

(oben) Kircher, Athanasius: *MUNDUS SUBTERRANEUS*. Amsterdam 1665, Bd. I, S. 179: Fori Vulcani sive Camporum Phlegraeorum.

UB Würzburg, 26/Rp24, 3211.

(unten) Fumarolentätigkeit in den Campi Phlegrei, den Phlegräischen Feldern im Stadtgebiet von Neapel.

Durch Sublimation aus den vulkanischen Dämpfen haben sich Überzüge von feinkristallinem Schwefel gebildet.

Foto: Martin Okrusch, Würzburg.

4000 Menschen in Glutwolken und Glutlawinen umkamen (Krafft/Keller 1993, 47). Im Jahr 1660 wird der 1631 entstandene Schlackenkegel im Krater des Vesuvs durch einen erneuten Ausbruch wieder zerstört, wobei der Krater an Breite gewinnt, an Tiefe aber einbüßt (Kircher 1665, I, Praefatio).

Einen interessanten und auch noch heute potentiell gefährlichen Vulkankomplex im Stadtgebiet von Neapel bilden die Campi Flegrei, die „Brennenden Felder“, zusammen mit dem erst 1538 entstandenen Vulkanberg des Monte Nuovo. Die Solfatara von Pozzuoli, die von Kircher gezeichnet wurde, ist durch die intensive Förderung von vulkanischen Schwefeldämpfen berühmt.

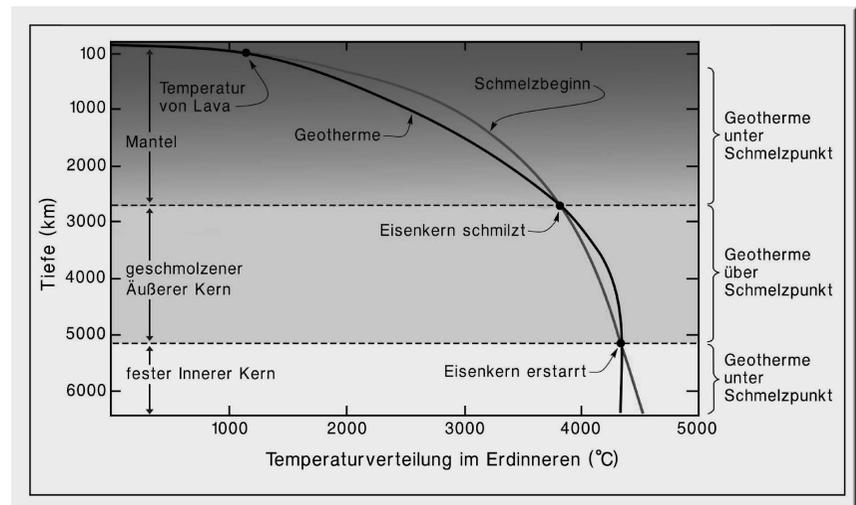
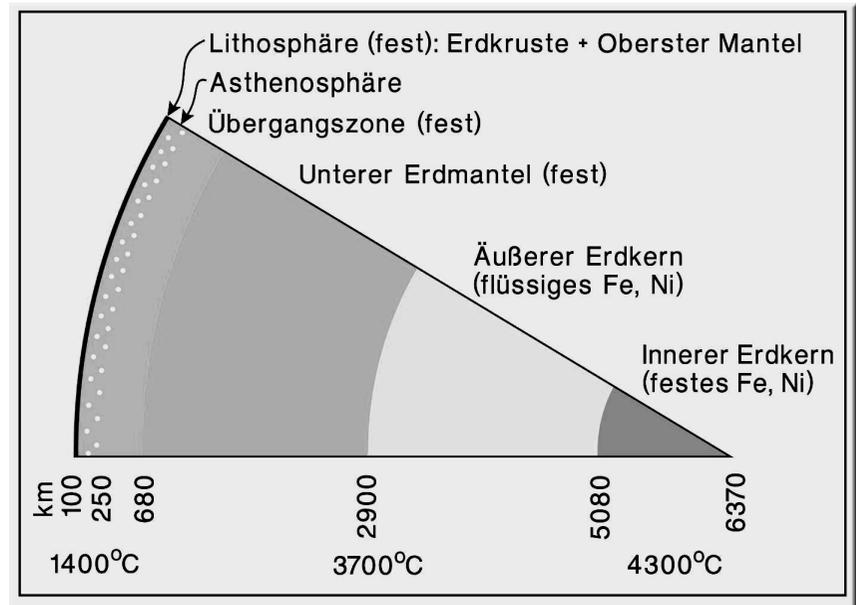
Ein zweites vulkanisches Ereignis erschütterte die Welt des 17. Jahrhunderts: Im Jahre 1669, also noch zu Lebzeiten Kirchers, brach der Ätna aus und begrub einen großen Teil der Stadt Catania unter seinen Lavamassen (Krafft/Keller 1993, 47). Noch heute gehört das gewaltige Vulkangebirge mit mehreren Haupt- und zahlreichen Parasitärkratern zu den aktivsten Vulkanbauten der Erde. Gerade in den letzten Jahren hat der Ätna mehrere heftige Ausbrüche mit explosiver und effusiver Tätigkeit erlebt. Seine großen Lavaströme stellen immer wieder eine Bedrohung für die Dörfer in der Fußregion des Ätna dar. Demgegenüber ist der Stromboli, der einzige europäische Vulkan mit Dauertätigkeit, vergleichsweise harmlos. Aus seinem offenem Schlot werden, meist im zeitlichen Abstand von 20 bis 30 Minuten, glutflüssige Lavafetzen in die Luft geschleudert, während es nur selten zur Förderung von Lavaströmen oder zu verheerender Explosions-tätigkeit kommt.

