

Notizen zur

Vulkanologie

14. Juli 2004

von Michael Wack und Christoph Moder

<http://www.skriptweb.de>

Hinweise (z.B. auf Fehler) bitte per eMail an uns: mail@skriptweb.de – Vielen Dank.

1 Vulkanologie

1.1 Einleitung

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts gab es mehrere Theorien zur Entstehung von Gesteinen. Die Neptunisten behaupteten, der Basalt entstünde im Meer, die Vulkanisten machten die Vulkane an Land für den Basalt verantwortlich. Ein Beweis der Neptunisten sah folgendermaßen aus: Wenn man Basalt aufschmilzt, wird Wasser frei – wenn man die erkaltete Schmelze neu aufschmilzt, kommt kein Wasser mehr heraus, demnach muss der Basalt ursprünglich im Wasser entstanden sein. Die Beobachtung ist richtig, aber die Schlussfolgerung falsch, denn Basalt enthält Amphibol, das wasserhaltig ist. Unter Druck kann sich nämlich sehr wohl flüssiges Wasser in einer vulkanischen Schmelze lösen. Sowohl Neptunisten wie Vulkanisten erklärten die hohen Temperaturen des Vulkanismus mit oxidierenden Schwefelkieslagern oder brennenden Kohleflözen. Durch Untersuchungen von Hutton (1795) kam man auf die Idee von aufsteigenden Magmakammern. Vertreter dieser Ansicht nannte man Plutonisten. Die meisten Erkenntnisse über Vorgänge im Erdinneren stammen aus den letzten Jahrzehnten. Alfred Wegeners Theorie der Kontinentaldrift von 1912 wird erst seit den sechziger Jahren in erweiterter Form (sea floor spreading, Plattentektonik) akzeptiert. Wichtig für neue Erkenntnisse waren vor allem die Seismik (begünstigt durch Atomtest), der Erkundung von Lagerstätten (wirtschaftliche Interessen), die Entstehung der Insel Surtsey (1964) bei Island, neue Technologien (Satelliten, Laser usw.).

1.2 Plattentektonik

Heute sind ca. 550 subaerische Vulkane aktiv. Der meiste Vulkanismus spielt sich aber an den mittelozeanischen Rücken ab. Dort entsteht neue Erdkruste wohingegen sie an den Subduktionszonen verschwindet. Der Pazifik besitzt keinen mittelozeanischen Rücken mehr. Auf der amerikanischen Seite gibt es ein paar kleinere Platten (u.a. Cocos-, Nazca- und Juan-de-Fuca-Platte), aber deren Ränder zur pazifischen Platte sind heute inaktiv – außerdem werden diese Platten in geologisch absehbarer Zeit komplett subduziert worden sein (dies passiert z.B. in Kalifornien, deshalb kommt es dort zu Vulkanismus und Erdbeben), dann ist die pazifische Platte komplett von Subduktionszonen umgeben. Der mittelozeanische Rücken, der die Schrumpfung des Pazifik ausgleicht, liegt im Atlantik und schiebt Amerika nach Westen – dadurch kommt es im Pazifik zum *Ring of Fire*. Ein Ozeanboden ist wie ein Förderband, das vom mittelozeanischen Rücken losläuft. Dies führt zu den typischen symmetrischen magnetischen Streifenmustern, die eine Aufzeichnung der wechselnden Polarität des Erdmagnetfeldes darstellen (Frederick Vine, Drummond Matthews 1963).

Die Kontinentalplatten schwimmen auf der Asthenosphäre und werden von Konvektionswirbeln angetrieben. Ob Konvektion in einem Material auftritt, hängt von der Temperaturdifferenz im Material, seiner Viskosität und seiner Wärmeleitfähigkeit ab.

Es gibt verschiedene Definitionen der Lithosphäre.

- seismische: definiert durch ihre Grenze zu einer Zone niedriger Geschwindigkeiten (LVZ). Mächtigkeit nimmt mit dem Alter zu (mittelozeanische Rücken < 20km – Kratone 200km)
- elastische: ergibt sich rechnerisch aus den Verformungen der Erdoberfläche, wenn sie belastet wird (z.B. durch Hawaii oder Gebirge)
- thermische: kühle äußere Schale (konduktiver Wärmegradient bis 1280°C an der Unterseite), ungefähr doppelt so heiss und somit auch dick wie die beiden anderen Definitionen.

Vulkane treten an den Plattengrenzen auf, aber auch innerhalb der Platten (Hotspots). Vulkane in den Subduktionszonen eruptieren nur ca. 10% der globalen Magmamenge von ca. 4km³ / Jahr(?), repräsentieren aber über 80% der ca. 5350 historischen Eruptionen. Je nach Entstehungsursache haben Vulkane einen unterschiedlichen chemischen Aufbau und damit auch ein anderes Erscheinungsbild.

1.3 Magma

Magma ist partiell aufgeschmolzenes Gestein aus dem Erdmantel bzw. Kruste (kleinerer Anteil). Die Gesteine der meisten Vulkane sind basaltisch, oberhalb von Subduktionszonen häufig rhyolithisch. Magma ist silikatisch, enthält 40-75 Gewichtsprozent SiO_2 (Basalte 50%, Granite 70-75%). Sehr selten gibt es auch karbonatische und sulfidische Schmelzen. Eruptiertes Magma wird Lava genannt.

1.3.1 Einteilung

- **Plutonite** kühlen langsam im Erdinneren ab, deshalb können in ihnen große Kristalle entstehen → grobkörnige Gesteine (z.B. Granit, Granodiorit).
- **Subvulkanite** erstarren dichter unter der Erdoberfläche und damit schneller → feinkörniger.
- **Lava** erstarrt sehr schnell an der Oberfläche. Feinkörnig bis glasig, die Feinstruktur ist nur unter dem Mikroskop zu erkennen. Man unterscheidet scharfkantige Aa-Lava und glatte Stricklava (Pahoehoe-Lava; wird beim Kontakt mit Wasser zu Kissenlava).

