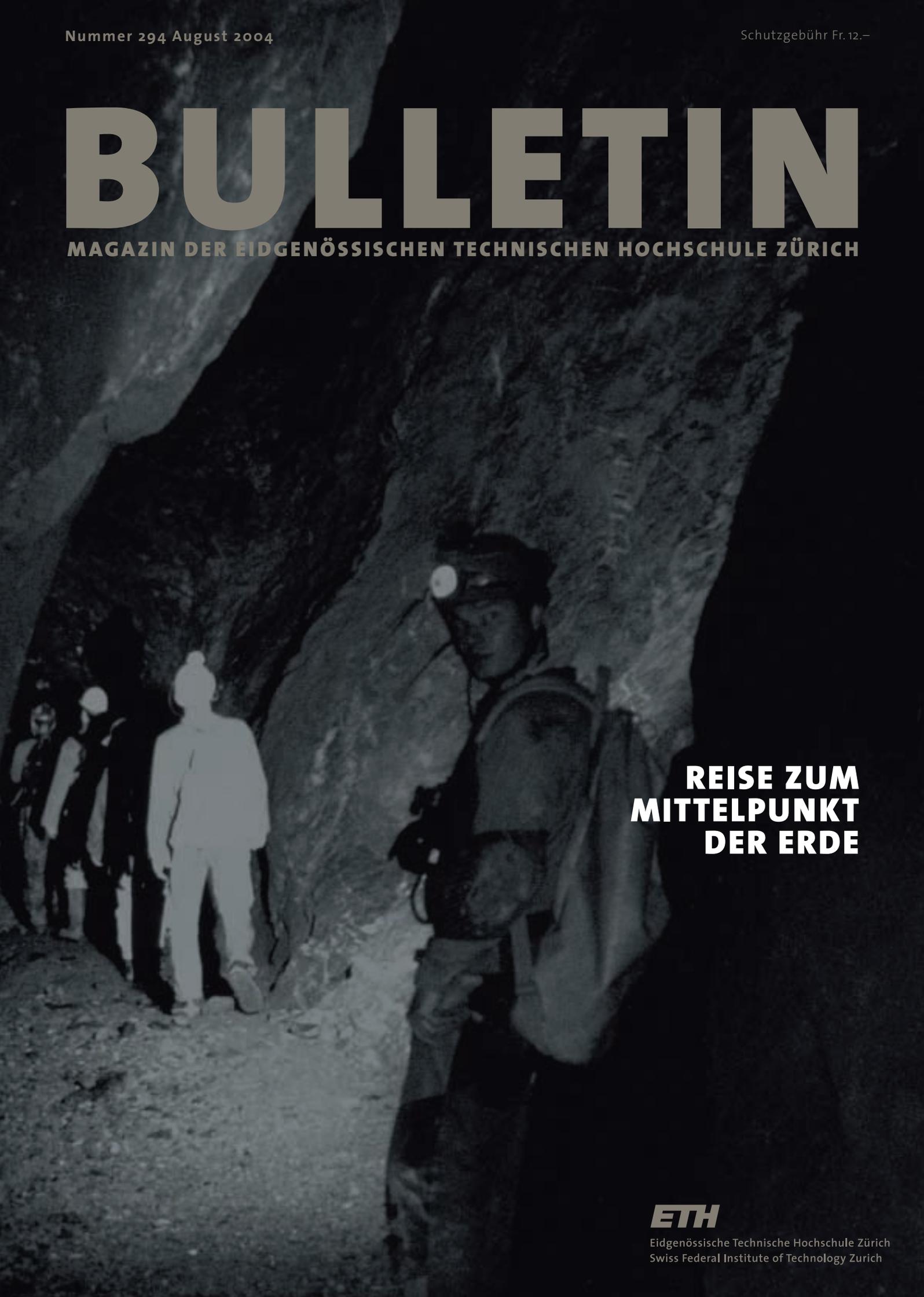


BULLETIN

MAGAZIN DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH



**REISE ZUM
MITTELPUNKT
DER ERDE**

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IMPRESSUM:

HERAUSGEBERIN: Schulleitung der ETH Zürich

REDAKTION: Lic. phil. I Martina Märki-Koepp (mm), Redaktionsleitung
Lic. phil. Vanja Lichtensteiger-Cucak (vac), Redaktion & En bref
Dr. Felix Würsten, Alumni Aktuell
Corporate Communications der ETH Zürich
ETH Zentrum, 8092 Zürich
Tel. 01-632 42 52 Fax 01-632 35 25

INSERATE: Go! Uni-Werbung, Rosenheimstr. 12
9008 St. Gallen, Tel. 071-244 10 10

GESTALTUNG: Inform, Agentur für visuelle Kommunikation AG, Zürich

FOTOS: Daniel Fabian: Umschlag, Seite 22, 26, 30, 34, 42, 46, 50, 52, 56
Marco Kiessler: Seite 44
IG GBTS-Lombardi AG, Bauleitung Bodio: Seite 3, 20, 24, 32, 36, 48, 54
Hans Dücker; www.to4.de/stoffel.htm: Seite 4, 14, 28

DRUCK: NZZ Fretz AG, Zürich

AUFLAGE: Erscheint 4-mal jährlich
Auflage dieser Ausgabe 27 000

Nachdruck mit Quellenangabe erwünscht. Die nächste Ausgabe, Nr. 295,
zum Thema «Biomaterialien» erscheint im November 2004.
Bulletin ist auch abrufbar unter: <http://www.cc.ethz.ch/bulletin/>

INHALT

**6_ Die Entstehung der Erde und ihres Kerns
ZURÜCK IN DIE ERDGESCHICHTE**

Rainer Wieler

**10_ Ventile des Erdinnern
VULKANE – FEUER DER ERDE**

Volker Dietrich

**14_ Seismologische Untersuchungen
WASSER IM TIEFEREN ERDINNERN**

Domenico Giardini und Eduard Kissling

**18_ Geodäsie und Gebirgsverformung
TIEFE TUNNELBAUWERKE IN DEN ALPEN**

Hilmar Ingensand, Simon Löw und Christian Zangerl

**22_ AlpTransit: Tunnelbau und Grundwasser im Aar-
und Gotthard-Massiv
WELTMEISTER IM TUNNELBAU**

Simon Löw

**26_ Das Erdmagnetfeld und der Paläomagnetismus
DAS GEHEIMNIS DES ERDINNEREN**

William Lowrie

**30_ Leben unter der Erdoberfläche
MEHR ALS NUR RIESENPIILZE?**

Josef Zeyer, Martin Schroth, Jutta Kleikemper
und Helmut Bürgmann

**34_ Wasser unter der Erde
GRUNDWASSER WELTWEIT**

Fritz Stauffer

**38_ Erzlagerstätten
DIE «WELT» UNTER DEN VULKANEN**

Thomas Pettke, Werner E. Halter und Christoph A. Heinrich

**42_ Geothermische Energie
STROM UND WÄRME FÜR DIE ZUKUNFT?**

Klaus Fröhlich und Willy Gehrer

**46_ Gefahr für Leib und Leben
KÖNNEN ERDBEBEN VORHERGESAGT
WERDEN?**

Stefan Wiemer

**50_ Die Tiefen der Erde
DAS GEHEIMNIS DES MAGMAS**

Max W. Schmidt und Peter Ulmer

**54_ Die Zukunft der internationalen Ozeanbohrprogramme
DIE REISE UNTER DEN MEERESBODEN**

Flavio S. Anselmetti und Judith A. McKenzie

58_ En bref

68_ Alumni Aktuell

DIE ERDE – DER UNBEKANNTE PLANET

Der Beginn dieses Jahres stand ganz im Zeichen des Mars. Der Wettlauf zum unerforschten roten Planeten zwischen NASA und der European Space Agency bescherte uns atemberaubende Bilder und Raum für viele Spekulationen. Fast konnte man meinen, die Zukunft liege dort, geheimnisvoll und herausfordernd. Die Erde dagegen: alt vertraut, längst erforscht und ohne Geheimnisse. Wirklich? Ein Blick der Redaktion auf heutige Forschungsfragen der Erdwissenschaften zeigte das Gegenteil. Die Idee zu einer aktuellen Version der «Reise zum Mittelpunkt der Erde» versprach plötzlich ebenso aufregend zu werden wie der gleichnamige fantastische Roman, den Jules Verne im Jahr 1864 verfasst hat. Seine These allerdings, die Erde sei hohl und berge ein Meer, in dem sich allerlei prähistorische Tiere tummeln, ist schon lange widerlegt.

