

Die Ausbrüche des Mount St. Helens – und die Folgen

Thomas Fritzsche, Bahnhofstr. 2, D-37139 Adelebsen

Zusammenfassung: Die Ausbrüche des Mount St. Helens im Jahr 1980 und in den folgenden Jahren führten in der näheren Umgebung zu erheblichen Zerstörungen. Durch die seitliche Explosion am 18. Mai 1980 wurde nördlich des Vulkans eine fast 600 km² umfassende Landschaft vernichtet. Schuttmassen stürzten in den benachbarten Spirit Lake, lösten eine gewaltige Flutwelle aus und hinterließen eine über 60 m mächtige Sedimentschicht. Auf dem See treibt seitdem eine langsam kleiner werdende Matte aus abgerissenen Baumstämmen. Mehrere Flußsysteme wurden von den Schuttmassen und der Vulkanasche überdeckt, der Abfluß des Wassers war verhindert oder eingeschränkt. Den größten Schaden verursachten die durch die Explosion ausgelösten Schlammströme, von denen auch Gebiete weit außerhalb der abgesperrten Region betroffen waren (Abb. 3). Knapp 15 Jahre nach dem Ausbruch haben sich Flora und Fauna von der Katastrophe teilweise erholt (siehe auch zusammenfassende Abb. 2).

Prolog

„Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit“, so lautet in Kurzform das Arbeitsprinzip der Historischen Geologie, der Wissenschaft, die die geologische Erdvergangenheit erforscht. Dieses Aktualismus-Prinzip hat sich vortrefflich bei der Rekonstruktion geologischer Vorgänge bewährt; es ist nur natürlich, wenn wir unser heutiges Umfeld mitsamt den beobachteten und beobachtbaren Ereignisabfolgen in die Vergangenheit projizieren und nach Bekanntem suchen.

Dennoch hat das Aktualismus-Prinzip seine Grenzen, über die hinaus das Heute nur noch mit erheblichen Einschränkungen zur Beschreibung historischer Prozesse dienen kann. Im Laufe geologischer Forschungstätigkeit hat sich gezeigt, daß die Erde im Wandel begriffen ist, also letztlich einem irreversiblen Zeitpfad folgt. Eindrucksvoll zeugen davon die ausgestorbenen Tierarten, die eine uns fremd anmutende Lebewelt repräsentieren; die Flora der Karbonwälder unterstreicht diese Unterschiede. Doch nicht allein die Paläontologie berichtet von Veränderungen: Das Vorkommen ausgedehnter Salzlager läßt sich durch kein heutiges Pendant beschreiben, die Kontinente waren einst ganz anders auf dem Globus verteilt und wie es scheint kennzeichnet unser Globalklima keineswegs die in den Gesteinsdokumenten belegten einstigen Verhältnisse.

Überhaupt muß gefragt werden, ob uns die Natur ausreichende Informationen liefert, um vergangene Prozesse erkennen zu können. Seltene Ereignisse, wie z.B. Meteoritenimpakte, können wir zur Zeit auf der Erde nicht unmittelbar studieren – glücklicherweise. Außerdem können verschiedene Faktoren mit wechselnden Anteilen zusammenwirken, oft ist das wirksame Agens (z.B. das Wasser beim Sedimenttransport und der folgenden Ablagerung) verschwunden, und wir müssen zu Analogien greifen. Schließlich bleibt zu bedenken, daß wir in den Gesteinen und vielen heutigen Landschaftsformen nur Wirkungen studieren, die auf mehreren Wegen (Ursachen) entstanden sein können.

Ein Vulkanausbruch, zudem ein so gut untersuchter wie der des Mount St. Helens, ist deshalb für den Wissenschaftler ein willkommenes Naturereignis, um das aktualistische Handwerkszeug zu verfeinern und gegebenenfalls zu ergänzen. LIPMAN & MULLINEUX (1981, 3) weisen auf die ausgesprochen beobachtungsfreundlichen Umstände hin: Zum Zeitpunkt der großen Explosion herrschte klare Sicht, es war Wochenende, d.h. zahlreiche Fotografen waren rings um den Vulkan in gespannter Erwartung, und der Ausbruch erfolgte am frühen Morgen, es gab also genügend Zeit, die Auswirkungen bei Tageslicht zu verfolgen.

Plattentektonik und Vulkanismus

Erdbeben und Vulkanausbrüche gehören zu den markantesten Erscheinungen, durch die sich das Erdinnere mitteilt: Erdbeben sind die Folge von Spannungsentlastungen im Untergrund, Vulkane führen die in der Erde angestaute Wärme ab, indem sie vulkanisches Material ausstoßen. Von diesen Ereignissen gehen große Gefahren aus: die Zahl der durch Erdbeben und Vulkanausbrüche getöteten Menschen geht allein für die letzten Jahrhunderte in die Millionen. Dabei bringen nicht immer die unmittelbaren Naturereignisse Tod und Verderben: Erdbeben unter den Ozeanen (z.B. in der Nähe des Japanischen Inselbogens) oder Vulkanausbrüche auf Inseln (z.B. Krakatau) können meterhohe Flutwellen erzeugen, die in Küstenregionen zu verheerenden Überschwemmungskatastrophen führen.

Die Verteilung der Erdbebenzentren, aber noch mehr die der aktiven Vulkane, folgt einem bestimmten Muster, das eng an die tektonischen Großstruk-

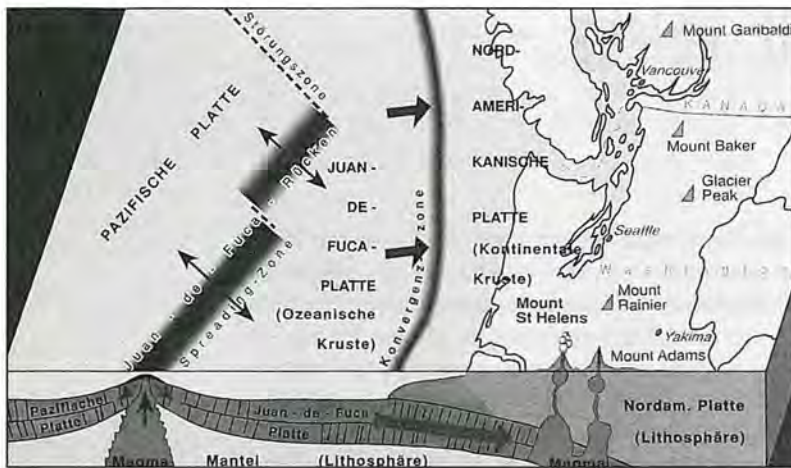


Abb. 1: Im Bereich des Kaskadengebirges schiebt sich ozeanische Kruste unter die Nordamerikanische Platte. Im Untergrund schmilzt ein Teil des Gesteins auf und dringt als Magma in höhere Krustenbereiche vor.

Die Juan de Fuca-Platte ist im Vergleich zu anderen Platteneinheiten recht klein, die Spreizzone – der sog. Mittelozeanische Rücken – liegt nicht weit von der Küste entfernt, so daß man gerade hier nicht von einer typischen Konvergenzzone nach dem Modell der Plattentektonik sprechen kann. (Verändert nach FOXWORTHY & HILL 1982; Grafik: Hanna JORDAN und Johannes WEISS)

turen der Erde gekoppelt ist. Die Erdoberfläche läßt sich in rund ein Dutzend größere und zahlreiche kleinere Lithosphärenplatten unterteilen. Sie sind etwa 100 km dick und „schwimmen“ auf einer Mantelzone, in der ein geringer Anteil festen Materials unter den dort herrschenden hohen Drücken und Temperaturen geschmolzen ist. Dadurch können sich die Platten gegeneinander bewegen: Stoßen sie zusammen, falten sich Gebirge auf, wie z.B. die Alpen oder der Himalaya. Gleiten sie aneinander vorbei, können sie sich verkeilen – das Nachrücken erfolgt dann ruckartig und äußert sich in Erdbeben, wie z.B. am San Andreas-Graben in Kalifornien. Dazu kommt aber noch der Unterschied zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste. Die kontinentale Kruste ist leichter, sie hat gewissermaßen einen Auftrieb. Die ozeanische Kruste, die aus basaltischem Gestein besteht, ist schwerer und kühler. Treffen diese Krustenarten in einer sog. Konvergenzzone aufeinander, wird sich die ozeanische unter die kontinentale Kruste schieben und in den Erdmantel abtauchen. Rund um den Pazifik ist diese Situation gegeben; die Aufschmelzprozesse im Untergrund führen an der Erdoberfläche zur Entstehung von Vulkanen, man spricht in diesem Zusammenhang auch vom zirkumpazifischen Vulkangürtel oder Feuerring. Ihm gehören viele der über 500 aktiven Vulkane an, auch die Vulkane an der Westküste Nordamerikas (HUGHES et al. 1980).

