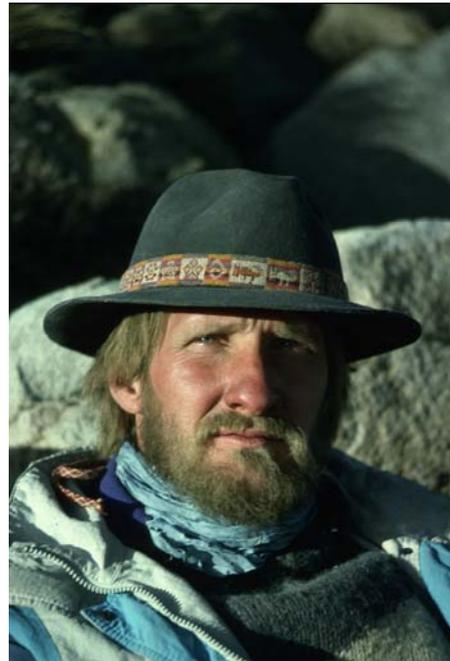


"Vulkane : Gefahrenherd und Lebensspender"

GERHARD WÖRNER

Hintergrundinformation für Lehrer
Zur Kinder-Uni-Vorlesung 18.4.07, EGU Wien

Unsere Erdoberfläche ist geprägt durch starre kontinentale und ozeanische Platten, die sich gegeneinander verschieben. Neue ozeanische Kruste bildet sich stetig an untermeerischen mittelozeanischen Rücken (divergierende Plattengrenzen). Die Konvergenz von Platten führt dazu, dass ozeanische Kruste an "Subduktionszonen" wieder in das Erdinnere absinkt oder - im Falle der Kollision von Kontinenten - sich hohe Gebirge aufürmen. An beiden Arten von Plattengrenzen gibt es vulkanisch aktive Zonen. Vulkanismus und Kontinentalverschiebungen sind Ausdruck der inneren Kräfte unseres Planeten. Diese Prozesse werden angetrieben im wesentlichen durch die Wärme aus dem radioaktiven Zerfalls einiger Elemente, vor allem K, U, und Th. Der Abtransport dieser Wärme durch Konvektionsbewegungen im Erdkörper bedingt Bewegungen im Erdmantel, die Verschiebung der Platten und den Vulkanismus. Mit dem Begriff "Plattentektonik" werden diese globalen Umwälzungsprozesse im Innern und an der Oberfläche der Erde beschrieben. Sie erzeugt einen



Gerhard Wörner, Professor der Geochemie an der Universität Göttingen, o. Mitglied der Göttinger Akademie seit 2003

beständigen Kreislauf der Gesteine und Erdplatten, formen die Ozeane und Kontinente immer wieder neu und führen so zu einem langsamen, aber ständigen Wandel der Lebensräume des Planeten.

Auf Venus und Mars, unseren Nachbarplaneten, gibt es keine Plattentektonik, keine Kontinente, kein flüssiges Wasser und auch kein Leben. Daraus ergibt sich die These :

Der Vulkanismus und die Plattentektonik bedingen die geochemische Differentiation der Erde und die Bildung der Kontinente; diese Prozesse sind ein Element im System Erde, das für die Entstehung und Evolution des Lebens und die Stabilisierung der Lebensräume essentiell ist.

Diese These soll hier gestützt werden zum einen durch eine Darstellung von grundlegenden Prozessen im System Erde mit besonderem Merkmal auf die Rolle des Vulkanismus bei der chemischen Differentiation unseres Planeten. Im zweiten Teil wird über die Ergebnisse einer Fallstudie an Vulkanen Kamchatkas berichtet, als Beispiel für den selektiven Transport von Elementen an einer Subduktionszone.

Am Anfang sollen allerdings einige Überlegungen stehen zum Thema "Vulkane und Menschen".

Vulkane und Menschen

Der Mt. St. Helens (Abb. 1), der im Oktober 2004 durch seinen erneuten Ausbruch wieder kurz das Interesse der Medien weckte, bringt die Vulkane wieder in das Bewusstsein der Menschen. Mit verlässlicher Regelmäßigkeit finden die Bilder von explosiven Vulkanen den Weg in unsere Wohnzimmer, fast könnte man glauben, die Zahl der Vulkaneruptionen und die Gefahr für die Menschen nimmt zu.