Vulkanite lassen sich nach ihrer chemischen Zusammensetzung einteilen:

- dunkel – z.B. Basalt
- heller, intermediär – z.B. Andesit
- hell, hochdifferenziert, felsisch (fälschlich sauer) – z.B. Rhyolith, Phonolith

1.3.2 Aufbau der Erde

Die Erde besteht aus Silikaten und Metallen, wobei sich die Metalle im Kern konzentrieren, während der Mantel und die Kruste aus Silikaten besteht. Die Entstehung ist noch nicht geklärt; zur Debatte stehen eine heterogene Entstehung (um den Eisenkern hat sich der Mantel und die Kruste gebildet) oder eine homogene Entstehung (in der glutflüssigen Erde waren die Elemente vermischt und haben sich erst im Laufe der Zeit getrennt).

- Erdkruste, 5-30km mächtig, Basalt, Dichte $2,67\text{g/cm}^3$
- Erdmantel, 2870km mächtig, Fe- und Mg-reiche Silikate, insbesondere Olivin, Dichte $4,6\text{g/cm}^3$
- Erdkern, 3480km mächtig, Nickel, Eisen, Dichte $10,6\text{g/cm}^3$

Der thermische Gradient vermindert sich mit zunehmender Tiefe.

1.3.3 Entstehung

Basaltische Magmen haben bei der Eruption eine Temperatur von $1100-1250^\circ\text{C}$, deshalb können sie nicht aus der Kruste stammen. Oft enthalten sie Bruchstücke von Peridotit (Olivin/Orthopyroxen), sie kommen also aus dem Mantel. Der Kern scheidet als Quelle aus, da man keinen Eisenvulkanismus beobachtet.

3 Möglichkeiten der Entstehung (in der Natur natürlich gemischt)

- Temperaturerhöhung
- Druckentlastung
- Zufuhr fluider Phasen

2 Unsortierte Notizen

2.1 Warum gibt es Vulkanismus?

- Ein weiterer Streitpunkt war die Entstehung der Gebirge. Bevor sich die Theorie der Plattentektonik durchgesetzt hatte, wurde die Auffaltung von Gebirgen u.a. mit Druck auf dem Erdinneren oder mit dem Schrumpfen der Erde erklärt.
Die Theorie der Plattentektonik stammt von dem deutschen Meteorologen Alfred Wegener, der auf Grönland vom Driften von Eisschollen inspiriert wurde. (Wodurch er aber nicht erklären konnte, wie das zusammen geschobene Material wieder verschwindet; Subduktion ist z.B. bei Eisschollen unbekannt.) Vermutlich gab es bereits vor Wegener Leute (wie z.B. Snider), denen aufgefallen ist, dass die Kontinente (speziell Afrika und Südamerika) von der Form her zusammenpassen, jedoch konnte erst er damit Aufsehen erregen.
- Auf dem Mond gibt es keinen Vulkanismus, er ist erkaltet. Das Mondgestein ist bisher nur an der Oberfläche erforscht, aber die Mondmissionen haben Seismometer installiert, mit denen die Struktur des Untergrunds beobachtet werden kann. Außerdem ist bekannt, dass der Mond kein Magnetfeld hat.
- Die Wärmeproduktion der Erde geschieht vor allem durch radioaktive Stoffe (v.a. Uran, Thorium, Kalium). Dabei ist die Kruste sehr viel stärker radioaktiv als der Erdmantel (weil die großen radioaktiven Atome inkompatibel zu den anderen Elementen im Erdmantel sind, sich schlecht mit ihnen verbinden, und daher leicht in Schmelze ausgeschieden werden, die sie an die Oberfläche bringt). Insgesamt trägt der Erdmantel aber wegen seiner großen Masse doch stark zur Wärmeproduktion bei. (Der Mantel enthält 68% der Erdmasse und sogar 83% des Volumens, während die Kruste nur 0,4% der Masse und 0,1% des Volumens stellt. Der Mantel besteht v.a. aus Peridotit (Olivin, Pyroxen), Spinell und Granat.)
- Künstliche Bohrungen erreichen eine Tiefe von ungefähr 10km auf dem Kontinent und ca. 3km auf dem Meer, d.h. sie durchdringen nicht einmal die Erdkruste. Das Problem ist, dass in großer Tiefe das Gestein weich ist und daher während des Bohrerwechsels sich das Bohrloch wieder schließt.
- Die Masse und die Dichte (d.h. die Ausmaße) von Kruste, Mantel und Kern sind bekannt, und damit der Druck, der in der Tiefe herrscht. Mit der Kenntnis der Tatsache, dass der innere Kern fest und der äußere Kern flüssig ist, kann man die Temperaturen an den Grenzen abschätzen (es kann z.B. im inneren Kern nicht so heiß werden, dass das Material trotz des hohen Drucks flüssig wird).
- Zur Simulation der Vorgänge im Erdinneren gibt es Druckpressen. Eine Bauform drückt mit starker Übersetzung zwei Diamanten zusammen; weil man Diamanten kaum heizen kann (sonst gehen sie kaputt), erhitzt man mit Hilfe eines Laserstrahls. Eine andere Bauform presst das Material zwischen Wolfram – dieses lässt sich besser heizen und erlaubt konstruktiv größere Proben, aber hält nicht so viel Druck aus.
- In der Übergangszone zwischen Kruste und Mantel verändert sich die P-Wellen-Geschwindigkeit nichtlinear. Das Gestein ist von seiner chemischen Zusammensetzung dort nicht anders als in der Umgebung, wohl aber seine physikalischen Eigenschaften, denn dort treten Phasenübergänge auf.
- Ein Reinstoff hat einen festen Schmelzpunkt. Ein Gemisch dagegen hat einen Temperaturbereich, in dem es schmilzt. Oberhalb der Solidus-Linie im Phasendiagramm beginnen erste Bestandteile zu schmelzen, oberhalb der Liquidus-Linie sind alle Bestandteile geschmolzen. Der Erdmantel befindet sich genau im Bereich des Solidus, er ist nicht spröde, sondern duktil.
- Flüssiges Material hat eine geringere Dichte als festes Material und steigt deshalb auf.
- Es wird außerdem kein Granit-Vulkanismus beobachtet, sondern nur Basalt-Vulkanismus. Granitschmelze entsteht nicht im Erdmantel, sondern in der Erdkruste. Obwohl Granit leichter als Basalt ist, einen geringeren Schmelzpunkt hat und wasserhaltiger ist, bleibt es in der Erdkruste stecken und erkaltet dort. Grund: Das Wasser führt zu einer veränderten Liquidus-Kurve; bei fallendem Druck (= Aufsteigen in der Kruste) steigt der Liquidus-Punkt an, weshalb der Granit irgendwann fest wird. Basalt dagegen hat so wenig Wasser, dass dieser Effekt nur im untersten Druckbereich zu beobachten ist – in tieferen Schichten dagegen sinkt der Liquidus beim Aufsteigen.