Pyrophyllacien – Kirchers Bild des Erdinnern und was daran „wahr“ ist

Das moderne Bild vom inneren Aufbau der Erde entwickelte sich aus Forschungsergebnissen aller geowissenschaftlichen Disziplinen. Wie das Erdmodell in der Mitte

des Ausstellungsraumes zeigt, besitzt die Erde einen ausgeprägten Schalenbau, bestehend aus Erdkern, Erdmantel und Erdkruste. Die Gesteine der Erdkruste werden teilweise durch Bergwerke und Tiefbohrungen erschlossen oder können durch geologische Prozesse an die Erdoberfläche gebracht werden; sie sind so der wissenschaftlichen Bearbeitung zugänglich. Die 5 bis 6 km dicke Erdkruste unter den Ozeanen ist aus Basalten und Gabbros aufgebaut, während in der viel dickeren kontinentalen Erdkruste – unter Würzburg ca. 30 km – Granite und Gneise, im unteren Bereich Granulite vorherrschen.

Eine meist relativ scharfe Trennfläche, die Mohorovičić-Diskontinuität, bildet die Grenze zwischen der Erdkruste und dem festen Erdmantel, der eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die Chondriten besitzt. Diese Gruppe von Meteoriten stellt Bruchstücke von kaum differenzierten Kleinplaneten des Asteroidengürtels dar, die in ihrer chemischen Zusammensetzung noch das frühe Sonnensystem widerspiegeln. Aus tektonisch gehobenen Bereichen oder von Auswürflingen tiefreichender Vulkane wissen wir, dass der oberste Teil des Erdmantels aus Spinellperidotiten und Granatperidotiten besteht. Darunter folgt im Tiefenbereich von etwa 70 – 150 km eine Zone geringerer Starrheit, die Asthenosphäre. Auf ihr bewegen sich die starren Lithosphärenplatten, bestehend aus der Erdkruste und dem obersten Erdmantel, mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr. Direkte Informationen über die darunter folgende Übergangszone vermitteln nur noch seltene Mineral-Ein-

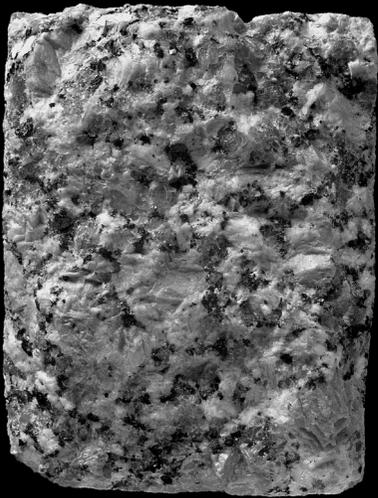


(oben) Segment des Erdinneren mit Lithosphäre (Erdkruste und oberster Erdmantel), Asthenosphäre, Übergangszone, unterem Erdmantel sowie äußerem und innerem Erdkern.

(unten) Der mittlere geothermische Gradient, d. h. die Temperaturzunahme mit der Tiefe im Erdinneren kann aus geophysikalischen und petrologischen Daten abgeschätzt werden (dicke Linie). Im Erdmantel und im inneren Erdkern liegt die Temperatur unter der Temperatur des Schmelzbeginns, im äußeren Erdkern jedoch darüber. Die dünne Linie deutet

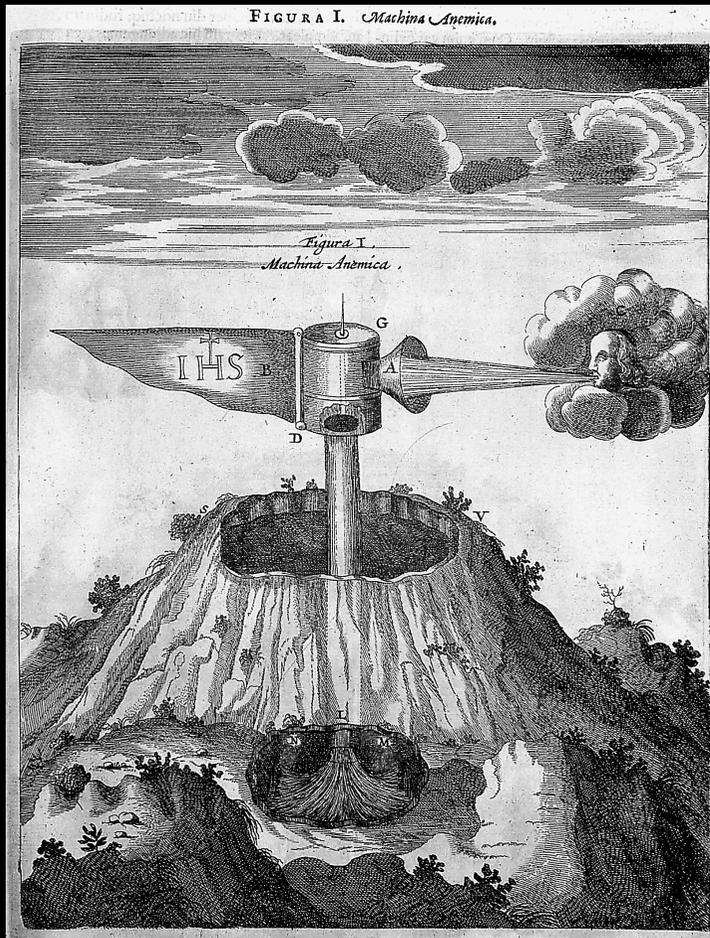
schematisch an, dass die Schmelztemperatur mit dem Druck ansteigt. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass diese auch durch die unterschiedliche Zusammensetzung von Erdmantel und Erdkern sowie von äußerem und innerem Erdkern beeinflusst wird. Daher müssten an deren Grenzen Sprünge in der Schmelztemperatur auftreten.