Abb. 1:
Der Vulkan Mt. St. Helens,
aufgenommen wenige Tage
nach der großen Eruption
vom 18.5.1980
Foto : Wörner

Seit dem Jahre 1500 starben ca. 222.000 Menschen an den Folgen des Vulkanismus, allerdings davon weniger als 20 % durch dessen direkte Wirkung. Gefährlich sind vor allem die Folgen : Schutt- und Schlammströme, Tsunamis und Hungersnöte. Aber vor allem durch den unmäßigen Anstieg der Bevölkerung in den armen Ländern verbunden mit der Suche nach Ackerland und billigem Baugrund siedeln immer mehr Menschen im direkten Umkreis gefährlicher Vulkane. Man muss nur die ausgedehnten Siedlung von Millionen von Menschen am Fuße des Vesuvs oder des Vulkans El Misti in Peru betrachten und wissen, dass sie alle auf Glutlawinen-Ablagerungen der jüngsten geologischen Vergangenheit gebaut sind. Nicht die Vulkane werden gefährlicher, sondern die Menschen rücken ihnen immer näher zu Leibe.

Es gibt auf der Welt etwa 1300 bekannte Vulkane, die seit der letzten Eiszeit aktiv gewesen sind, davon allerdings nur 21 in Europa. Dazu kommen Tausende weiterer Vulkane, die heute inaktiv sind, aber nach langem Schlaf wieder erwachen können. Was jedoch für die Menschen und die Medien sensationelle und singuläre Ereignisse sind, ist für unsere Erde der ganz normale Gang der Dinge, und dies schon seit einigen Milliarden Jahren. Der Vulkanismus und die Kräfte, die ihn antreiben, haben das Gesicht unseres Planeten wesentlich geformt.

Die Ur-Atmosphäre der Erde wurde durch die Ausgasung von Vulkanen gebildet und später durch die Photosynthese der Pflanzen und die Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und der Gesteinsoberfläche weiter in ihrer Zusammensetzung verändert. Es besteht eine enge Wechselbeziehung zwischen der Zusammensetzung der Atmosphäre, der Hydrosphäre (den Ozeanen), sowie der Erdoberfläche (Lithosphäre) und den Pflanzen (Biosphäre). Diese Sphären stehen in einem Kreislauf miteinander in Beziehung, wobei die Verschiebung der Krustenplatten, die Gebirgsbildung und die Vulkane an den Störungszonen zwischen den Platten immer wieder dafür sorgen, dass neues Gestein in diesen Kreislauf eingebracht wird. Betrachtet man die Zusammensetzung der Erde als Ganzes, aus kosmochemischer Sicht, so wäre sie eine unfruchtbare Welt. Erst durch die Aufschmelzung des Erdmantels und den

**Die vulkanisch aktiven Zonen der Erde produzieren ca. 35 km³ Magma pro Jahr
Das Volumen der Kontinente entspricht ca. 1-3% der Magmenproduktion in der
gesamten Erdgeschichte**