- Es gibt drei Arten von Vulkanismus:
 - an Spreizungszonen (sea floor spreading); es entsteht MORB (middle ocean ridge basalt). Der meiste Vulkanismus tritt an solchen Spreizungszonen auf. Weil diese meistens unter Wasser liegen, ist ein sehr großer Teil des Vulkanismus auf der Erde unsichtbar.
 - an Subduktionszonen: Das abtauchende Gestein ist relativ wasserhaltig, das Wasser erniedrigt den Solidus von Peridotit, wodurch dieser flüssig wird und oberhalb der Subduktionszone aufsteigt. (Das Wasser liegt dabei *nicht* in flüssiger Form vor, denn die wässrigen Sedimente werden nicht mit subduziert, sondern am Tiefseeegraben aufgeschoben; das Wasser ist statt dessen in die Kristalle mit eingebaut. Unter Druck und Hitze kommt es zu Phasenumwandlungen, das Kristallwasser wird dabei frei. Man vermutet sogar, dass die Volumenänderung durch frei werdendes Wasser verantwortlich für Tiefbeben ist.) Es entsteht CMB (continental margin basalt) bei Subduktion einer ozeanischen Platte unter einer kontinentalen Platte bzw. IAB (island arc basalt) bei Subduktion unter einer anderen ozeanischen Platte.
 - an Hot-Spot-Stellen (Plume: dort, wo die Mantelkonvektion heißes Material nach oben transportiert); es entsteht OIB (ocean island basalt). Auf der Erde sind die Hot-Spot-Vulkane relativ klein, weil sich (wie z.B. bei Hawaii) die Platten über dem Plume bewegen, wodurch der Vulkan wandert und die alten Bestandteile wegerodieren können. Auf dem Mars gibt es keine Plattentektonik – der Olympus Mons (entsprechend ein Hot-Spot-Vulkan, weil es keine Plattengrenzen gibt) bleibt an der gleichen Stelle und kann sich deshalb immer höher auftürmen.

Es sind auch Kombinationen möglich. Beispielsweise liegt Island sowohl auf dem Mittelatlantischen Rücken als auch auf einem Hot-Spot.

- Es gibt folgende Typen von Vulkanen:
 - Ein Schildvulkan ist relativ flach, weil sein Magma wenig Siliziumdioxid enthält und dadurch sehr flüssig ist. Gase können aus der flüssigen Lava leicht entweichen, darum sind bei einem Ausbruch die schnell fließenden rot glühenden Lavaströme („roter Vulkan“) charakteristisch. 90% der Vulkane auf der Welt gehören zu den Schildvulkanen.
 - Ein Schichtvulkan (Stratovulkan, „grauer Vulkan“) entsteht bei relativ kaltem und siliziumhaltigem Magma, das wegen seiner Viskosität viel Gas enthält. Die explosiv verlaufenden Ausbrüche fördern oft abwechselnd Lava und Lockermaterial (Asche, Bomben, Lapilli), wodurch die Schichtung des Vulkangesteins zustande kommt.
 - Ein Maar ist ein Krater, der durch Kontakt von Magma mit Grundwasser gesprengt wurde.
 - Eine Caldera ist ein kesselförmiger Krater, der durch den Einsturz einer Magmakammer oder durch das Wegsprengen von Teilen eines Vulkankegels entstanden ist.

Es sind auch Mischungen möglich. Z.B. ist der Ätna im unteren Teil ein Schildvulkan, im oberen jedoch ein Schichtvulkan. Auch Kissenlava findet sich auf dem Ätna.

- Der innere Aufbau der Erde wurde v.a. aus seismischen Messungen ermittelt. Sehr hilfreich waren dazu die Atombombentests, weil das Quellen von seismischen Wellen sind, die sowohl örtlich als auch zeitlich exakt bekannt sind. Außerdem wurde zur Überwachung der gegnerischen Atombombentests ein weltumspannendes Netz seismischer Messstationen aufgebaut. Ein weiterer Antrieb zur Erforschung waren hydrothermale Lagerstätten (d.h. wo heißes Wasser Fluide erzeugt, die bei bestimmten Temperaturen ausgefällt werden) – man wollte wissen, unter welchen Bedingungen solche Lagerstätten entstehen, um besser nach ihnen suchen zu können.
- Die Erde einen festen Kern. Ermittelt wurde das mit Hilfe der Seismik; nur in festen Medien können neben P-Wellen (Longitudinalwellen, Kompressionswellen) auch S-Wellen (Transversalwellen, Scherwellen) auftreten, und beide Wellentypen haben unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Man kann also bei Wellen, die durch den Kern laufen, zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten beobachten. Es ist möglich, dass der Erdkern früher flüssig war. Eine Konsequenz daraus wäre, dass größere Konvektionswirbel möglich gewesen wären (d.h. nicht nur um den Kern herum, sondern die ganze Erde ausfüllend).