(Umgezeichnet nach Press, Frank/Siever, Raymond: Allgemeine Geologie. Heidelberg/Berlin/Oxford 1995, Abb. 19.11 [Deutsche Ausgabe von Understanding the Earth]; mit freundlicher Genehmigung des Verlages Freeman & Company, New York).



(links) Granit, Reichenbach, Riesengebirge. Granite sind die häufigsten Tiefengesteine, die wesentliche Teile der oberen kontinentalen Erdkruste aufbauen. Mineralogisches Institut, Universität Würzburg.

(unten) Kircher, Athanasius: MUNDUS SUBTERRANEUS. Amsterdam 1665, Bd. II, S. 191: Ventilator für Bergwerke unter Nutzung der Erdwärme. UB Würzburg, 26/Rp24, 3211.



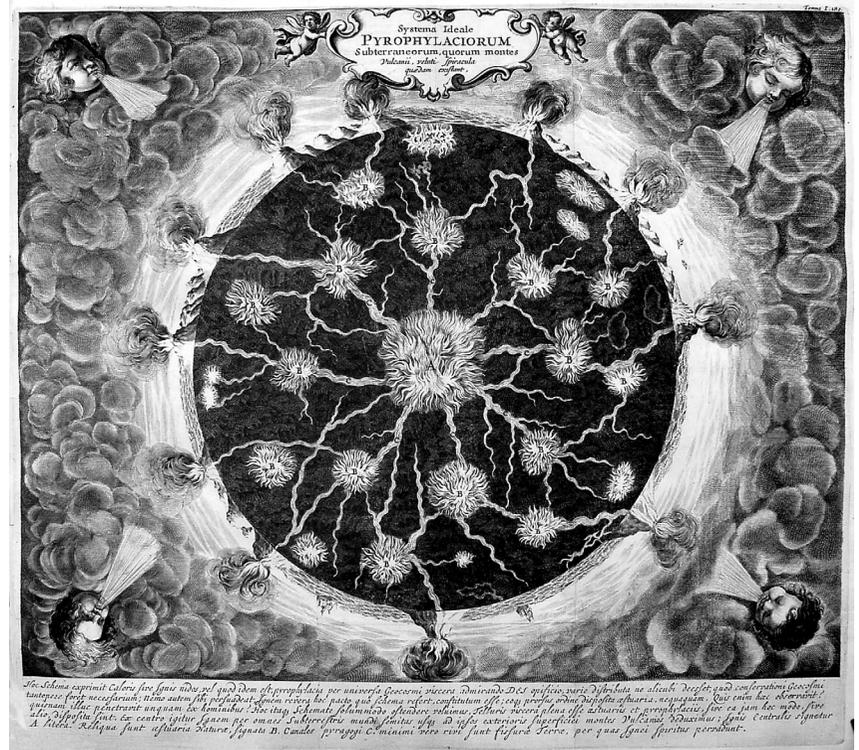
schlüsse in Diamanten, die durch extrem tief reichende Vulkane an die Erboberfläche gefördert wurden. Aus dem unteren Erdmantel kennen wir keine Gesteine oder Minerale. Jedoch liefern uns die Ergebnisse der experimentellen Mineralogen, die heute bei Drucken bis zu 2 Megabar (entsprechend einer Tiefe von über 1000 km) und Temperaturen bis 3000°C arbeiten können, gute Vorstellungen über die Mineralgesellschaften, die unter den Drucken und Temperaturen des tieferen Erdmantel stabil sind.

