURISDICTIONS DO NOT ALLOW THE EXCLUSION OF IMPLIED WARRANTIES, SO SUCH EXCLUSION MAY NOT APPLY TO YOU.

## **6. Limitation on Liability**

EXCEPT TO THE EXTENT REQUIRED BY APPLICABLE LAW, IN NO EVENT WILL LICENSOR BE LIABLE TO YOU ON ANY LEGAL THEORY FOR ANY SPECIAL, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, PUNITIVE OR EXEMPLARY DAMAGES ARISING OUT OF THIS LICENSE OR THE USE OF THE WORK, EVEN IF LICENSOR HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

## 7. Termination

- a. This License and the rights granted hereunder will terminate automatically upon any breach by You of the terms of this License. Individuals or entities who have received Adaptations or Collections from You under this License, however, will not have their licenses terminated provided such individuals or entities remain in full compliance with those licenses. Sections 1, 2, 5, 6, 7, and 8 will survive any termination of this License.
- b. Subject to the above terms and conditions, the license granted here is perpetual (for the duration of the applicable copyright in the Work). Notwithstanding the above, Licensor reserves the right to release the Work under different license terms or to stop distributing the Work at any time; provided, however that any such election will not serve to withdraw this License (or any other license that has been, or is required to be, granted under the terms of this License), and this License will continue in full force and effect unless terminated as stated above.

## 8. Miscellaneous

- a. Each time You Distribute or Publicly Perform the Work or a Collection, the Licensor offers to the recipient a license to the Work on the same terms and conditions as the license granted to You under this License.
- b. Each time You Distribute or Publicly Perform an Adaptation, Licensor offers to the recipient a license to the original Work on the same terms and conditions as the license granted to You under this License.
- c. If any provision of this License is invalid or unenforceable under applicable law, it shall not affect the validity or enforceability of the remainder of the terms of this License, and without further action by the parties to this agreement, such provision shall be reformed to the minimum extent necessary to make such provision valid and enforceable.
- d. No term or provision of this License shall be deemed waived and no breach consented to unless such waiver or consent shall be in writing and signed by the party to be charged with such waiver or consent.
- e. This License constitutes the entire agreement between the parties with respect to the Work licensed here. There are no understandings, agreements or representations with respect to the Work not specified here. Licensor shall not be bound by any additional provisions that may appear in any communication from You. This License may not be modified without the mutual written agreement of the Licensor and You.
- f. The rights granted under, and the subject matter referenced, in this License were drafted utilizing the terminology of the Berne Convention for the Protection of

Literary and Artistic Works (as amended on September 28, 1979), the Rome Convention of 1961, the WIPO Copyright Treaty of 1996, the WIPO Performances and Phonograms Treaty of 1996 and the Universal Copyright Convention (as revised on July 24, 1971). These rights and subject matter take effect in the relevant jurisdiction in which the License terms are sought to be enforced according to the corresponding provisions of the implementation of those treaty provisions in the applicable national law. If the standard suite of rights granted under applicable copyright law includes additional rights not granted under this License, such additional rights are deemed to be included in the License; this License is not intended to restrict the license of any rights under applicable law.