Wenn die Wirbel größer sind, heißt das, dass es weniger Wirbel gibt, wodurch die Erdkruste an einem Punkt zusammen geschoben wird – ein Urkontinent (Kraton, Schild) entsteht. Beim Entstehen neuer Wirbel bildet sich an den Aufstiegszonen unter dem isolierend wirkenden Urkontinent ein Wärmestau, wodurch dieser auseinander getrieben wird.

- Subduktion: Wenn der Druck auf eine der beteiligten Platten nachlässt (z.B. weil sich der mittelozeanische Rücken langsamer ausdehnt) oder wenn sehr schweres Material subduziert wird, das in einem entsprechend steilen Winkel in den Erdmantel eintaucht, wird damit der Rand der Kontinentalplatte entlastet. Dadurch kommt es im hinteren Teil (hinter den Vulkanen an der Subduktionszone) zu einer Entspannung, wodurch die Kruste einbrechen und sich ein Graben parallel zum Plattenrand bilden kann. (In dieser Schwächezone kann sich weiterer Vulkanismus bilden.) Dieser Effekt scheint beispielsweise in Japan aufzutreten: Die japanischen Inseln liegen auf der eurasischen Platte, am Plattenrand zur pazifischen Platte, und aus dem „Graben im Hinterland“ scheint das japanische Meer entstanden zu sein.
- Beurteilung der Gefahren, die durch einen Vulkan ausgehen:
 - Wo ist die Landhebung am stärksten (= Hinweis auf Magmakammer)?
 - Wo ist der mögliche Schaden am größten (weil dort viele Menschen wohnen und teure Infrastruktur vorhanden ist)?
 - In welche Richtungen würde aufgrund der Topographie die Lava fließen?
 - Wohin würde die Asche durch den Wind verfrachtet werden?
- Magma ist teilweise oder vollkommen geschmolzenes Gestein. „Teilschmelze“ bedeutet, dass nur bestimmte Bestandteile des Gesteins geschmolzen sind. Bereits wenn wenige Prozent des Gesteins geschmolzen ist, kann es fließen; wenn ein Drittel geschmolzen ist, hat es bereits praktisch die gleiche Viskosität wie als wenn es komplett geschmolzen ist. Bestandteile von Magma: silikatische Schmelze, gelöste Gase, Kristalle, Gasblasen.
- Die Viskosität von Magma wird neben der Temperatur und dem Druck auch vom Kristallgehalt (je mehr Kristalle, desto viskoser) und dem Wassergehalt beeinflusst. Bereits 1-2%(mol) Wasser sorgen für eine sehr starke Senkung der Viskosität, d.h. aufsteigendes Wasser (z.B. bei der Subduktion wasserhaltiger Gesteine) verflüssigt Magma, während Magma, die ihre Volatilen verloren hat, viskos wird. Grund: Siliziumdioxid ist ein Netzwerkbildner (d.h. erzeugt ein Kristallgitter mit Tetraederbindungen), während Wasser und Alkalimetalle (v.a. Natrium und Kalium) Netzwerkwandler sind (d.h. sie behindern den Aufbau eines Kristallgitters) – entsprechend haben Alkali-reiche Gesteine (Phonolite, Trachyte) einen niedrigeren Schmelzpunkt als Alkali-ärmere Gesteine (z.B. Basalt). Kohlendioxid schwächt die Wirkung von Wasser ab, d.h. stabilisiert die Magma.
- Der obere Erdmantel besteht aus Peridotit (= Olivin und Pyroxen/Orthopyroxen). Basalt ist eine Teilschmelze aus Peridotit (MORB-Basalt: 10-20%; Alkalibasalt: 3-5%); man findet auch an der Erdoberfläche Peridotit, der mit der Basaltmagma nach oben transportiert wurde –
- Die Explosivität von Magma hängt vom Gasgehalt und von der Viskosität ab. Niedrig viskose Magma kann bereits in der Magmakammer entgasen.
- Bradyseism = Hebung oder Senkung der Erdkruste durch Füllung oder Entleerung einer darunter liegenden Magmakammer. Beispiel: Im Ort Pozzuoli (bei Neapel) stehen auf dem Marktplatz drei römische Marmorsäulen; heute stehen sie im Trockenen, während sie in den 1960er-Jahren noch im Wasser standen. An den Säulen sind Spuren von Meerestieren bis in 7m Höhe zu sehen, d.h. so tief müssen die Säulen zwischenzeitlich unter Wasser gewesen sein.
- Calderen sind oft stark erodiert und sehen dadurch bis zu 10% größer als bei ihrer Entstehung aus.
- Entstehungsprinzip einer Caldera: Wie bei einem überkochendem Topf mit zu kleinem Decken, bei dem, nachdem der Druck abgebaut ist, der Deckel nach innen fällt.