In den Konvergenzonen verschluckte Kruste wird an den Mittelozeanischen Rücken erneuert, indem Magma nach oben dringt und an die Kontinentalplatten angeschweißt wird. Bei diesen Rücken handelt es sich um ein weltumspannendes, 65.000 km langes Gebirgssystem, das nur an einigen Stellen unterbrochen ist und im Atlantik mehr als 2 km über dem Ozeanboden aufragt. Nach dem Modell der Plattentektonik stellt man sich einen Kreisprozeß mit Konvektionswalzen im Erdmantel vor, der allerdings noch nicht nachgewiesen ist. Nicht weit vor der Küste Nordamerikas verläuft solch ein Mittelozeanischer Rücken und begrenzt auf der Westseite ein kleines Krustenelement, die sog. Juan de Fuca-Platte. Im Osten taucht sie unter die Nordamerikanische Platte ab, wobei die Reibungsprozesse im Untergrund als Ursache der Magmenentstehung und schließlich der Vulkankette im Kaskadengebirge angesehen werden (Abb. 1).

Der Mount St. Helens ist ein Strato- oder Schichtvulkan: Lavaströme von unterschiedlichem Chemismus (und damit anderer Gesteinsbezeichnung, siehe Infokasten 2) wechseln mit verfestigten Lagen von grobkörnigen pyroklastischen Strömen oder sog. Ignimbriten. Wegen ihres hohen Gasgehalts und der Zähflüssigkeit der Magmen sind diese Vulkane außerordentlich explosiv; weil die Lava nicht einfach ausfließt, sondern z.T. noch während des langsamen Aufstiegs erstarrt, sind die Vulkanbauten meist steil. Treffen angesammeltes Grundwasser, Schnee oder Eis und heißes Magma zusammen, können sich gewaltige Explosionen entwickeln, bei denen Teile der Vulkanbauten regelrecht pulverisiert werden (SCHMINCKE 1986).

Die jüngste Eruptionsphase des Mount St. Helens

Chronologie

Ein Erdbeben der Stärke 4,1 am 20. März 1980 und eine erste Dampf- und Aschenexplosion 7 Tage spä-

Infokasten 1: Steckbrief des Mount St. Helens

Lage: Bundesstaat Washington, USA. Kaskadengebirge, im Gifford Pinchot Nationalpark, 80 km nördlich von Portland, Oregon.

Name: Nach Baron St. Helens (brit. Gesandter in Spanien); Ende des 18. Jahrhunderts von Kapitän G. Vancouver so benannt.

Höhe: 2.951 m vor der Eruption, 2.550 m nach der Eruption

Alter: ca. 50.000 Jahre nach physikalischer Datierung, der zuletzt bekannte Vulkanbau wird auf 3.000 Jahre geschätzt.

Ausbrüche: Letzte Ausbruchsphase zwischen 1831 und 1857; im Jahr 1980 sechs Ausbrüche: 18. Mai, 25. Mai, 12. Juni, 22. Juli, 7. August und 16.-18. Oktober. Weitere kleinere Eruptionen in den folgenden Jahren.

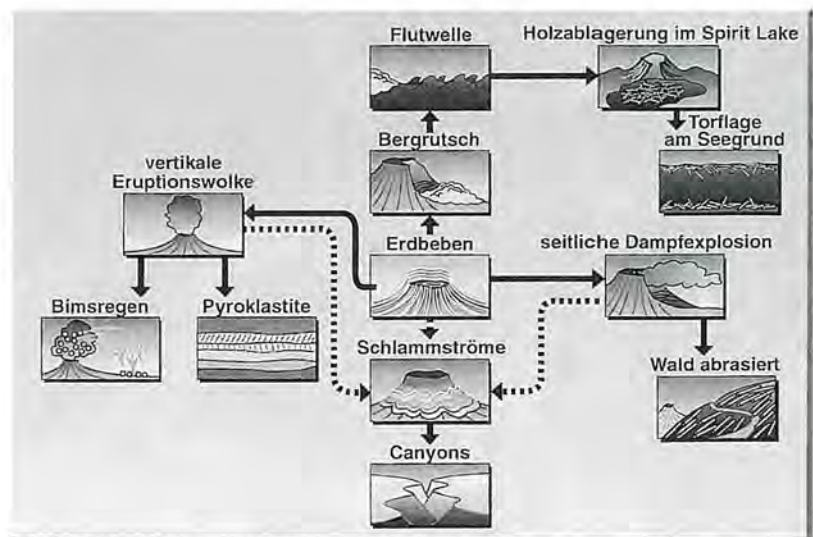
Gestein: breites Spektrum an Laven von andesitischer bis basaltischer Zusammensetzung, meist jedoch dazitisch.

Struktur: Strato- oder Schichtvulkan, mit dem typisch großen Verhältnis von Höhe zu Breite. Schmelze sehr zäh, bildet oft eine Art „Pfropf“, der Dom genannt wird. Während der jüngsten Ausbruchsphase mehrmals eine Dombildung.

ter kündeten das Wiederaufleben eines nur vorübergehend ruhigen Vulkans an. Noch in den 70er Jahren hatten Wissenschaftler vom Geological Survey den Mount St. Helens als den zur Zeit gefährlichsten Vulkan im Kaskadengebirge bezeichnet und Eruptionen innerhalb der nächsten Jahrzehnte prognostiziert (CRANDELL et al. 1975). Die spektakulären, aber harmlosen Dampfexplosionen zogen die Wissenschaftler ebenso an wie unzählige Schaulustige. Täglich wurden mehr als zwei Dutzend leichter Erdbeben registriert, schmelzendes Eis und kleinere Lawinenabgänge wurden als Vorboten größerer Ereignisse gedeutet. In der Gipfelregion entstand ein kleiner Krater, neben dem sich in den folgenden Tagen ein weiterer entwickelte; mit der Zeit wuchsen beide zu einem großen Krater zusammen. Als im April das Wetter so günstig war, um die Topographie des Berges vom Flugzeug aus genau zu vermessen und sie mit den Aufnahmen aus vorherigen Jahren zu vergleichen, fiel eine Erhebung am Nordhang des Vulkans auf. Täglich beulte sich diese Stelle des Berges um mehr als einen Meter aus, ein Anzeichen für aufsteigendes Magma innerhalb des Vulkans. Die zunehmende Instabilität des Nordhanges und die ungewissen Prozesse im Vulkaninnern veranlaßten die Wissenschaftler zu nachdrücklichen Warnungen vor größeren Lawinen oder einem bevorstehenden Ausbruch (zur Chronologie siehe u.a. CHRISTIANSEN & PETERSON 1981; Infokasten 1).

Am 18. Mai 1980 um 8 Uhr 32 war es dann soweit: Zunächst erschütterte ein Erdbeben der Stärke 5,1 den Berg. Zu diesem Zeitpunkt überflog das Geologen-Ehepaar STOFFEL gerade den Vulkan; vom Flugzeug aus sahen sie, wie sich der gesamte Nordhang zuerst regelrecht kräuselte und dann in zwei Etappen abrutschte. Durch das Abgleiten dieser Auflast konnte sich das unter hohem Druck stehende Gas ausdehnen und entlud sich in gewaltigen, neun Stunden anhaltenden Explosionen.