Heute gehen die Wissenschaftler davon aus, dass der innere Erdkern aus festen, der äussere Erdkern aus flüssigen Eisen-Nickel-Verbindungen besteht. Im inneren Erdkern herrschen Temperaturen von etwa 4300 °C. Der fast doppelt so dicke äussere Erdkern ist nur geringfügig kälter. Im unteren Erdmantel sinken dann die Temperaturen rapide auf 1000 °C ab. Er besteht aus festen Verbindungen von Sauerstoff mit Silizium, Magnesium, Aluminium oder Eisen. Unterer und oberer Erdmantel sind durch die nur wenige hundert Kilometer dicke Übergangszone verbunden. Im oberen Erdmantel wird der Motor für die Bewegung der Erdplatten vermutet. Das Gestein in dieser Schale ist meist plastisch, das heisst zäh wie Knetmasse. Der Erdball wird von einer harten Kruste bedeckt. Die Erdkruste ist die am besten untersuchte Schale unseres Planeten. Wissenschaftler haben errechnet, dass die Erde 4,6 Milliarden Jahre alt ist, einen Umfang von rund 40075 Kilometern und einen Durchmesser von zirka 12 742 Kilometern hat und 5976×10^{24} Kilogramm wiegt. Doch wirklich ins Innere des blauen Planeten sind sie «nur» etwa 9 Kilometer gekommen.

Seismologische Messungen, Magnetfelduntersuchungen, die Analyse von durch Vulkane an die Erdoberfläche geschleudertem Material aus dem Erdinneren oder von Meteoriten und andere Methoden müssen den Erdwissenschaftlern das Floss ersetzen, mit dem Jules Vernes Forscher das Erdinnere erforschte. Die aktuelle Ausgabe des ETH Bulletins nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise unter die Erdoberfläche, die mit den verschiedensten Methoden Einblick in ganz unterschiedliche Ebenen des Erdinneren nimmt.

Martina Märki-Koepp
Redaktion ETH-Bulletin

ZURÜCK IN DIE ERDGESCHICHTE

RAINER WIELER

**Wie sah die junge Erde aus? Woraus bestand sie? Seit wann existiert der Erdkern?
Und schliesslich: Wie alt ist unser Planet?
Messungen und Modellrechnungen der ETH-Forscher geben Auskunft.**

Man sollte meinen, die Entstehung der Erde sei für die Naturphilosophen immer ein zentrales Thema gewesen. Lange Zeit war dem aber nicht so. Zwar hatten Immanuel Kant und Pierre Simon de Laplace schon im 18. Jahrhundert Sonne und Planeten aus einem «Urnebel» entstehen lassen. Einige ihrer Gedanken klingen so modern, dass die heutigen Theorien über die Bildung des Sonnensystems kollektiv als Kant-Laplace-Kosmogonie bezeichnet werden. In der Mitte des 19. Jahrhunderts gewann aber der Aktualismus die Oberhand. Demnach sind alle geologischen Formationen allein durch Prozesse erklärbar, die wir auch heute beobachten. Die Geschichte der Erde ist zyklisch und nicht gerichtet. In dieses Bild passte die Vorstellung kaum, dass die Erde einst von heute verschieden war, und noch weniger, dass sie einmal einen Anfang hatte. Der Geochemiker Claude Allègre nennt dies das Tabu der Genesis. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts rückte das Studium der Entstehung der Erde wieder ins Zentrum der Naturwissenschaften, ausgelöst zum Beispiel durch Fragen nach der Herkunft der grossen Krater auf dem Mond oder nach Gemeinsamkeiten zwischen Meteoriten und Erde.