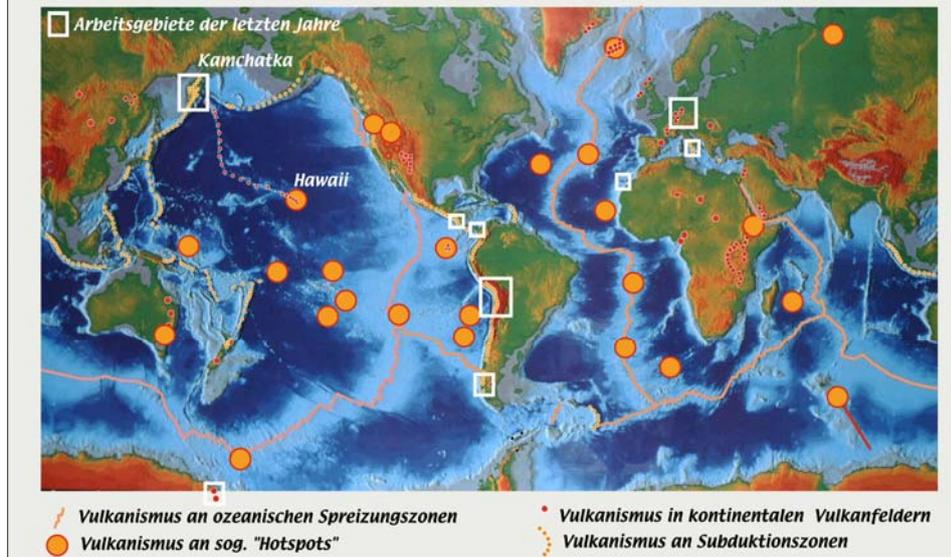


Abb. 2 :
Weltkarte mit den
unterschiedlichen
vulkanisch aktiven
Gebieten

Aufstieg der Magmen zur der Oberfläche wurden lebensnotwendige Elemente wie Kalium, Phosphor, Kohlenstoff, Stickstoff und das Wasser an der Erdoberfläche angereichert (Abb. 3). Neben diesen elementaren Grundlagen des Lebens, die später noch vertieft werden, haben große Vulkanausbrüche vermutlich auch die Entwicklung der menschlichen Zivilisation und den Gang der Geschichte beeinflusst.

Die Wiege der Menschheit liegt im afrikanischen Riftgraben, der schon seit vielen Millionen von Jahren durch Vulkanismus geprägt wird und dort sind die frühesten Fußspuren der Menschen in feuchte Vulkanasche gedrückt. Durch den Vulkanismus entlang von Plattengrenzen entstehen lange Aufreihungen von Inseln (Aleuten- und Kurilenbogen, Antillen, Java und Indonesien, Abb. 2). Wenn die Eiszeiten den Meeresspiegel senkt, dienen diese Inselketten als Landbrücken, über die Tiere und Pflanzen von einem Kontinent zum anderen gelangen : so wurde Amerika besiedelt.

Manche deuten die Eruption des Thera-Vulkans als den Untergang der minoischen Kultur. 1500 v. Chr. versank die Vulkaninsel bei einer großen Eruption mit einem verheerenden Tsunami in der Ägäis und hinterließ nur einen Ring von drei schmalen Inseln, die größte heute bekannt als Santorini.

Über das Jahr 535 n.Chr. schreibt Cassiodorus *"Die Sonne ... hat scheinbar ihr Licht verloren und ist von blauer Farbe. Wir wundern uns, unsere Schatten nicht zu sehen am Mittag und die mächtige Kraft der Sonnenwärme ist vergangen zu Schwäche, und die Phänomene der Eclipse dauerte fast ein Jahr. Wir hatten... einen Sommer ohne Wärme.... die Saat verfror im Nordwind... und der Regen blieb aus."* In den folgenden Jahren zeigen Baumringe ungewöhnlich schlechte Wachstumsbedingungen, es kam zu Dürre, Flut und Ernteausfällen, in deren Folge zu Hungersnot. Pest-Epidemien brachen aus und Imperien zerfielen. Folgt man Keys (1999), so wurde diese globale Krise durch eine Eruption des notorischen Krakatau-Vulkans ausgelöst, und die Umwälzungen aus dieser Katastrophe markieren, so Keys (1999), den Beginn der modernen Welt.

Auch die Laki-Eruption, die im Jahre 1783 fast 10.000 Isländern durch eine Hungersnot das Leben kostete, hatte möglicherweise weitergehende Folgen. Die Belastung der Atmosphäre führte zu einer kurzzeitigen Klimaverschlechterung in Europa. Dies äußerte sich als Erniedrigung der mittleren Jahrestemperaturen sowie in einer Reduzierung landwirtschaftlicher Erträge und hatte Versorgungsnöte und Unruhen in Europa zur Folge.

Könnte diese Vulkaneruption zur französischen Revolution wenige Jahre später beigetragen haben ?