Eine mindestens 300°C heiße Dampf Wolke, beladen mit Asche und Staub, strömte mit einer Geschwindigkeit von mehreren 100 km/h in einem breiten Kegel vom Vulkan weg; eine Fläche von fast 600 km² wurde innerhalb weniger Minuten vernichtet, die Wolke legte bis zu 28 km zurück. Unmittelbar dahinter türmte sich eine kilometerhohe Aschewolke auf, die jede Sicht versperrte; unter ihr hat der Hitzetod praktisch alles Leben zerstört. Pyroklastische Ströme fegten den Berghang hinab und hinterließen charakteristische Ablagerungen; Asche und Bimssteinchen rieselten langsam auf die Landschaft nieder und bedeckten sie mit einer dicken Staubschicht. Die Explosionswolke über dem Vulkan stieg mehr als 20 km hoch; sie breitete sich in östlicher und nordöstlicher Richtung aus. Bereits am Nachmittag des 18. Mai hatte sich die Aschewolke über mehrere Bundesstaaten ausgebreitet. In den Ortschaften, die nur einige Dutzend Kilometer vom Vulkan entfernt liegen, drang der



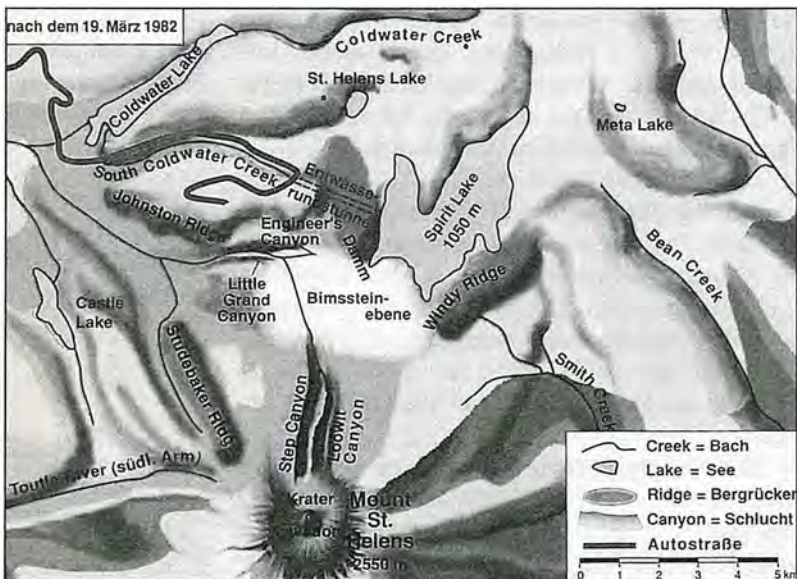
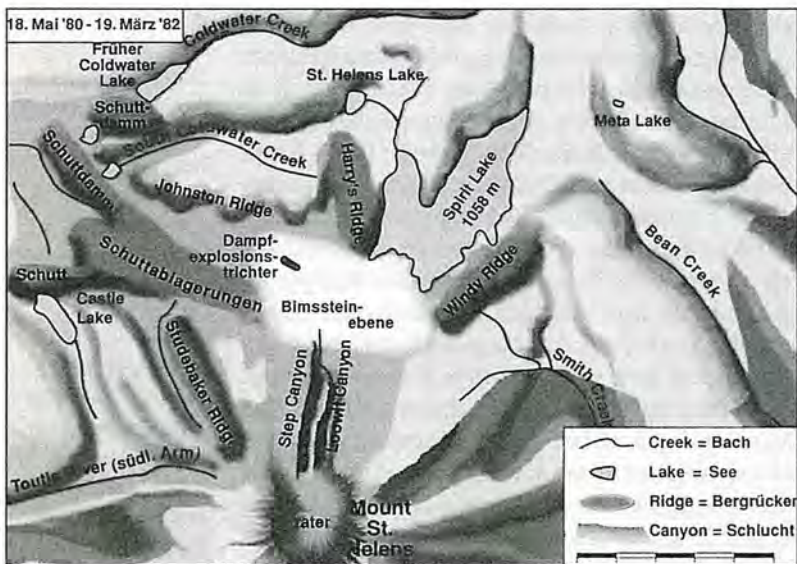
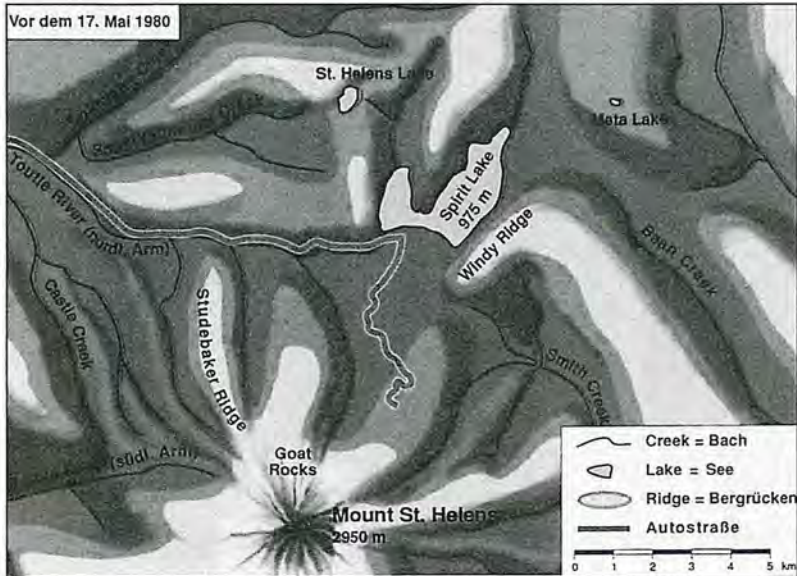
Staub in jede Ritze, legte Autos und Elektrogeräte lahm und führte zu Sicht- und Atemproblemen.

Die beeindruckendste Folgeerscheinung ist der niedergerissene Wald: Selbst Bäume von 2 m Durchmesser wurden einfach umgeblasen oder mitgerissen. Durch die Hitze wurden Laub, Rinde und Nadeln versengt. Der vorausgegangene Bergbruch, bei dem 2,3 km³ Gestein freigesetzt wurden, führte in der Nähe des Vulkans zu gravierenden topographischen Veränderungen. Die Ablagerungen am Fuß des Vulkankegels sind rund 200 m mächtig. Ein Teil der Schuttmasse stürzte in den Spirit Lake und löste eine gewaltige Wasserwelle aus. Der Schutt bedeckte den Seegrund und hob den Wasserspiegel um fast 90 m an. Abgerissene Baumstämme wurden in den See gespült und bildeten auf der Oberfläche eine gewaltige schwimmende Matte. Der größere Teil der Schuttmenge wälzte sich jedoch als Schlammlstrom in den Oberlauf des Toutle River, eine 21 km lange, 1-2 km breite und bis 150 m mächtige Ablagerung hinterlassend. Aus Schutt, Asche und Wasser entwickelten sich weitere Schlammlörm, die außerhalb der verwüsteten Landfläche große Schäden anrichteten.

Auf der weiten Fläche vor dem Vulkan hatte sich eine dicke Ablagerung 300°C heißen Bimssteins gebildet. Darunter waren noch Schnee und größere Eisbrocken begraben, die in den folgenden Tagen schmolzen und weitere Dampfexplosionen auf der Bimssteinebene verursachten; dabei entstanden Einsturztrichter von bis zu 600 m Durchmesser, die Explosionswolken stiegen fast 2 km hoch.