An der Grenze zwischen dem unteren Erdmantel und dem äußeren Erdkern in 2900 km Tiefe ändern sich die chemische Zusammensetzung und der Aggregatzustand drastisch. Der äußere Erdkern ist glutflüssig; die Schmelze besteht überwiegend aus Eisen und Nickel; ein geringer Anteil an Schwefel, Silizium oder Sauerstoff senkt den Schmelzpunkt unter die dort herrschende Temperatur von etwa 3800-4300°C ab. Eisenmeteorite, die aus den Kernbereichen von differenzierten, schalig aufgebauten Asteroiden stammen, haben eine ganz ähnliche Zusammensetzung. In etwa 5100 km Tiefe beginnt der innere Erdkern, der praktisch nur aus einer Nickel-Eisen-Legierung mit etwa 80 % Eisen und 20 % Nickel besteht. Da andere chemische Komponenten weitgehend fehlen, liegt der Schmelzpunkt dieser Legierung oberhalb etwa 4300°C. Der innere Kern ist also fest.

Selbstverständlich stimmt das Bild, das sich Kircher vom Aufbau des Erdinnern gemacht hat, nicht mit unseren heutigen Vorstellungen überein. Trotzdem hat er einige wichtige Befunde richtig vorausgeahnt. Stark geprägt durch die eigenen Erfahrungen in den süditalienischen Vulkangebieten ist er der Überzeugung, dass das Erdinnere heiß sein müsse. Als Stütze für diese Auffassung zieht er auch Erfahrungen von Bergleuten im Grubenbezirk von Schemnitz (Slowakei) über eine Temperaturzunahme mit der Tiefe heran, ebenso Berichte jesuitischer Missionare über Gebiete mit erhöhtem Wärmefluss und dessen wirtschaftliche Nutzung in China.

Auch Kirchers Vorstellungen von einem heterogenen Aufbau des Erdinnern, das von ihm zwar als heiß, aber in weiten Bereichen als fest angesehen wird., weisen einen gewissen Wahrheitsgehalt auf, sind allerdings noch stark von den Vorstellungen des Aristoteles geprägt (vgl. Voßmerbäumer 2002, 22). Wie Kircher im *MUNDUS SUBTERRANEUS* (Kircher 1665, I, 180) anschaulich darstellt, befinden sich im Erdinnern zahlreiche Feuerherde (*Pyrophyllacia*), die über ein Netzwerk von Kanälen (*Pyragogi*) mit einem Zentralfeuer, aber auch untereinander in Verbindung stehen und die aktiven Vulkane an der Erdoberfläche speisen. Das Zentralfeuer Kirchers, das vielleicht – wie Sigurdsson (1999, 90) vermutet – auf Ideen von René Descartes (*OPERA PHILOSOPHICA* 1650) zurückgeht, findet seine Entsprechung in dem über 4000°C heißen Erdkern. Die Pyrophyllacien stehen für sog. Hot Spots, Bereiche erhöhter Temperatur im Erdinnern, oder für lokale Magmenkammern. Im Gegensatz zu Kirchers Vorstellungen finden in den thermischen Anomalien des Erdmantels und der Erdkruste und ebenso im flüssigen äußeren Erdkern keine Verbrennungen statt. Diese würden ja einen Überschuss an freiem Sauerstoff erfordern, was Kircher noch nicht wissen konnte. Den seit Beginn des 20. Jahrhunderts geophysikalisch nachgewiesenen Schalenbau der Erde hat Kircher noch nicht vorausgesehen – hier ist das von Descartes 1644 entwickelte Modell der Erde als „erkalteter Stern“ mit einem glühenden Kern und mehreren Schalen erheblich moderner (Krafft/Keller 1993, 45).

Die Ideen Descartes' über Bau und Entwicklung der Erde nehmen bereits Aspekte der heutigen Plattentektonik voraus, die von Geomagnetikern, Geotektonikern, Vulkanologen, Petrologen und Paläontologen zu einem umfassenden Modell entwickelt wurde. Relativ starre Lithosphärenplatten aus ozeanischer oder kontinentaler Erdkruste und oberstem Erdmantel bewegen sich auf der etwas weicheren, aber immer noch festen Asthenosphäre. An den divergenten und konvergenten Plattengrenzen, den mittel-