Vulkaneruptionen, Erdbeben und Tsunamis sind Folge der inneren Dynamik der Erde. Sie haben große Verheerungen über die Menschen gebracht. Daher ist es kaum zu bezweifeln, dass Naturkatastrophen globalen Ausmasses die Entwicklung der Menschheit grundlegend beeinflusst haben. Sicher ist, dass sie dies auch in Zukunft tun werden. Doch ohne diese innere Dynamik wäre Leben auf unserem Planeten gar nicht möglich.

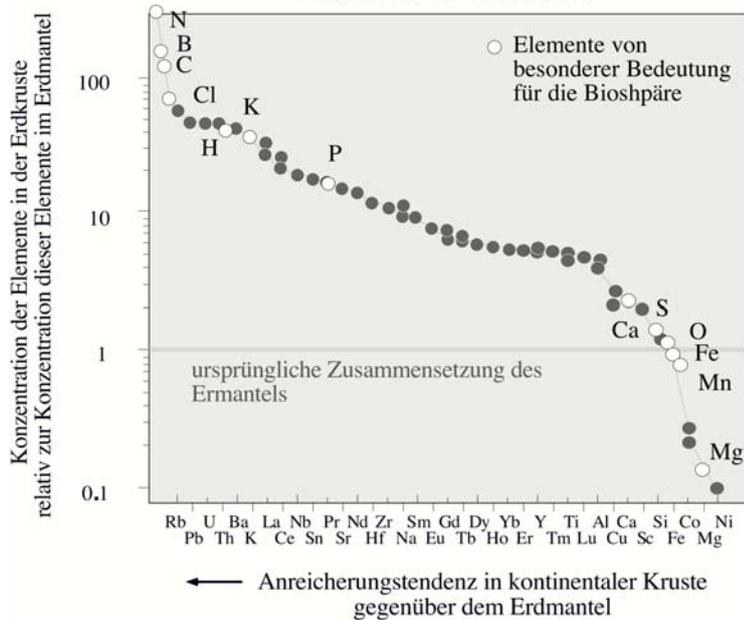
Vulkane als Lebensspender

Es gibt erstaunlich viele planetare Parameter, die als unbedingte Voraussetzungen für höheres Leben auf unserem Planeten anzusehen sind. Es sind unter anderem die Nähe des grossen Saturn, die Anwesenheit des Mondes und der richtige Winkel der Erdachse zur Ekliptik, um nur wenige einige der essentiellen Voraussetzungen zu nennen. Ward und Brownlee (2000) schliessen daraus, dass primitives Leben auf Planeten und Monden im Kosmos zwar durchaus wahrscheinlich sein könnte, die Voraussetzungen für höheres, intelligentes Leben könnten jedoch tatsächlich nur auf der Erde gegeben sein. Eine der notwendigen Bedingungen, auf die ich mich hier konzentriere, sind die Prozesse der Plattentektonik und des Vulkanismus, die die Kontinente geschaffen haben. Ohne Kontinente, ohne Kontinentalverschiebung, ohne die Kollision und Subduktion von Platten und den damit verbundenen Vulkanismus wäre höheres Leben auf der Erde unmöglich.

Die Erde entstand wie die anderen Planeten unseres Sonnensystems vor ca. 4,5 Milliarden Jahren innerhalb nur weniger Millionen Jahren durch die rasche Akkretion von kaltem kosmischem Staub, Meteoritentrümmern und frühen "Planetesimals". Die Erde ist aber der einzige Planet, auf dessen Oberfläche sich Kontinente, Ozeane und Leben finden. Weil die Erde eine ausreichende Größe hat, konnte sie die flüchtigen Elemente sowie das Wasser in der Frühphase der Bildung der Erde gravitativ an sich binden. Mit zunehmender Abkühlung und dem Abklingen des frühen Meteoriten-Bombardement bildete sich auf der Oberfläche der Ozean. Die ideale Distanz zur Sonne stellte sicher, dass das Wasser in flüssiger Form vorlag. Im Inneren der Erde erzeugten die konvektiven Bewegungen des Erdmantels heftige Verschiebungen einer basaltischen Urkruste. Das Ozeanwasser veränderte nun die chemische und mineralogische Zusammensetzung dieser Kruste derart, dass sie bei der unweigerlichen Kollision, Aufstapelung und Subduktion unter Bildung granitischer Magmen aufschmelzen konnte. Diese Magmen stiegen auf und bildeten die Bausteine der ersten Kontinentalkruste. Deren Zusammensetzung ist grundlegend anders als die der basaltischen Kruste, viele leichte Elemente wie Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, und K sind angereichert, sie machen zusammen mit Sauerstoff 98% der Kontinentkruste aus. Es werden aber auch viele schwere Spurenelemente durch den Prozess der Aufschmelzung angereichert (zum Beispiel Pb, s. Abb. 8). In der Summe ergibt sich jedoch eine geringere Dichte, die es unmöglich macht, dass Kontinentalkruste - einmal gebildet - wieder im Erdmantel verschwindet. In der späteren Erdgeschichte sind die Kontinente vor allem durch Subduktion und Vulkanismus an ihren Rändern weiter gewachsen. Ohne die Anwesenheit eines Ozeans gäbe es also auf der Erde nicht diese Form des Vulkanismus und daher auch keine Kontinente (Campbell and Taylor, 1983) und ohne Kontinente gäbe es kein terrestrisches Leben.