Die Eruptionstätigkeit begann in den frühen Abendstunden des 18. Mai 1980 abzuklingen. Durch die Vulkanexplosion war ein 750 m tiefer Krater ausgesprengt worden. Die höchste Stelle am Kraterand maß 2.550 m, damit hatte der Vulkan 400 Höhenmeter verloren (Abb. 3). Über 1 km³ vulkanische Lockermassen (Tephra) waren ausgeworfen worden; bezogen auf magmatisches Gestein mit einer Dichte von 2,6 entspricht diese Menge einem

Abb. 2: Die wichtigsten Ereignisse während der jüngsten Eruptionsphase des Mount St. Helens in einer Grafik. Die meisten Vorgänge sind dank eines umfangreichen Beobachtungsnetzes gut dokumentiert. Im Text nicht erwähnt sind die Pyroklastite (das ist der Oberbegriff für vulkanische Lockergesteine) und die Torflage auf dem Seegrund, d.h. Ablagerungen von feinerem organischem Material. (Nach AUSTIN 1991; Grafik: Johannes WEISS)



Gesteinsvolumen von $0,25 \text{ km}^3$. Die abgegebene Leistung am 18. Mai 1980 entsprach etwa der hundertfachen Kapazität aller amerikanischen Kraftwerke (DECKER & DECKER 1981).

Abb. 3: Die Gegend nördlich des Vulkans vor und nach dem Ausbruch am 18. Mai 1980. a) Oberhalb der Goat Rocks war die Stelle am Berg, die sich vor dem Ausbruch täglich um über 1 m ausdehnte. Der Nordarm des Toutle River hat ein typisches Entwässerungssystem; im Flußtal verläuft eine Straße bis zu einem Aussichtspunkt (Timberline Viewpoint). Die Wasserfläche des Spirit Lake liegt 975 m üNN.

b) Nach dem Ausbruch hat sich die Landschaft drastisch verändert. Vor dem neu entstandenen Krater haben sich kleine Canyons gebildet. Auf der Bimssteinebene zwischen Vulkan und Spirit Lake kommt es in den ersten Wochen zu weiteren Dampfexplosionen und der Bildung von Einsturzkavernen. Der Nordarm des Toutle River ist mitsamt seinen Zuflüssen unter einer ausgehnten Schuttmassse begraben. Schuttdämme verhindern den Abfluß des Wassers, hinter einigen Schuttdämmen stauen sich neue Seen auf. Die Wasserfläche des Spirit Lake liegt jetzt 1058 m hoch, die Fläche des Sees hat sich fast verdoppelt.

c) Nach dem Schlammstrom vom 19. März 1982 konnte sich im Tal des Toutle River wieder ein Entwässerungssystem ausbilden. Gegenüber der Situation vor dem 18. Mai 1980 sind einige bleibende topographische Veränderungen festzustellen: vergrößerte Seefläche des Spirit Lake, neue Seen (Coldwater Lake, Castle Lake), Vulkankrater, kleine Canyons (Step Canyon, Loowit Canyon) (Nach FOXWORTHY & HILL 1982, AUSTIN 1991; Grafik Hanna JORDAN und Johannes WEISS).

Wahrscheinlich kamen 60 Menschen bei dem Ausbruch ums Leben; etwa die Hälfte von ihnen gilt als vermißt. Dank der umfangreichen Evakuierungsmaßnahmen konnte Schlimmeres verhindert werden. Trotzdem mißachteten viele Menschen die Straßensperren, um näher an den Vulkan heranzukommen. Die Zahl der Todesopfer hätte auch höher ausfallen können, wäre der Vulkan nur einen Tag später ausgebrochen: Am nächsten Morgen sollten 200 Mitarbeiter eines Holzfällerbetriebs ihre Arbeit in der betroffenen Region aufnehmen. Die bekanntesten Opfer sind David A. JOHNSTON, ein junger Vulkanologe, der den Ausbruch von seinem Beobachtungsposten 8 km nördlich des Vulkans miterlebte und sich noch über Funk meldete, und der 84-jährige Harry TRUMAN, der seine Lodge unmittelbar am Spirit Lake trotz ernster Mahnungen nicht verlassen wollte, da er nicht mit einem größeren Ausbruch rechnete – sein damaliger Kommentar: „Niemand weiß mehr über diesen Berg als Harry.“ Einige Zerstörungen erwiesen sich im nachhinein als nicht so gravierend, wie zunächst befürchtet. Schon einige Monate nach dem Ausbruch wurden Tierspuren in der verwüsteten Landschaft entdeckt, die auf eine rasche Wiederbesiedlung hoffen ließen. Auch die Nutzpflanzen unter der dicken Staubschicht waren nicht völlig vernichtet; oft wurden die Pflanzen unter der Staubdecke nur „versiegelt“, örtlich wurden sogar höhere Ernteerträge erzielt. Bereits wenige Tage nach dem Ausbruch erkannte der damalige US-Präsident CARTER die kommerzielle Bedeutung: Der Mount St. Helens könne zu einer Touristenattraktion werden, nur noch vergleichbar dem Grand Canyon.

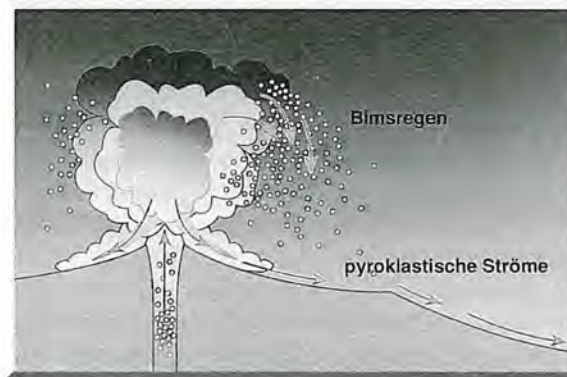
Ablagerungen durch pyroklastische Ströme

Die Gegend nördlich des Vulkans wirkte nach dem Ausbruch wie eine Mondlandschaft. Über die von Vegetation entblößte Landschaft legte sich eine feine Ascheschicht, die das Endstadium von pyroklastischen Strömen kennzeichnet. Ein pyroklastischer Strom ist eine Art heißer Partikelwolke, die sich mit hoher Geschwindigkeit ausbreitet. Sie entsteht, wenn Teile der Eruptionswolke in sich zusammenfallen und den Berghang hinunterrasen. Durch die seitliche Eruption des Mount St. Helens sind die Vorgänge etwas komplizierter, als man sie sich idealerweise vorstellt (Abb. 4). Vulkanisches Material wurde gleich seitlich herausgeschleudert und erhielt später vermutlich noch Nachschub von Aschen, die nicht sehr weit über den Vulkanschlott hinaufgestiegen waren. Je nach Transportmechanismus und Korngrößenverteilung in den Ablagerungen unterscheidet man zwischen einem pyroklastischen Strom und einem pyroklastischen Surge (WALKER & MCBROOME 1983). Für die Ablagerungen am Mount St. Helens werden beide Bezeichnungen benutzt, im folgenden wird der Begriff „pyroklastischer Strom“ verwendet. Zur Entstehung des initialen pyroklastischen Stroms am 18. Mai haben drei Faktoren beigetragen:

- (a) hydrothermales Wasser im Untergrund und in den Klüften des Gesteins wurde infolge der Druckentlastung schlagartig in Dampf umgewandelt,
- (b) magmatische Gase wurden aus dem zerschmeterten Gestein herausgelöst und
- (c) durch den Kontakt mit heißen vulkanischen Partikeln wurden Wasserdampf und Gase aufgeheizt (MOORE & SISSON 1981).

Die Freisetzung vulkanischer Gase aus der zähflüssigen Schmelze (b) dürfte nur von untergeordneter Bedeutung gewesen sein; die plötzliche Dampfexplosion (a) war wahrscheinlich der wichtigste Beitrag, darüber hinaus lassen sich die Anteile nicht näher abschätzen. Die zusätzliche Erwärmung von Luft, Dampf und Gasen durch heiße dazitische (siehe Infokasten 2) Partikel wird auch durch die Beobachtung gestützt, daß die stärkste Schädigung von Bäumen an den Stellen erfolgte, wo die größten Mengen magmatischen Materials liegen. Die Temperatur dürfte dort um 350°C betragen haben. Die Geschwindigkeit des pyroklastischen Stroms wird am Fuß des Vulkans auf rund 600 km/h geschätzt, im Randbereich – etwa 25 km vom Vulkan entfernt – war sie auf 100 km/h abgeklungen. Von Überlebenden wird berichtet, daß die Hitze- welle weniger als 2 Minuten angehalten habe (ROSENBAUM & WATT 1981).