- Freies Gas in der Magma (d.h. nicht gelöst) erhöht die Ausbruchswahrscheinlichkeit, weil Gas leichter als Magma durch das Gestein dringt.
- Entstehung von Magma:
 - Druckentlastung \Rightarrow Verflüssigung (tritt z.B. an einem mittelozeanischen Rücken auf)
 - Temperaturerhöhung (z.B. über einem Hotspot) \Rightarrow an einem Hotspot steigt keine Schmelze auf, sondern es ist eine Wärmeanomalie, durch die Schmelze entstehen kann
 - Zufuhr von verflüssigenden Stoffen (z.B. Wasser, an Subduktionszonen)
- Wenn Basaltmagma abkühlt, kristallisieren manche Bestandteile aus, die verbleibende Magma ist Rhyolith. Man kann aus der chemischen Zusammensetzung der Magma also auf die Temperatur, die in der Magmakammer herrschte, schließen.
- Vulkanismus in Deutschland:
 - Der meiste Vulkanismus stammt aus dem Tertiär, lediglich die Eifel-Vulkane stammen aus dem Quartär. Die jüngsten vulkanischen Erscheinungen sind die Maare in der Eifel.
 - Plutonite (d.h. Granit) findet man u.a. im Bayerischen Wald, Fichtelgebirge und Schwarzwald.
 - Vulkanite findet man in der Eifel, Westerwald, Vogelsberg, Hassberge, Rhön und am Kaiserstuhl
- Dolarit ist ein Zwischending zwischen Vulkanit und Plutonit, d.h. Magma, die dicht unter der Erdoberfläche erstarrt ist.
- Magma steigt nur wegen Dichteunterschiede auf. Weil der Dichteunterschied zum umgebenden Gestein umso geringer wird, je weiter oben die Magma ist, bilden sich Magmakammern.
- Magma hat eine deutlich geringere Dichte als das daraus entstehende Gestein, d.h. die Schmelze hat ein ausgedehntes Volumen.
- Magma kann nur aufsteigen, wenn ein Kanal vorhanden ist, der zur Oberfläche führt. Sie kann sich nicht von alleine durch das Gestein durchschmelzen.
- Blocklava (Aa-Lava) bildet oft Abbrüche von 2-3 Meter Höhe; Strukturen von der Größe ähnlich wie ein Mensch sind besonders schwer zu überwinden, d.h. Blocklava bildet ein besonders unzugängliches Gelände.
- Innerhalb des Erdmantels zeigt sich eine seismische Diskontinuität. Diese rührt aber nicht von einer Grenzschicht – es gibt keine Grenze zwischen innerem und äußerem Mantel. Die Ursache ist eine Phasenänderung von Olivin, dessen Gitter sich von tetragonal auf kubisch ändert (wurde experimentell ermittelt).
- Subduktion: Das subduzierte Material ist kalt, hat darum eine hohe Dichte und sinkt deshalb ab. Dabei macht es eine Phasenumwandlung durch, die die Dichte weiter erhöht und das Krustenmaterial weiter absinken lässt.
- Ozeanische Kruste entsteht an den mittelozeanischen Rücken und wird durch Subduktion wieder vernichtet. Dadurch kann ozeanische Kruste nicht beliebig alt werden – maximal ca. 6 Millionen Jahre.
- Die größte Katastrophe, die von Seamounts hervorgerufen kann, ist ein Flankenabrutsch, bei dem große Mengen sowohl von Vulkanmaterial als auch von Sedimenten schlagartig abrutschen und verheerende Tsunamis erzeugen.
- Der Ätna entstand aus einem submarinen Vulkan; Beweis: Pillow-Lava ist dort zu sehen, die nur unterseeisch entstehen kann.
- Arten von Lava:
 - Aa-Lava (Blocklava): sehr viskose Lava, die scharfkantige Blöcke bildet
 - Pahoehoe-Lava (Stricklava): sehr dünnflüssige Lava, die mit einer glatten Oberfläche erstarrt

- Pillow-Lava (Kissenlava): unterseeisch austretende Lava, die außen schlagartig abkühlt, dann von innen durchbricht, wieder abkühlt usw. und somit bei jedem Schritt eine kissenartige Struktur erzeugt
- Lava Tubes:
 - Wenn die Lava während eines länger andauernden Ausbruchs zu einem Lavafloss kanalisiert wird und dieser durch Abkühlung eine feste Seitenwand und ein festes Dach bekommt, während im Inneren noch Lava fließt, entsteht eine Lava Tube. Nachdem im Inneren die Lava abgeflossen ist, bleibt ein fester Tunnel übrig.
 - Eine Lava Tube wirkt isolierend, d.h. die Lava im Inneren bleibt länger heiß und damit flüssig.
 - In einer Lava Tube findet man Risse (durch Erdbeben oder durch Schrumpfung während des Abkühlens), Skylights (Öffnungen nach oben), Kuppeln (strukturelle Schwachstellen oder ehemalige Skylights), Verzweigungen und Lava-Seen.
 - Die Form der Lava Tube wird von der Charakteristik (z.B. Viskosität) und Menge der Lava, dem Verlauf der Eruption und der Topographie beeinflusst.
 - Lava Tubes sind sowohl bei Pahoehoe- als auch bei Aa-Lava möglich. Bei Ersterer staut sich die Lava, bildet eine Lava Tube, bricht durch, fließt weiter, bis sie sich wieder staut, was insgesamt zu einer Lava Tube mit einem Wechsel zwischen großen Hallen und schmalen Durchlässen führt. Aa-Lava ist dagegen sehr viskos und bildet von sich aus die für Lava Tubes nötige Höhe.
 - Der Ätna weist besonders viele Lava Tubes auf (ca. 200). Auch beim Kilauea (Hawaii) findet man Lava Tubes.
- Fumarolen:
 - ...
- Vulkanisches Material:
 - Lava: flüssig austretendes Gestein
 - Tephra: Material, das ballistisch ausgeworfen wird, z.B. Bims, Blöcke (beim Auswurf fest), Bomben (beim Auswurf flüssig, d.h. aerodynamisch geformt)
 - Gas
- Typen von Eruptionen:
 - ...
- Wenn ein Vulkan erodiert, bleibt am Ende nur der Magmenaufstiegskanal übrig, weil dieses Material am härtesten ist. Beispiel: Strombolicchio
- Orte von Eruptionen: Gipfeleruptionen (Eruption am Hauptkrater, die Magma stammt aus dem Hauptaufstiegskanal = central conduit system (ccs)) und Flankeneruptionen; bei Flankeneruptionen unterscheidet man laterale Eruptionen (die Magma stammt ebenfalls aus dem ccs, aber tritt nicht am Gipfel aus, sondern zweigt ab und tritt an der Flanke aus) und exzentrische Eruptionen (die Magma stammt aus größerer Tiefe, erreicht die Flanke von unten statt von seitlich kommend). Oft enthält die Lava aus exzentrischen Eruptionen relativ viel wasserhaltiges Amphibol, was bedeutet, dass die Magma nicht in einer Magmakammer differenziert wurde, sondern direkt aus großer Tiefe stammt. Das ccs ist relativ ortsstabil, was man an dem geringen Gehalt an Nebengestein sehen kann (welches gefördert würde, wenn sich ein neuer Kanal bildete).
- Lavafloss: Entweder fließt so viel Lava aus, dass sich ein zusammenhängender Lava-Fluss bilden kann, oder es sammelt sich Auswurfmaterial an, das sich irgendwann zusammenzutut und einen Lavafloss bildet.
- Geophysikalische Messungen an Vulkanen
Folgende Eigenschaften kann man messen:

- Seismische Aktivität: Wird mit Geophonen oder „acoustic flow monitors“ (AFM) gemessen. (Ein AFM ist ein Geophon, das bei Frequenzen im akustischen Bereich anspricht.) Wenn die Aktivität von aufsteigender Magma stammt, kann man die Quelle der seismischen Wellen lokalisieren und somit die Magma orten. Außerdem macht sich Magma bei aktiven seismischen Methoden dadurch bemerkbar, dass sie S-Wellen schluckt. Seismische Aktivität an Vulkanen kann folgende Ursachen haben:
 - * gewöhnliche Erdbeben, die nicht ungewöhnlich sind, weil sich Vulkane meist auch in erdbebengefährdeten Bereichen (z.B. an Plattenrändern) befinden
 - * durch aufbrechende Spalten und zerbrechendes Gestein durch die Druckerhöhung
 - * durch Lawinen und Felsstürze an der Oberfläche
 - * harmonischer Tremor (dessen Entstehung nicht vollständig verstanden ist)
 - Deformation: Vor einer Eruption bläht sich ein Vulkan auf, danach sinkt er wieder in sich zusammen. Diese Deformation kann man mit folgenden Methoden messen:
 - * Neigungsmessgerät: Bauweise z.B. nach dem Prinzip der Wasserwaage, wo eine Luftblase innerhalb einer leitenden Flüssigkeit den Widerstand zwischen drei Elektroden beeinflusst. Wenn sich die Luftblase verlagert, überdeckt sie andere Teile der oberen beiden Elektroden, wodurch sich die Widerstände zwischen ihnen und der dritten Elektrode verändern – elektronisch hat man also eine Spannungsteilerschaltung. Die Messgenauigkeit ist im Bereich von Mikroradians.
 - * Satellitenradarinterferometrie: Überlagerung der Bilder aus mehreren Überflügen des Satelliten. Weil die Position des Satelliten nicht exakt reproduzierbar ist, kann man mit diesem Verfahren nur die Höhenänderung ermitteln, keine Absolutwerte. Vorteil ist, dass man nicht punktweise misst, sondern gleich ein Bild vom gesamten Vulkan erhält.
 - * EDM (electronic distance measurement): Ein IR-Laserstrahl wird zum Vulkan geschickt und an einem dort installierten Reflektor zurückgeworfen. Erfordert eine direkte Sichtverbindung, aber bietet eine Genauigkeit von wenigen Millimetern (wobei Temperatur und Luftdruck berücksichtigt werden müssen).
 - * GPS: Mit Hilfe von DGPS-Korrektursignalen und aus der Phasenverschiebung der Signale der verschiedenen über den Vulkan verteilten Empfänger kann die Position mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt werden.
 - Variationen in der Temperatur: Werden von heißem Gas oder Magma nahe der Oberfläche hervorgehoben und können gemessen werden durch Temperatursensoren, IR-Kameras, oder an Erscheinungen wie heißen Quellen und dem Abschmelzen der Schneedecke erkannt werden. Eine Zunahme der Temperatur deutet auf aufsteigendes Magma hin.
 - Veränderungen des elektrischen Felds, des magnetischen Felds und des Schwerfelds: Durch den Aufstieg von Magma ändern sich die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Untergrunds, und wenn die Magma irgendwelche Hohlräume ausfüllt, ist das als Veränderung im Schwerfeld zu messen.
- Magma nimmt bei ihrem Aufstieg stets Material aus dem Untergrund mit nach oben.
 - Die charakteristische Tischform von vulkanischen Inseln kommt daher, dass die Erosion über der Wasseroberfläche stärker ist als darunter (z.B. wegen des größeren Dichteunterschieds zwischen Gestein und Umgebung).
 - Tuff bzw. Breccien: Lockermaterial, das nachträglich verbacken wurde; wenn im Tuff organisches Material (Blätter usw.) eingeschlossen ist, deutet das auf eine recht kalte Asche hin.
 - Obsidian und Bims sind chemisch identisch; Obsidian ist vergleichsweise schnell abgekühlt, so dass sich keine Gase lösen konnten, während Bims im Prinzip aufgeschäumter Obsidian ist (die helle Farbe kommt durch die Luftpinschlüsse).
 - Intraplattenvulkanismus: Hotspots, Flutbasalte, Kimberlite (nur in Kratonen); Magma kann sich nicht von alleine durch die dicken Kontinentalplatten schmelzen, d.h. ein Intraplattenvulkanismus braucht immer einen Mechanismus, der Risse im Gestein schafft, z.B. Gebirgsbildung (= Risse im Hinterland).