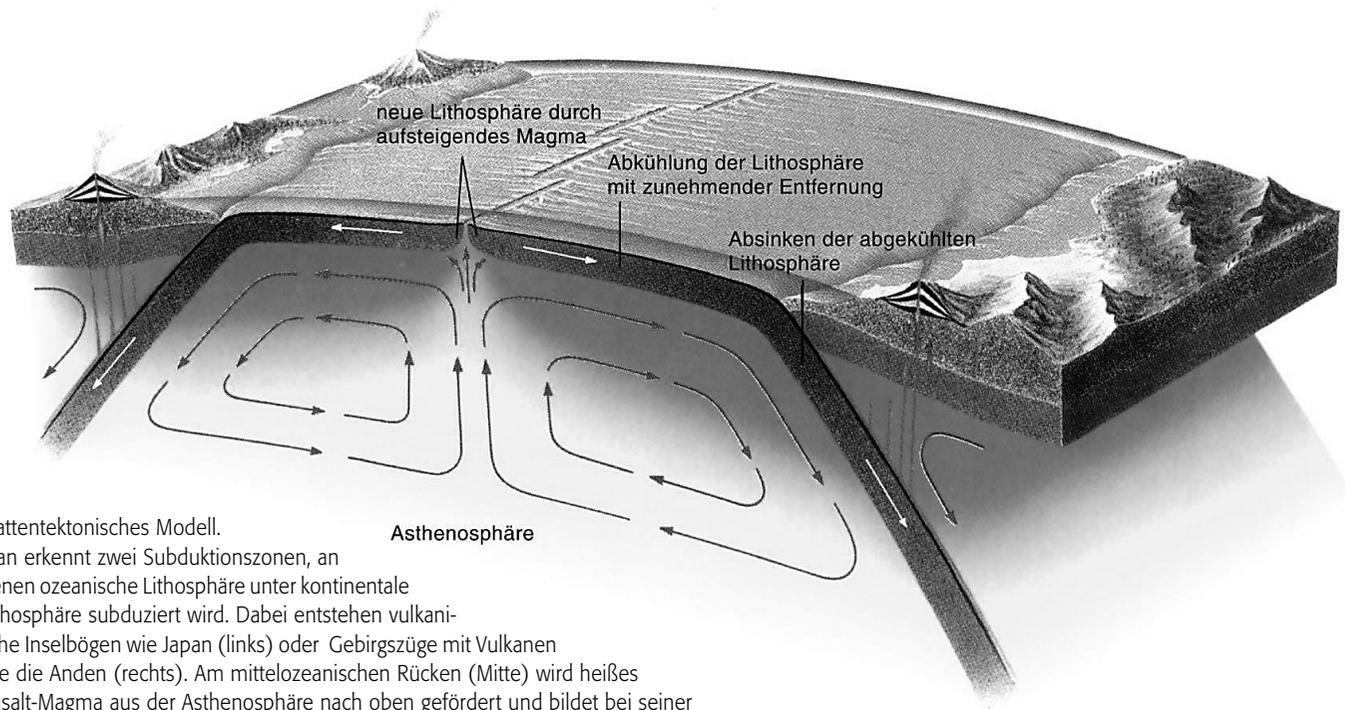


Kircher, Athanasius: *MUNDUS SUBTERRANEUS*. Amsterdam 1665, Bd. I, Tafel nach S. 180: Erdinneres nach den Vorstellungen Kirchers.

UB Würzburg, 26/Rp 24, 3211.

Nach Kircher befindet sich im Erdkern ein Zentralfeuer, das durch Zufuhrkanäle mit zahlreichen Pyrophyllacien verbunden ist. Diese sind wiederum untereinander verknüpft und speisen direkt oder indirekt die aktiven Vulkane auf dem Festland oder auf Vulkaninseln. Der flüssige (äußere) Erdkern, Hot Spots und Magmenkammern sind in dieser Darstellung vorausgesehen.

ozeanischen Rücken und den Subduktionszonen kommt es zu Erdbebenaktivität und Vulkanismus. Aber auch innerhalb der Platten, z. B. über den Hot Spots oder den kontinentalen Riftzonen entstehen Vulkangebiete. Die Bildung der magmatischen Schmelzen, die in den Vulkanen am Tiefseeboden oder an der Erdoberfläche gefördert werden oder als Plutone im Erdinnern stecken bleiben, erfolgt durch Aufschmelzvorgänge in unterschiedlichen Bereichen der Erdkruste und des Erdmantels.



Plattentektonisches Modell.