Offenbar erfolgten die Zerstörungen, wie z.B. das Umreißen der Bäume, nicht synchron mit der Schallwelle der Explosion, sondern wurden von der Druckwelle des vernichtenden pyroklastischen Stroms erzeugt. Dieser soll an der Front ca. 200 m hoch gewesen sein, dahinter türmten sich dann



gewaltige Aschewolken auf. Obwohl die neunstündige Ausbruchphase ungewöhnlich gut dokumentiert ist, bereitete es Schwierigkeiten, die einzelnen Beobachtungen und den zeitlichen Ablauf der Eruption mit den Ablagerungen zu korrelieren. Nach ausführlichen stratigraphischen Analysen unterscheidet man heute sechs Phasen mit jeweils verändertem Eruptionsverhalten; der komplexe Verlauf des Ausbruchs mit wechselnder Magmenzu-

Abb. 4: Schematische Darstellung der Entstehung von pyroklastischen Strömen. Aus dem Krater explosiv freigesetztes Gas, frisches Magma und Bruchstücke des alten Vulkanbaus werden in die Luft gestoßen. Teile der Gaswolke verlieren ihren Auftrieb, sinken zusammen und strömen hangabwärts. Pyroklastische Ströme sind sehr heiß; in der Regel kann sich diese dichte, turbulent fließende Gaslawine nur einige Kilometer weit ausbreiten. Bei derartigen Vulkanexplosionen „regnen“ oftmals gasgefüllte Lava-fetzen als Bimssteine nieder.

(Grafik: Johannes WEISS und Hanna JORDAN)

Infokasten 2: Magmatische Gesteine

Vulkanische Gesteine oder Vulkanite gehören zu den magmatischen Gesteinen oder Magmatiten. Die zweite wichtige Gruppe magmatischer Gesteine sind die Plutonite oder Tiefengesteine; zwischen diesen beiden Gruppen gibt es noch die Ganggesteine. Während die Plutonite in mehreren Kilometern Tiefe erstarren und mit der Zeit größere Kristalle ausbilden können, erfolgt die Abkühlung der Vulkanite rasch – sie sind meist feinkörnig oder enthalten größere Kristalle in einer feinkörnigen, teilweise glasigen Grundmasse. Bekannte Beispiele sind der Granit als Tiefengestein und der Basalt als vulkanisches oder Ergußgestein.

Ein einfaches Klassifikationsschema nutzt die chemische Zusammensetzung des ursprünglichen Gesteinsbreis, des Magmas. Die beiden häufigsten Elemente der Erdkruste sind Sauerstoff (chem. Symbol: O) und Silizium (chem. Symbol: Si); sie verbinden sich zu SiO_2 . Nach dem SiO_2 -Gehalt werden die Plutonite und Vulkanite wie folgt untergliedert:

Plutonite	Gabbro	Diorit	Syenit	Granit
Vulkanite	Basalt	Andesit	Trachyt	Rhyolith
	"basisch"		„sauer“	
	SiO ₂ -Gehalt		SiO ₂ -Gehalt	
	weniger als 52%		mehr als 65%	

Das dem Granit entsprechende Ergußgestein ist also der Rhyolith. Auch wenn die Gesteine chemisch identisch sind, führt ihre unterschiedliche Entstehung rein äußerlich zu einem ganz anderen Gestein.

Beim jüngsten Ausbruch des Mount St. Helens wurde sog. Dazit gefördert; hierbei handelt es sich um ein vulkanisches Gestein, das aufgrund seiner Mineralzusammensetzung zwischen Rhyolith und Andesit anzusiedeln ist. Auch bei den älteren Ausbrüchen waren dazitische Laven vorherrschend, doch wurden dazwischen auch Andesite und Basalte gefördert – ein klarer Hinweis auf die komplexen Vorgänge unter dem Vulkan (SMITH & LEEMAN 1993).

sammensetzung, Kristallgröße und anderen Eigenschaften läßt sich auch im Strömungsmodell nachvollziehen (CRISWELL 1987, PAPALE & DOBRAN 1994).

Typisch für die Ablagerungen pyroklastischer Ströme sind ihre Mächtigkeiten: In unmittelbarer Umgebung des Vulkans können sie 10 m und mehr betragen, mit zunehmender Entfernung vom Vulkan nehmen sie rasch ab. Die Ablagerungen passen sich der gegebenen Topographie an, d.h. sie umfließen Hindernisse. Weitere Merkmale sind die Abnahme der Korngröße mit wachsendem Abstand vom Eruptionszentrum und die Gradierung, also eine Sortierung nach der Korngröße, die sich in der Detailansicht als feine Schichtung äußern kann (TUCKER 1985). Vergleichbare Ablagerungen findet man in Mitteleuropa in der Nähe des Laacher Sees (SCHMINCKE 1986); nur wenige Kilometer vom Krater entfernt betragen die Mächtigkeiten der Schichten rund 35 m, als Talfüllungen erreichen sie auch 60 m; heute nimmt man an, daß die mächtigen Ablagerungen innerhalb weniger Tage entstanden (SCHMINCKE 1986). Vulkanische Partikel, die von pyroklastischen Strömen transportiert wurden oder langsam niederregneten, stellen einen Spezialfall der Sedimentation dar; als Produkte von Vulkanen sind sie ausfließenden Laven verwandt. Im Gegensatz zu anderen Sedimenten handelt es sich um ausgesprochen kurzfristige Bildungen (TUCKER 1985).

Spirit Lake

Die in den Spirit Lake stürzenden Schuttmassen und der Ascheregen haben den See schlagartig verändert (LARSON 1993). Die Wasserkapazität wurde zwar geringfügig vermindert, doch lag das Seebecken infolge der Einschwemmung dieser großen Sedimentmenge um über 80 m höher als zuvor; deshalb war die Oberfläche des Spirit Lake nunmehr fast doppelt so groß. Da die Ablagerungen des jüngsten Ausbruchs die Entwässerung des Sees verhinderten, die Zuflüsse aber den Seespiegel ansteigen ließen, verdichtete sich 1982 die Gefahr, daß es zu einem Damnbruch und damit einer gewaltigen Wasser- und Schlammflut kommen könnte. Deshalb begann man zunächst Wasser aus dem See abzupumpen; dann wurde ein Tunnel gebohrt, durch den der See seit 1985 entwässert.

Vor dem Ausbruch war der Spirit Lake ein vergleichsweise gering belebter See – der Fischbestand wurde mit Rücksicht auf die vielen Urlauber und Freizeitfischer jedes Jahr aufgestockt. Durch den Ausbruch gerieten heißes Gestein, Asche und Wasser in den See, die Temperatur stieg von 10°C auf 30°C. Diesem Temperaturschock haben viele Kleinlebewesen nicht standhalten können. Die Konzentration der im Wasser gelösten Mineralstoffe nahm beträchtlich zu, in einigen Fällen, wie z.B. beim Eisen und Mangan, um ein Tausendfaches. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff stieg ebenfalls

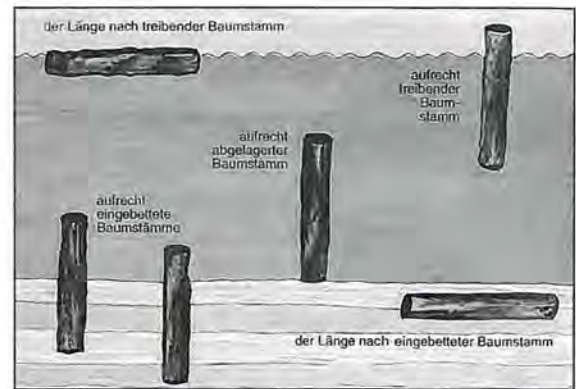


Abb. 5: Schematische Darstellung der Schwimm- und Ablagerungspositionen von Baumstämmen im Spirit Lake. Seit dem Ausbruch treibt eine gewaltige Matte aus Baumstämmen auf dem Spirit Lake. Die Zahl der Stämme hat sich bis heute mehr als halbiert; viele sanken inzwischen auf den Grund. Einige Stämme treiben allerdings in senkrechter Position. Wenn sie absinken, können sie in aufrechter Position auf dem Seegrund abgesetzt werden; eine vorsichtige Schätzung hat ergeben, daß rund 20.000 Stämme im Seebecken „stehen“ (COFFIN 1987). Mit der Zeit werden sie in unterschiedlichen Horizonten eingesedimentiert – möglicherweise handelt es sich hier um die Vorstufe der Entstehung eines „fossilen Waldes“.