- Kimberlite: Gestein, das Diamanten enthält und deshalb aus sehr großer Tiefe stammen muss (weil nur dort so hohe Drücke herrschen), schnell aufgestiegen sein muss (weil sonst die schweren Diamanten nach unten gesunken wären oder sich zu Graphit umgewandelt hätten) und aus einem sehr sauerstoffarmen Milieu stammen muss (weil sonst die Diamanten verbrannt wären).
- Aufenthaltsdauer in der Magmakammer: zwischen einigen Stunden und hunderttausend Jahren
- Porphyry = sehr alter Vulkanit; z.B. Bozener Quarzporphyry
- Größenstaffelung von Tephra: Asche (kleiner als 2mm), Lapilli (bis 64mm), Bomben und Blöcke (größer als 64mm)
- Basaltsäulen: Die Bruchkanten stehen stets senkrecht auf den Spannungen und damit auf den Abkühlungsflächen. Es gibt nicht nur sechseckige Basaltsäulen, sondern fast jede beliebige Symmetrie.
- Kissenlava: Außen ist die Lava wegen des Wassers schnell abgekühlt und besteht daher aus Obsidian, im Inneren ist sie dagegen kristallin.
- tree mold: eingeschmolzene Bäume; kann passieren, wenn die Bäume kalt und feucht sind, so dass sie der Lava eine Zeitlang Widerstand leisten; Lava staut sich auf, umgibt die Bäume => übrig bleiben Lava-Schornsteine, an deren Innenseite man noch die Rinde erkennen kann
- helle Magma ist SiO₂-haltig, dunkle Magma hat wenig SiO₂ (z.B. Basalt)
- Theorien für Vulkanismus hinter einer Subduktionszone: entweder durch Dehnung des Hinterlands (d.h. Druck durch die subduzierte Platte nimmt ab), oder evtl. durch Konvektionswirbel in der Tiefe, erzeugt durch die abtauchende Platte => dort, wo die Wirbel aufsteigen, entsteht Vulkanismus
- Anhand eines Be-Isotops, das eine relativ kurze Halbwertszeit hat und das im Wasser entsteht, kann man sehen, dass die an einer Subduktion zweier ozeanischer Platten hervortretende Magma aus der abtauchenden Platte stammt, d.h. recht jung ist.
- Arten von Plattengrenzen:
 - divergent: Vulkanismus vorhanden, es entsteht MORB
 - transfer faults: Die Platten schieben sich horizontal in verschiedene Richtungen, dabei gibt es Erdbeben, aber keinen Vulkanismus.
 - konvergent: Eine Platte taucht unter der anderen ab. Hier gibt es drei Fälle zu unterscheiden.
 - * kontinental-kontinental: Hier wird kein Wasser subduziert, darum kann kein Magma aufgeschmolzen werden, es kommt zu keinem Vulkanismus.
 - * ozeanisch-ozeanisch: Hier taucht die ältere (= kältere, schwerere) Platte unter die jüngere Platte, die abtauchende Platte, die aus Basalt (MORB) besteht, wird aufgeschmolzen und setzt Wasser, das sich im Gestein als auch in den darauf liegenden Sedimenten befindet (5-8 Prozent Wassergehalt), frei => mit Hilfe der Volatilen kann flüssige Magma aufsteigen, es kommt zu basaltischem Vulkanismus. In größerer Entfernung von der Plattengrenze ist der Vulkanismus eher andesitisch, weil der Aufstiegsweg länger ist => mehr Differenziation findet statt, bei der Olivin ausgefällt und SiO₂ angereichert wird.
 - * ozeanisch-kontinental: Die ozeanische Platte sorgt für Volatile (Wasser), wodurch Vulkanismus möglich wird, der aber wegen des langen Aufstiegswegs (viel Differenziation) andesitisch ist. Inselbögen werden nicht mit subduziert, sondern abgetrennt und an die Kontinentalplatte angelagert, sie werden zu Terranes.
- Faktoren, die die Gefahr der Hangrutschung beeinflussen:
 - Hangneigung: je größer, desto größer die Rutschgefahr
 - Dichte des Materials: je größer, desto größer die Rutschgefahr

- Rauigkeit des Materials: je kleiner, desto größer die Rutschgefahr
 - Gleichförmigkeit: je gleichförmiger (d.h. alle Partikel haben ähnliche Größe), desto größer die Rutschgefahr
 - Beschaffenheit des Untergrunds: je schlechter der Untergrund haftet, desto größer ist die Rutschgefahr, entsprechend bildet sich auf einem Untergrund, auf dem die Partikel besser haften als untereinander, ein steilerer Hang, dessen Neigung nach oben hin abnimmt
 - Erdbeben: beispielsweise die Eruption des Mount St. Helens wurde durch ein Erdbeben ausgelöst (das zu einem Hangrutsch und damit zu einer Druckentlastung führte, was ein Auskochen der Lava ermöglichte)
 - Fallhöhe der Partikel: je mehr kinetische Energie sie haben, desto größer die Rutschgefahr
- Entstehung einer Caldera: Der Boden wölbt sich unter dem Druck einer darunter liegenden Magmakammer auf, es bilden sich ringförmige Risse, durch die Lava ausgeworfen werden kann; wegen des anschließend fehlenden Magmas in der Magmakammer bricht die Mitte der Aufwölbung ein.
 - Entstehung eines Doms: Magma kristallisiert im Schlot aus, der entstehende Propfen wird durch den Druck immer weiter nach außen geschoben und wächst gleichzeitig unten weiter an und erodiert oben. Der herausgedrückte und erodierte Teil des Propfens ergibt einen Dom.
 - Ein Ascheregen bildet sehr gut sortierte Schichten, weil die Absetzgeschwindigkeit des Materials von der Dichte abhängt – leichtes Material setzt sich zuletzt ab.