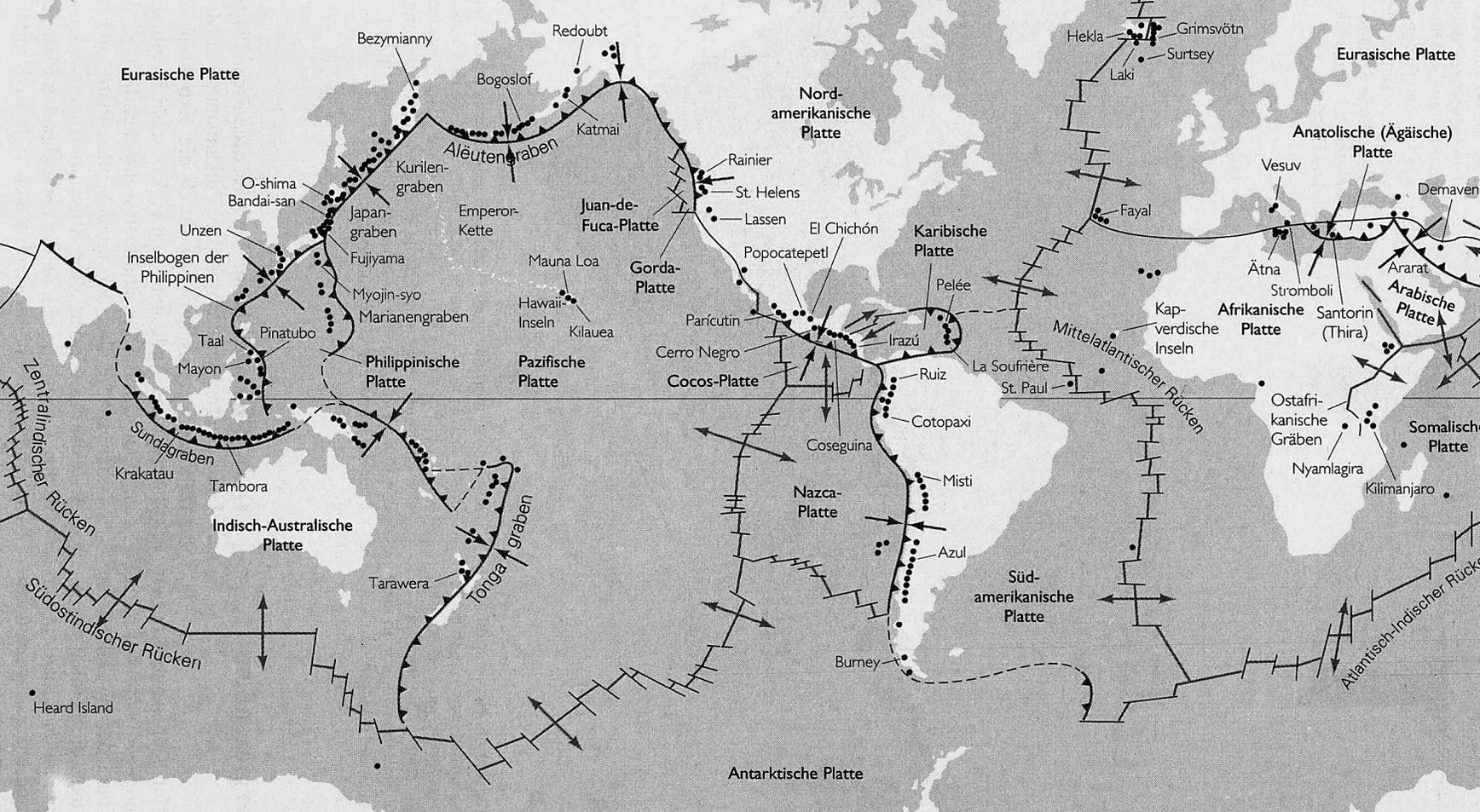
Man erkennt zwei Subduktionszonen, an denen ozeanische Lithosphäre unter kontinentale Lithosphäre subduziert wird. Dabei entstehen vulkanische Inselbögen wie Japan (links) oder Gebirgszüge mit Vulkanen wie die Anden (rechts). Am mittelozeanischen Rücken (Mitte) wird heißes Basalt-Magma aus der Asthenosphäre nach oben gefördert und bildet bei seiner Erstarrung neue ozeanische Erdkruste.

(Nach Press, Frank/Siever, Raymond: Allgemeine Geologie. Heidelberg/Berlin/Oxford 1995, Abb. 19.10 [Deutsche Ausgabe von Understanding the Earth]; mit freundlicher Genehmigung des Verlages Freeman & Company, New York)

In seinem *MUNDUS SUBTERRANEUS* (1665, I, Tafeln nach 124 und 144) publiziert Athanasius Kircher die ersten Karten der globalen Verteilung von Vulkangebieten, z. B. in Süditalien, Island, den südamerikanischen Anden, Indonesien, Japan und Kamtschatka, eine unschätzbare Leistung, wie Sigurdsson (1999, 224) hervorhebt. Kircher weist darauf hin, dass viele Gebirgsketten mit ihren Vulkanen etwa in Ost-West- oder Nord-Süd-Richtung verlaufen und schreibt dieses irrtümlich Gezeitenkräften zu. Heute wissen wir, dass die Gebirgsbildung und der Vulkanismus im Zusammenhang mit plattentektonischen Subduktions- und Kollisions-Prozessen steht. Über Subduktionszonen kommt es häufig zu intensivem Vulkanismus, so im „Feuerring“ um den Pazifischen Ozean, der auf Kirchers Karten bereits teilweise dargestellt ist. Um-

gekehrt driften an den mittelozeanischen Rücken Lithosphärenplatten durch den Prozess des Sea-Floor-Spreading auseinander; aus dem Erdmantel steigen hier Magmen auf, die durch untermeerischen Vulkanismus gefördert werden.

Obwohl man meinen sollte, dass der aktive Vulkanismus Beweis genug für ein heißes Erdinneres sei, wurde diese Theorie in der Folge von vielen Geologen abgelehnt. Der große Mineral- und Gesteinssystematiker, Abraham Gottlob Werner (1749-1817), einflussreicher Lehrer an der Bergakademie zu Freiberg (Sachsen), begründete das System des Neptunismus, nach dem Wasser das allein bestimmende Agens sei. So habe sich der Granit durch Ausfällung aus dem heißen Urozean gebildet; vulkanische Erscheinungen führte Werner auf lokale Erd-



Plattentektonische Karte der Erde.