(Nach AUSTIN 1991; Grafik: Hanna JORDAN)

rapide an, dagegen wurde der Sauerstoff zunächst völlig aufgebraucht. Aus einem klaren See war ein trübes Gewässer geworden. Schon im Jahr 1982 – und damit viel früher als erwartet – begann sich der See zu regenerieren; der Sauerstoff wurde nicht mehr aufgebraucht, das Wasser wurde klarer. Heute ist der See belebter als vor dem Ausbruch, aber auch der Artenbestand hat sich gewandelt. Eines scheint heute gewiß: der See wird nie mehr in den Zustand zurückkehren, der vor dem Ausbruch herrschte.

Eine Besonderheit ist sicherlich die auf dem See treibende Vegetationsmatte, die aus ab- oder mitgerissenen Baumstämmen, aber auch aus bereits gefällten Hölzern besteht. Die Zahl der Stämme wird auf eine Million geschätzt. Unter den im wesentlichen in waagrechter Position schwimmenden Stämmen wurden auch einige aufrecht treibende entdeckt. Tauchexpeditionen erbrachten den Nachweis, daß ein Teil dieser Stämme auf dem Seegrund aufsetzt, andere aber frei im Wasser schweben (COFFIN 1983). Wenn das Holz mit Wasser gesättigt ist, ist das eine Ende etwas dichter als das andere; der Stamm driftet in eine vertikale Position und beginnt mit der Zeit abzusinken (Abb. 5). Die meisten Baumstämme scheinen aber in horizontaler Lage zu sinken und liegen schließlich auf dem Seegrund. Da sich die Ablagerung der Baumstämme aus der Matte über viele Jahre hinzieht, gleichzeitig aber durch die verstärkte Erosionstätigkeit im Einzugsbereich des Sees viel feines Material eingeschwemmt wird, werden die Baumstämme in unterschiedlichen Sedimenthorizonten eingebettet. Echolotmessungen haben gezeigt, daß die aufrecht abgesetzten Baumstämme Abstände voneinander haben, wie sie natürlich gewachsene Bäume eines Waldes aufweisen (COFFIN 1987).

Die eindrucksvolle Absetzung aufrechter Baumstämme auf dem Seegrund ist allerdings nicht das einzige Beispiel für den Verbleib und die teilweise Konservierung organischen Materials. Bei früheren Ausbrüchen wurden Baumstämme von Laharen (s. u.) mitgerissen und finden sich noch heute in den Lockermassen. Andere Stämme wurden zwischen pyroklastischen Strömen eingebettet und sind in Holzkohle umgewandelt (CRANDELL 1987, 74); an ihnen sind Datierungen mittels der Radiokarbon-Methode ausgeführt worden, die die zeitliche Eingrenzung der Kalama-Ausbruchsphase auf etwa 300-600 Jahre vor heute ermöglichten (CRANDELL 1987, 70).

FRTZ (1980b) beschreibt den Transport und die Ablagerung von Baumstümpfen, deren Wurzelgeflecht z.T. noch erhalten ist. Bei den Baumstümpfen handelt es sich einerseits um die Reste von bei der Explosion abgerissenen Stämmen, es finden sich aber auch von Holzfällern abgesägte Stücke. Die charakteristische Form der Stümpfe mit dem nach unten breiter werdenden Wurzelansatz hat sie in den Schutt- und Schlammfluten regelrecht „schwimmen“ lassen. Nur selten wird in der Literatur auf überkippte Baumstümpfe hingewiesen (FRTZ 1980b), Transport und Ablagerung in der ursprünglichen Position scheinen die Regel zu sein. Im Randbereich der Schlammströme wurden Baumstümpfe und treibende Stämme neben fest verwurzelten Bäumen abgesetzt. Hierin sieht FRTZ eine Analogie zu einem Teil des „versteinerten Waldes“ (in Ablagerungsgesteinen eingebettete, inzwischen versteinerte Baumstämme) im Yellowstone Nationalpark, für den er nur kurz zuvor (FRTZ 1980a) eine fluviatil-sedimentäre Entstehung nachgewiesen hat (siehe auch KAROWE & JEFFERSON 1987).

Schlammströme

Die größten Schäden entstanden durch die ausgelösten Schlammströme, die sich durch mehrere Flußsysteme wälzten; zahlreiche bereits gefällte oder durch den Ausbruch entwurzelte Baumstämme wurden mitgerissen, Brücken zerstört und Flußtäler verstopft (Abb. 7). Genaugenommen ist „Schlammstrom“ ein mehr populärer Begriff, der anschaulich die schlammigen („matschigen“) Massen unterschiedlicher Entstehung beschreibt; ein mögliches Kriterium für diese Bezeichnung ist der prozentuale Anteil von Ton, der über 25 % betragen sollte. Bei den Schlammströmen am Mount St. Helens handelt es sich dagegen um sog. Lahare, die nach weiter gefaßter Definition Schuttströme im Zusammenhang mit vulkanischen Erscheinungen sind. Meist enthalten sie auch vulkanisches Material, d. h. mitgerissene Gesteinsbrocken. Wegen der Vielfalt möglicher Erscheinungen lassen sich zur Zeit keine klar trennenden Begriffe anwenden (SCOTT 1988).

Detaillierten Untersuchungen zufolge finden sich um den Vulkan die Ablagerungen von mindestens 35 Laharen aus den verschiedensten Eruptionsphasen; durch die abtragende Tätigkeit der Ströme wurden auch Anschnitte von älteren Ablagerungen freigelegt (SCOTT 1988). Zumindest ein früherer Lahar war um rund eine Größenordnung stärker als die jüngsten Ströme im Mai 1980 und März 1982. Dennoch ist das Ausmaß der jüngsten Schlammfluten beträchtlich: Sie reichten bis zur Mündung des Cowlitz River in den Columbia River, das ist eine Entfernung von etwa 100 km zum Vulkan. Die geschätzte Geschwindigkeit des South Fork-Lahar betrug im Oberlauf ca. 30 m/sec, am Zusammenfluß mit dem North Fork-Lahar noch 10 m/sec. Letztgenannter folgte dem Flußbett mit 6-12 m/sec; im North Fork Toutle River wurde eine so große Menge Schutt abgelagert, daß die Entwässerung nahezu unterbunden war.