3 Geophysikalische Messungen

- Monitoring ist sehr aufwändig und teuer, so dass man es nur bei Vulkanen in dicht besiedelten Gebieten durchführt.
- Probleme: Mess-Elektronik hält nur Temperaturen bis ca. 300°C aus, außerdem ist jeder Vulkan von seiner Charakteristik her anders, man kann nicht von einem Vulkan auf einen anderen schließen, sondern muss jeden einzeln über viele Jahre hinweg beobachten. Zudem weiß man nichts über den inneren Aufbau von Vulkanen, man kennt weder den Verlauf des Magmenaufstiegskanals noch die Lage und Größe der Magmakammer.
- Seismik:
 - An tropischen Vulkanen ist die Seismik der Hauptindikator für den Zustand des Vulkans, weil dieser gerade in der Regenzeit oft in Wolken und der Gipfel selten klar erkennbar ist.
 - Während normale Erdbeben praktisch immer Scherbrüche sind (double couple), trifft man an Vulkanen eine ganze Palette von Erdbebenarten an, z.B. durch den Einsturz von Hohlräumen oder durch Expansionsbewegungen; weil diese keine Scherbrüche sind, treten kaum S-Wellen auf. Außerdem kann ein Vulkanausbruch nicht nur Beben hervorrufen, sondern auch selbst durch Beben ausgelöst werden (wie vermutlich auch durch Starkregen).
 - Die Abläufe vor einem Ausbruch (hochfrequenter Erdbebenschwarm, dann niedrigfrequenter Schwarm, dann Tremor) sind bekannt, nicht jedoch die genauen Ursachen, die dahinter stecken. Momentan hat man v.a. Beobachtungen, aber noch kaum geeignete Modelle zur Beschreibung und Berechnung.
 - Magmenaufstieg erreicht in 98% der Fälle nicht die Erdoberfläche, führt aber trotzdem zu seismischer Aktivität. Man kann zwar beobachten, dass mit dem Aufstieg der Magma auch die Zone, aus der die seismische Aktivität stammt, aufsteigt, jedoch ist die Magma selbst wohl eher nicht die Quelle seismischer Aktivität, weil eine Flüssigkeit keine Scherspannungen aufstauen kann.
 - Der Tremor kann so stark werden, dass sich ein Mensch kaum auf den Beinen halten kann. Eine Modellvorstellung für den Tremor ist der „Wasserhammer“ bei einer Heizung, wo durch Luftblasen in Resonanz die Heizungsrohre deutlich hörbar rütteln können.

- Gravimetrie: Wenn aufsteigende Magma Hohlräume ausfüllt, führt das zu einer Veränderung des Schwerefelds. Allerdings sind die Veränderungen extrem gering (im Bereich von Mikrogal) – weil die Abnahme des Schwerefelds mit der Höhe im Vergleich dazu groß ist, gehört zu jeder gravimetrischen Messung die genaue Vermessung der Höhe. Wenn Magmenaufstieg zu einer Aufwölbung des Berges führt, dann ist die Auswirkung der Aufwölbung auf das Schwerefeld größer als die Auswirkung der Massenänderung.
- Geoelektrik: In einem Vulkan finden sich Schichten mit stark unterschiedlicher Leitfähigkeit. Trockene Tephra an der Oberfläche ist ein sehr schlechter Leiter, während man in größerer Tiefe auf hydrothermale Schichten stößt, die sehr gut leiten. Noch näher an der Magma findet sich Wasserdampf, der wiederum schlecht leitet, während die Magma selbst ein sehr guter elektrischer Leiter ist. Das Eigenpotenzial wird vermutlich von strömendem Wasser verursacht; negative Ionen bleiben an den positiven Ladungen im Gestein haften, während die positiven Ionen im Wasser gelöst bleiben, wodurch eine Ionentrennung entsteht.
- Gaschemie: Man beobachtet eine Korrelation zwischen Temperatur und CO₂-Konzentration und eine Antikorrelation zur Wasserdampf-Konzentration. Vermutliche Ursache: Das Wasser kommt von der Erdoberfläche („meteorisch“), während das Kohlendioxid aus der Magmakammer stammt und schwallweise entweicht, dadurch variiert sein Anteil gegenüber der konstanten Wasserdampf-Menge.

4 Fachbegriffe

subaerisch	auf dem Land
submarin	im Wasser
Intrusion	Eindringen von fließfähigem Material (z.B. Magma) in bereits existierende Gesteinskörper. Die dabei entstehenden Gesteine nennt man Intrusivgesteine.
Extrusion	Ausfließen von Magma auf der Erdoberfläche in Form von Decken und Strömen.
Wadati-Benioff-Zonen	Zonen in denen die Lithosphärenplatten subduziert werden (bis zu 700km tief)
Kratone	alte Schilde der Kontinente (Alter > 10 ⁹ a, z.B. Zentralkanada, Schweden, Finnland, Westaustralien)
Differentiation	chemische Umwandlung von Gesteinen
rhyolitisch	
dazitisch	
juvenil	
metasomatisch	
plinianisch	
tholeiitisch	

5 Quellen

- Vulkanismus, Hans-Ulrich Schmincke
- <http://www.geologieinfo.de>
- Vorlesung Vulkanismus, PD Dr. Thomas Kunzmann, Dr. Oliver Spieler, LMU SS04
- http://www.trekkinguide.de/ziele/island_vulkanismus_geologie.htm