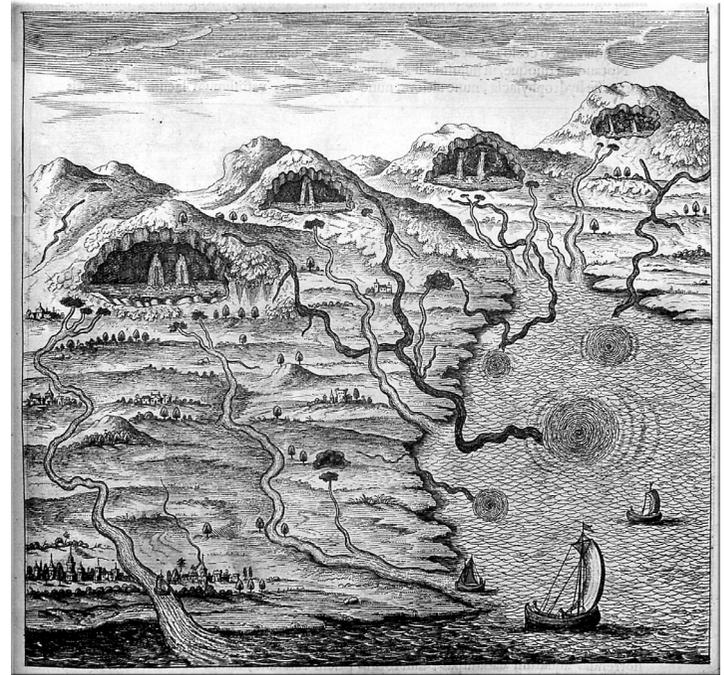
Die aktiven Vulkane (Punkte) bilden meist Ketten, die an Subduktionszonen gebunden sind (dargestellt durch Linien mit Spitzen, die die Subduktionsrichtung angeben). Dazu gehören auch die Anden-Vulkane die von Kircher in seiner Amerikakarte dargestellt wurden. Sie entstehen bei der Subduktion der Nazca-Platte unter die südamerikanische Platte. Nicht dargestellt sind die zahlreichen aktiven Vulkane an den mittelozeanischen Rücken, die unter dem Meeresspiegel liegen; nur stellenweise bilden sie

Vulkaninseln, z. B. Island. Vereinzelt sind Vulkane an sog. Hot Spots gebunden wie Hawaii, oder an kontinentale Grabenzonen wie der Kilimandscharo.

(Nach Press, Frank/Siever, Raymond: Allgemeine Geologie. Heidelberg/Berlin/Oxford 1995, Abb. 5.27 [Deutsche Ausgabe von Understanding the Earth]; mit freundlicher Genehmigung des Verlages Freeman & Company, New York).

brände zurück. Der Streit zwischen Plutonisten und Neptunisten beherrschte die wissenschaftliche Diskussion bis ins 19. Jahrhundert hinein. Johann Wolfgang von Goethe, ein begeisterter und kenntnisreicher Amateur-Geologe und -Mineraloge, war ein glühender Anhänger des Neptunismus, der seinem pantheistischen Weltbild

entsprach. Er ließ sich nur widerwillig von der Wirksamkeit des Vulkanismus als gesteinsbildendem Prozess überzeugen. Sein Gedicht aus „ZAHME XENIEN“ VII, in dem er auch auf Kirchers Anschauungen verweist, verleiht dieser Skepsis dichterischen Ausdruck.



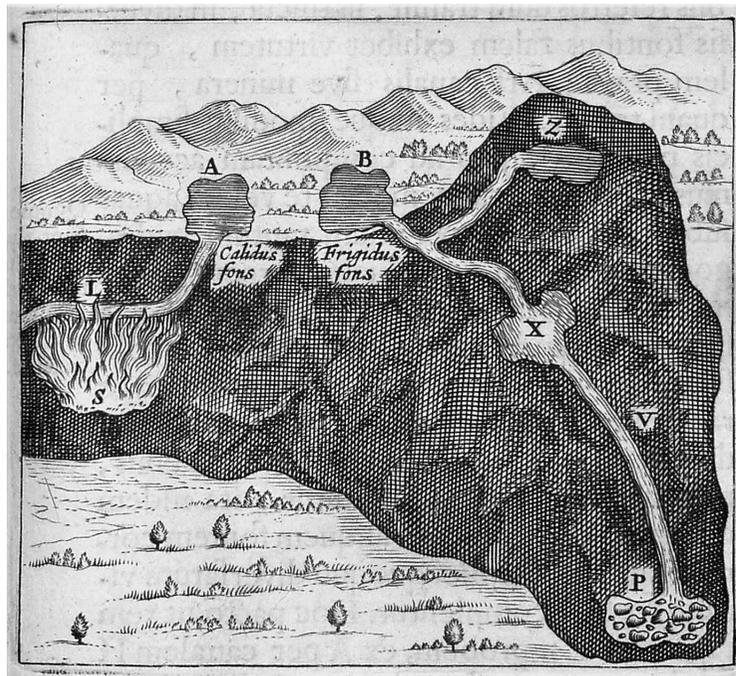
(oben links) Kircher, Athanasius: MUNDUS SUBTERRANEUS. Amsterdam 1665, Bd. I, S. 144: Nord-Süd-verlaufende Vulkankette in den südamerikanischen Anden in der Darstellung Kirchers.
UB Würzburg, 26/Rp24,3211.

(oben rechts) Kircher, Athanasius: MUNDUS SUBTERRANEUS. Amsterdam 1665, Bd. I, S. 233: Kreislauf des Wassers in der Vorstellung Kirchers.
UB Würzburg, 26/Rp24, 3211.

Das Bild zeigt eine idealisierte Gebirgs- und Küstenlandschaft mit unterirdischen Kavernen (Hydrophylacien). Im Meer befinden sich Strudellöcher, in denen das Meerwasser verschwindet und durch unterirdische Kanäle (dunkel) zu den Kavernen geleitet wird. Dort entspringen die Quellen, aus denen sich Flüsse (hell) entwickeln.