Abb. 6: Blick vom Nordhang des Vulkans Richtung Nordosten. Die Erosionskraft von Schlammströmen hat in den Schuttablagerungen vor dem Vulkankegel kleine Canyons geformt. Im Hintergrund ist der Spirit Lake zu sehen, der teilweise noch von einer Matte schwimmender Baumstämme (links) bedeckt ist. (Foto: Martin ERNST)



Abb. 7: Schlammströme entwickelten sich auch auf der von der Explosion abgewandten Seite des Vulkans. Im Bild sind die Ablagerungen eines Schlammstroms auf der Südostseite des Vulkans zu sehen. Baumstämme auf dieser Seite des Berges wurden zwar vom Schlammstrom mitgerissen, aber nicht durch den Vulkanausbruch geschädigt. (Foto: U.S.D.A. Forest Service photo)



Abb. 8: Auf der Nordostseite des Spirit Lake ist die Wasserstandsmarke der Flutwelle auch im Jahr 1992 noch deutlich zu erkennen. Nicht nur der Boden und die Vegetationsdecke wurden mitgerissen, auch das anstehende Gestein wurde erodiert; der Untergrund weist Schrammen auf, wie sie in ähnlicher Weise auch von Gletschern erzeugt werden. (Foto: Martin ERNST)

Als Ursache der Entstehung der Schlammfluten werden die von der Schuttlawine mitgeführten Eis- und Schneemassen angesehen, durch deren Schmelzen sich die gesamte Schuttmasse zunehmend verflüssigte. Die Wucht, mit der der Schutt in den Oberlauf der Flußsysteme stürzte, die im Flußtal mitgerissenen Lockermassen und das in den Flüssen mitgeführte Wasser trugen zur Dynamik der Schlammströme bei. Die Temperaturen des Schlammes wurden auf 50-250°C geschätzt, doch legen die geringen Schäden an organischem Material eine Temperatur von unter 100°C nahe.

Der Schlammstrom vom 19. März 1982 erreichte fast noch einmal die Dimension der Ströme vom Mai 1980. Ein Ausbruch des Vulkans löste eine Schutt- und Eislawine aus, die eine Strecke von bis zu 8,4 km zurücklegte (WATT et al. 1983). Durch das rasche Schmelzen von Eis und Schnee im Krater und an den Berghängen entstand im Krater ein See. Das Wasser brach plötzlich aus dem Kraterbecken aus und flutete den Hang hinab. Die Flutwelle vermischte sich mit lockerem Schutt und entwickelte sich schließlich zu einem Schlammstrom, der größtenteils dem Tal des Toutle River folgte. Das Fassungsvermögen des Flußbetts war gering, so daß der Höchststand der Schlammfluten aus dem Jahr 1980 nur um wenige Meter verfehlt wurde. Im Cowlitz River, 84 km vom Krater entfernt, stieg der Wasserpegel nur noch um 25 cm. Durch die Lawine und den Schlammstrom haben sich die topographischen Verhältnisse am Fuß des Vulkans verändert, z.T. entstanden neue Ablagerungen, an anderen Stellen wurden die Ablagerungen aus dem Jahr 1980 weggerissen (Abb. 6 und 7). Ebenfalls auf Schlammströme werden die faszinierenden Abtragungsstrukturen vor dem Vulkan und im Tal des Toutle River zurückgeführt: Die Schutt- und Aschemassen werden von steilen, über 30 m tiefen Schluchten durchzogen, durch die heute kleine Flüsse strömen. Diese Landschaft wird von zahlreichen Einheimischen und Forschern als der „Little Grand Canyon“ bezeichnet.

Datierung

Frühere Ausbruchsphasen lassen sich durch die Radiokarbon-Methode und die Baumring-Analyse recht gut eingrenzen. VOLPE & HAMMOND (1991) haben sowohl älteres vulkanisches Material als auch jüngst gefördert Magma auf den Gehalt an Nuklidien aus der Uran-Zerfallsreihe untersucht. Da es sich bei dem Vulkan um ein offenes System handelt – Zerfallsprodukte können weggeführt werden oder sich in Teilen der Schmelze bevorzugt konzentrieren – messen sie den resultierenden Alterswerten eine geringere Aussagekraft bei und ziehen die Interpretation der Isotopenverhältnisse zur Beschreibung magmatischer Prozesse vor.

Trotz aller Einschränkungen bleibt festzuhalten, daß die gemessenen Isotopenverhältnisse insofern im Trend liegen, als sie Alter von weniger als 50.000 Jahren anzeigen. Die Radium-Thorium-Alter nehmen mit einer Ausnahme gemäß der geologischen Folge mit wachsendem Alter zu. Die Thorium-Uran-Alter wurden aus Isochronen-Diagrammen gewonnen; da die Steigung der Geraden extrem flach verläuft (nach der Geradengleichung entspricht die Steigung dem Alter), ist der Fehler groß. Der in den 80er Jahren geförderte Dazit innerhalb des Kraters liefert einen Alterswert von 6.000 ± 4.000 Jahren. Das erscheint plausibel, denn die Isotopenverhältnisse haben sich nicht erst beim Ausbruch eingestellt, sondern in dem zähen Magma waren schon Kristalle vorhanden; demnach zeigen die berechneten Alter nicht den Zeitpunkt des Vulkanausbruchs, sondern den der Kristallisation des einst in den Vulkanbau vorstoßenden Magmas an. Schwieriger zu deuten sind die hohen Alter von Andesit und Basalt aus der Castle-Creek-Eruptionsperiode (1.700-2.200 Jahre vor heute). Mit rund 30.000 Jahren sind sie deutlich zu hoch; möglicherweise liegt hier eine Vermischung mit älterem Material vor.



Abb. 9: Von der Flutwelle wurden Baumstämme mitgerissen und in die Schuttmassen eingesedimentiert. Ein Teil des Schutts blieb an der Nordostseite des Spirit Lake liegen, das übrige Material wurde wieder in den Spirit Lake zurückgeschwemmt. (Foto: Martin ERNST)

Weitere Beobachtungen

Teile der Landschaft um den Mount St. Helens stehen heute unter Naturschutz; man überläßt die Natur sich selbst und hat dadurch die Möglichkeit, die Regeneration einer Landschaft nach einer geologischen Katastrophe zu studieren (Abb. 10). Zu den weiteren Besonderheiten im Anschluß an die Schuttlawinen, pyroklastischen Ströme und Schlammströme zählen neu entstandene Seen hinter Schuttwällen (Coldwater Lake und Castle Lake) und die Abtragungsstrukturen an den Hängen um den Spirit Lake – eine gewaltige Wasserwelle war bis zu 260 m hochgeschwappt und hatte die Hänge bis auf den Untergrund erodiert (Abb. 8 und 9). An einigen Berghängen sind Rillen und Wellen im Fels zu beobachten, die mehrere hundert Meter lang sein können und durchschnittliche Wellenlängen von etwa 5 m aufweisen. Diese Furchen hat man erst einige Jahre nach dem Ausbruch entdeckt, nachdem die Ascheschicht von den kleinen Erhebungen in die Rillen gespült worden war; dadurch entstand ein Farbkontrast, wodurch diese Strukturen bei der Auswertung von Luftbildern auffielen (KIEFER & STURTEVANT 1988).

Ausblick

Angesichts der Bündelung geologisch relevanter Ereignisse und Folgeerscheinungen während der jüngsten Ausbruchphase des Mount St. Helens mag es zunächst überraschen, wenn die an den Forschungen beteiligten Vulkanologen meinten, nichts prinzipiell Neues oder Unerwartetes festzustellen: alle Phänomene waren von anderen Ausbrüchen her bekannt oder konnten an den Auswirkungen historischer Vulkanexplosionen noch abgelesen werden. Unterschätzt wurde lediglich die Wucht der einige Minuten dauernden seitlichen Eruption; die Sicherheitszone nördlich des Vulkans war immer noch zu knapp bemessen. Trotzdem war der Ausbruch für die Wissenschaftler von außerordentlichem Wert: nie zuvor war es möglich, innerhalb eines begrenzten und relativ leicht zugänglichen Areals eine Vulkankatastrophe so gut zu dokumentieren. Die Natur hat ein „Labor“ eingerichtet, in dem in rascher Folge und interessantem Wechselspiel heftige geologische Prozesse ablaufen.

Dabei drängt sich die Frage auf, wie die Beobachtungen am Mount St. Helens (gemäß dem Aktualismus-Prinzip) auf frühere Vulkanausbrüche und ihre Folgen zu übertragen sind – allein während der letzten Jahrhunderte gab es weitaus größere Vulkankatastrophen. Im Moment ist es sicherlich noch zu früh, um eine detaillierte Analyse zu erwarten. Vorläufig bleibt festzuhalten, daß kurzfristige, ruckartige Ereignisse zu ähnlichen Phänomenen führen können, wie die zeitlich akkumulierten Wirkungen langsamer Prozesse. Das Tal des Toutle River ist



dafür ein gutes Beispiel: Ein Schlammstrom hat kleine Schluchten und Täler in die Schuttmassen gerissen, so daß darin heute Bäche fließen. Wie bereits im Prolog erörtert, kann eine Wirkung (Fluß strömt durch eine Schlucht) verschiedene Ursachen haben. Der Fluß kann sich im Verlauf langwieriger Abtragungsprozesse in sein Tal gegraben haben, er kann sich aber auch einem bereits vorgezeichneten Relief angepaßt haben – drastisch gesprochen: Erst das Tal, dann der Fluß.