Eine weitere wichtige Konsequenz aus dem Prozess der Bildung der Kontinente ist, dass in ihren Gesteinen bestimmte Elemente gegenüber dem Erdmantel, aus dem sie stammen, um ein Vielfaches angereichert sind (Abb. 3, Hofmann, 1988; Wedepohl, 1995). Es gehören einige Elemente dazu, die für Pflanzen und Tiere lebenswichtig sind. *Die Aufschmelzung und der Vulkanismus erzeugen also die Kontinente und ihre typischen Gesteine, die zu Böden verwittern können. Ohne die damit verbundene Anreicherung wichtiger Elemente wäre die Erdoberfläche praktisch gänzlich unfruchtbar (Hofmann, 1988).*

Element-Anreicherungen in der kontinentalen Kruste



(modifiziert nach Hofmann, 1988)

Abb. 3:

Die Anreicherungen lebenswichtiger Elemente in den Gesteinen der Kontinente sind bedingt durch Aufschmelzungsprozesse im Erdmantel, Magmenaufstieg und den daraus resultierenden Vulkanismus.

Ohne Kontinente gäbe es aber auch keine Gebirge, die erodiert werden und auch keine Flachmeere. In den Flachmeeren bilden sich marine Karbonatgesteine. Diese entstehen als Folge der Verwitterung der Kontinentalgesteine durch Kohlensäure (CO_2 der Luft + Regen). Das Carbonat und die gelösten Stoffe (u.a. Ca) gelangen ins Meer, wo sich Calcium-Carbonat ausscheidet, in dem erhebliche Mengen des atmosphärischen CO_2 gebunden werden (Abb. 4). Ohne diese CO_2 -Fixierung wäre die Erde in einem Treibhaus geendet (s. Venus). Doch ohne die Kollision der Kontinente und die Rückführung eines Teils des CO_2 über den Vulkanismus in die Atmosphäre, wäre auch schnell alles CO_2 als Karbonat fixiert und die fehlende Treibhauswirkung des CO_2 hätte die Erde schon früh in ihrer Geschichte in ein Kühlhaus (s. Mars) geführt. Die Bindung von CO_2 als Karbonatgestein ($5,1 \cdot 10^{21}$ mol CO_2 , Lunine, 1999) reduziert also das Treibhausgas; die Kollision der Platten aber führt zur Rückführung von CO_2 und stärkt den Treibhaus-Effekt. Der Netto-Effekt ist eine Klimabalance, die ohne Vulkanismus nicht möglich wäre. Mit der "Erfindung der Photosynthese wurde außerdem Sauerstoff produziert und weiteres CO_2 der Atmosphäre in Form organischer Kohlenwasserstoffe gebunden. Das Ergebnis ist eine Atmosphäre, in der heute freier Sauerstoff und eine Ozonschicht existieren und eine gleich bleibende Temperatur herrscht. *Dies bedingt flüssiges Wasser an der Oberfläche des Planeten und Bedingungen, die höheres terrestrisches Leben erlauben.*



Abb. 4 : Der CO_2 -Kreislauf
Fotos Wörner, Korallenfoto : J. Reitner