(links) Kircher, Athanasius: MUNDUS SUBTERRANEUS. Amsterdam 1665, Bd. I, S. 257: Entstehung von heißen und kalten Quellen.
UB Würzburg, 26/Rp24, 3211.

Die heiße Quelle A entsteht, wenn Wasser durch einen unterirdischen Kanal über eine feuergefüllte Kaverne (Pyrophylacium) fließt. Im Gegensatz dazu ist die Quelle B kalt, da sie nicht in Kontakt mit unterirdischem Feuer kommt. Kalte Quellen können auch entstehen, wenn ursprünglich erhitztes Wasser sehr lange Transportwege zurücklegt und sich dabei abkühlt.



*Je mehr man kennt, je mehr man weiß,
 Erkennt man, alles dreht im Kreis;
 Erst lehrt man jenes, lehrt man dieß,
 Nun aber waltet ganz gewiß
 Im innern Erdenspatium
 Pyro-Hydrophylacium,
 Damit's der Erden Oberfläche
 An Feuer und Wasser nicht gebreche.
 Wo käme denn ein Ding sonst her,
 Wenn es nicht längst schon fertig wär'?
 So ist denn, eh' man sich's versah,
 Der Pater Kircher wieder da.
 Will mich jedoch des Worts nicht schämen;
 Wir tasten ewig an Problemen.*

Hydrophylacien - Beobachtungen und Phantasien zum Kreislauf des Wassers

Angeregt durch frühe Beobachtungen über den eigentümlichen Ursprung der Paderquelle und des sog. Bollerbrunnens bei Paderborn sowie an Strudeln in der Straße von Messina zwischen „Skylia und Charybdis“, die er während seiner Südtalienreise studierte, entwickelt Kircher Vorstellungen zum unterirdischen Kreislauf des Wassers, die er in eindrucksvollen Zeichnungen dokumentiert. Demnach existieren im Erdinnern mit Wasser gefüllte Hohlräume (*Hydrophylacia*), die untereinander durch ein Netzwerk von Kanälen verbunden sind und die – wie schon im PREDIGER SALOMO behauptet – durch das Meer gespeist werden, und zwar durch Strudel, wie Kircher sie in der Straße von Messina beobachtet hatte. Das Wasser steigt an die Erdoberfläche auf, tritt dort als Quelle wieder zutage und gelangt schließlich über die Flüsse wieder zurück ins Meer. Damit belebt Kircher uralte Vorstellungen wieder, nach denen es unterirdische Verbindungen zwischen den Weltmeeren geben soll. Dieses Konzept hat allerdings mit einer grundsätzlichen Schwierigkeit zu kämpfen, die von Kircher – im Gegen-

satz zu seinen Vorläufern – klar erkannt wurde (Biswas 1970, 176-180): Wie kann Wasser aus dem Meer oder gar aus dem Erdinneren zu den Quellorten in höheren Gebirgsniveaus transportiert werden? Zur Lösung dieses Problems zog Kircher – allerdings irrtümlich – hydro-mechanische Kräfte, insbesondere Pumpvorgänge durch Gezeitenkräfte heran. Zum anderen rechnete er mit der Wirkung der Hitze im Erdinnern. Das Wasser in denjenigen Hydrophylacien, die sich in der Nachbarschaft von Feuerherden (Pyrophylacien) befinden, wird aufgeheizt und verdampft. Das gleiche gilt für Wasser, das bei seinem Transport in der Nähe von Pyrophylacien vorbei strömt. Nahe der Erdoberfläche kondensiert der Wasserdampf und tritt als heiße Quelle an die Erdoberfläche. Richtig an dieser Vorstellung ist, dass Thermalquellen oder Geysire in Gebieten mit erhöhtem geothermischen Gradienten auftreten. So kann versickertes Grundwasser in der Nähe einer Magmenkammer aufgeheizt werden und verdampfen; solche Heißdämpfe werden z. B. in der Region von Larderello (Toscana) zur Gewinnung geothermischer Energie genutzt.

Prinzipiell richtig sind auch die Ideen Kirchers zur Entstehung von Mineralquellen: Die in ihnen enthaltenen chemischen Komponenten, z. B. Schwefel oder Eisen, werden beim Transport des heißen Wassers aus dem durchströmten Gestein ausgelaugt, wobei die Quellzusammensetzung von der jeweiligen Gesteinsart kontrolliert wird. Wie wir heute wissen, können solche Vorgänge zur Bildung von Erzlagerstätten führen. Schon vor mehreren Jahrzehnten nahmen deutsche Lagerstättenforscher an, dass bestimmte Erzlagerstätten, wie z.B. die berühmte Kupfer-Blei-Zink-Lagerstätte Rammelsberg bei Goslar, durch untermeerische Thermalquellen entstanden sind (Ramdohr 1953; Kraume 1955). Dieses Modell fand 1977/79 durch Entdeckung der Black Smoker eine überraschende, ja geradezu sensationelle Bestätigung. Aus dem Tauchboot *Alvin* heraus konnte erstmals eine submarine