Das gewählte Beispiel beinhaltet übrigens noch ein pikantes Detail: Hätte man der Natur freien Lauf gelassen, wäre der Spirit Lake vermutlich ausgebrochen; eine Flut- und Schuttlawine hätte sich ins Tal des Toutle River ergossen und die Landschaftsformen erneut verändert. Durch den Tunnel wurde der Seespiegel jedoch gesenkt und der Druck auf den Schuttdamm verringert. Damit hat der Mensch den natürlichen Lauf der Dinge unterbrochen und die insgesamt um den Vulkan ablaufenden Vorgänge an einer wichtigen Stelle regelrecht angehalten, eine Momentaufnahme konserviert. Die Schutzmaßnahmen waren ohne Zweifel erforderlich; für den Geowissenschaftler aber, der im Rahmen des Aktualismus-Prinzips forscht, sind die menschlichen Eingriffe ein nicht zu vernachlässigender Störfaktor!

Ob der Mount St. Helens in den nächsten Jahrzehnten schweigen wird, kann heute niemand mit Sicherheit sagen. Immerhin haben sich die früheren Ausbruchphasen über einen längeren Zeitraum hingezogen, jeweils unterbrochen von einigen Jahren der Ruhe. Auf ein erneutes Aufleben der vulkanischen Aktivität sind die Vulkanologen vorbereitet: Schließlich war – und ist – der Mount St. Helens der gefährlichste Vulkan im Kaskadengebirge.

Dank

Bei Michael KOTULLA, Dr. Martin ERNST und Dr. Reinhard JUNKER möchte ich mich ganz herzlich für wertvolle Anregungen und kritische Diskussionen bedanken.

Abb. 10: Wiederbesiedlung in der verwüsteten Landschaft, hier am Meta Lake im August 1992. Beim Ausbruch wurden Sämlinge von Koniferen unter mitgerissenem Eis oder Schnee begraben und konnten so im Boden überleben; heute sind die Bäume bereits über 3 m hoch. Pionierpflanzen haben die Landschaft erobert, auch Tiere haben sich in neuen Lebensräumen ausgebreitet. (Foto: Martin ERNST)

Literatur

- AUSTIN SA (1991) Mount St. Helens: A slide collection for Educators. Geological Education Materials, ICR, El Cajon.
- CHRISTIANSEN RL & PETERSON DW (1981) Chronology of the 1980 eruptive activity. US Geological Survey Professional Paper 1250, 17-30.
- COFFIN HG (1983) Erect floating stumps in Spirit Lake, Washington. *Geology* 11, 298-299.
- COFFIN HG (1987) Sonar and scuba survey of a submerged allochthonous „forest“ in Spirit Lake, Washington. *Palaos* 2, 178-180.
- CRANDELL DR (1987) Deposits of pre-1980 pyroclastic flows and lahars from Mount St. Helens volcano, Washington. US Geological Survey Professional Paper 1444, Washington.
- CRANDELL DR, MULLINEUX DR & RUBIN M (1975) Mount St. Helens volcano: recent and future behavior. *Science* 187, 438-441.
- CRISWELL CW (1987) Chronology and pyroclastic stratigraphy of the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. *J. Geophys. Res.* 92, 10237-10266.
- DECKER R & DECKER B (1981) Die Ausbrüche des Mount St. Helens. *Spektrum der Wissenschaft* (Mai), S. 32-46.
- FOXWORTHY BL & HILL M (1982) Volcanic eruptions of 1980 at Mount St. Helens. The first 100 days. US Geological Survey Professional Paper 1249, Washington.
- FRITZ WJ (1980a) Reinterpretation of the depositional environment of the Yellowstone „fossil forests“. *Geology* 8, 309-313.
- FRITZ WJ (1980b) Stumps transported and deposited upright by Mount St. Helens mud flows. *Geology* 8, 586-588.
- HUGHES JM, STOIBER RE & CARR MJ (1980) Segmentation of the Cascade volcanic chain. *Geology* 8, 15-17.
- KAROWE AL & JEFFERSON TH (1987) Burial of trees by eruptions of Mount St Helens, Washington: implications for the interpretation of fossil forests. *Geol. Mag.* 124, 191-204.
- KIEFER SW & STURTEVANT B (1988) Erosional furrows formed during the lateral blast at Mount St. Helens, May 18, 1980. *J. Geophys. Res.* 93, 14793-14816.
- LARSON D (1993) The recovery of Spirit Lake. *American Scientist* 81, 166-177.
- LIPMAN PW & MULLINEUX DR (eds, 1981) The eruptions of Mount St. Helens, Washington. US Geological Survey Professional Paper 1250, Washington.
- MOORE JG & Sisson TW (1981) Deposits and effects of the May 18 pyroclastic surge. US Geological Survey Professional Paper 1250, 421-438.
- PAPALE P & DOBRAN F (1994) Magma flow along the volcanic conduit during the Plinian and pyroclastic flow phases of the May 18, 1980, Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.* 99, 4355-4373.
- ROSENBAUM JG & WAITT RB (1981) Summary of eyewitness accounts of the May 18 eruption. US Geological Survey Professional Paper 1250, 53-67.
- SCHMINCKE H-U (1986) Vulkanismus. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- SCOTT KM (1988) Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system. US Geological Survey Professional Paper 1447-A, Washington.
- SMITH DR & LEEMAN WP (1993) The origin of Mount St. Helens andesites. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 55, 271-303.
- TUCKER ME (1985) Einführung in die Sedimentpetrologie. Enke, Stuttgart.
- VOLPE AM & HAMMOND PE (1991) ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibrium in young Mount St. Helens rocks: time constraint for magma formation and crystallization. *Earth Plan. Sci. Lett.* 107, 475-486.
- WAITT RB, PIERSON TC, MACLEOD NS, JANDA RJ, VOIGHT B & HOLCOMB RT (1983) Eruption-triggered avalanche, flood, and lahar at Mount St. Helens – effects of winter snowpack. *Science* 221, 1394-1397.
- WALKER GPL & MCBROOME LA (1983) Mount St. Helens 1980 and Mount Pelée 1902 – Flow or surge? *Geology* 11, 571-574.
- Berichte im Nachrichtenmagazin TIME vom 2. 6., 9. 6. und 22. 9. 1980.

Strategien und mikroevolutionäre Entwicklungen des Zugverhaltens von Singvögeln

André-Alexander Weller, Kupferbergstraße 41,
67292 Kirchheimbolanden

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren führten umfangreiche Untersuchungen zum Vogelzug zu neuen Erkenntnissen über allgemeine und artspezifische Strategien und deren Ursachen bei verschiedenen Singvögeln. Studien an Mönchsgrasmücken (*Sylvia atricapilla*) haben beispielsweise gezeigt, daß das Orientierungsverhalten stark von Genen beeinflusst wird, welche offensichtlich die Zugrichtung, aber

auch die Zugaktivität zu bestimmen scheinen. Obwohl diese Ergebnisse teilweise widersprüchlich gedeutet werden, weisen sie auf mikroevolutionäre Entwicklungen im Zuggeschehen hin. Sie könnten Teilpopulationen bestimmter Arten erlauben, in relativ kurzer Zeit auf Umweltveränderungen zu reagieren bzw. günstigere Flugrouten und Überwinterungs-orte auszuwählen.

Wie nur wenige andere Vertreter des Tierreichs sind die Vögel aufgrund ihrer morphologischen