Meteorite – wichtig für das Verständnis der Erde

Die Idee, dass Meteorite wichtig für das Verständnis der Erde sind, wurde allerdings schon früher geäussert. Zu einer Zeit, als die meisten Gelehrten die Möglichkeit rundweg ablehnten, Steine könnten vom Himmel fallen, nahm Ernst F.F. Chladni solche Berichte ernst. Und weil auch viele Meteorite Eisenklumpen sind, kam er 1794 zum Schluss: *Eisen dürfte ein gemeinsamer Hauptbestandteil bei der Bildung der Weltkörper sein. Auch im Innern der Erde muss*

eine grosse Menge Eisen vorhanden sein, da die Schwere der Gesamterde viel grösser als die der Oberflächengesteine ist.

Weitergeführt wurde dieser Gedanke hundert Jahre später von Emil Wiechert. Damals glaubte man, Festkörper seien auch unter höchstem Druck kaum komprimierbar. Er schloss deshalb, dass die Erde im Zentrum einen Kern aus metallischem Eisen haben müsste, welcher klar von einem darüberliegenden leichteren Mantel aus Gestein unterscheidbar sei. Neben Eisen waren damals auch für uns exotisch anmutende Ideen diskutiert worden, wonach die hohe Dichte der Erde durch einen Kern aus Blei oder Gold, oder dann aus hoch komprimierten Gasen bedingt sei. Die Idee eines Erdkerns wurde also geboren, bevor Erdbebenwellen direkte Aufschlüsse über den inneren Aufbau unseres Planeten lieferten. Heute wissen wir, dass die Gesteine im Erdmantel zwar dichter sind als die Krustengesteine, dennoch sind Chladnis und Wiecherts Hypothesen bestätigt worden. Nach der Installation von Seismographen auf der Südhalbkugel konnten Durchmesser und Dichte des Erdkerns bestimmt werden. Er beinhaltet 32% der Masse der Erde, was mit metallischem Eisen erklärbar ist, nicht aber mit Blei oder Gold.

Der Urnebel von einst – Akkretionsscheibe

Wie die Erde vor etwa 4,6 Milliarden Jahren zusammen mit den anderen inneren Planeten gebildet wurde, scheint heute in den Grundzügen einigermaßen klar zu sein (siehe auch Artikel Wieler, sowie Artikel Benz, Bulletin, August 2003). Der Urnebel von Kant und Laplace heisst heute Akkretionsscheibe. Dies war eine Ansammlung aus Gas und Staub in der Äquatorebene der jungen Sonne, aus der die Planeten sich

zusammenballten oder «akkretierten». Akkretionsscheiben entstehen, wenn Fragmente einer astronomischen «Molekülwolke» aus Staub und Gas wegen der Schwerkraft kollabieren. In der rotierenden Akkretionsscheibe koagulierten zuerst feinste Staubkörner zu grösseren Aggregaten. Diese wiederum verbanden sich erst zu kleinen Klumpen und später zu immer grösseren Körpern. Nach wenigen zehntausend oder hunderttausend Jahren kreisten viele «Planetesimale» von der Grösse der heutigen Asteroide um die Sonne. Innter mehrerer 10 Millionen Jahre sind dann durch Kollisionen zwischen Planetesimalen – zum Schluss hatten sie teilweise die Grösse von Mars – die vier inneren Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars entstanden.

Die Erde früher...

Wie sah nun die junge Erde innen aus? War sie einst homogen und trennte sich erst später auf in einen Kern aus metallischem Eisen und einen Mantel aus Gesteinen, bestehend aus siliziumreichen Mineralen (Silikaten)? Oder ist der Kern zusammen mit dem Planeten gewachsen? Die Frage ist schwierig zu beantworten. Die ältesten bekannten Gesteine auf der Erde sind mehr als 500 Millionen Jahre jünger als der Kern. Wir können also weder «eingefrorene» Magnetfelder studieren, die ein früher Kern erzeugt haben mag, noch können wir direkt den Eisengehalt solch früher Gesteine messen. Wir können aber Chladnis Idee weiterführen und Meteorite zu Rate ziehen. Meteorite sind Proben von Asteroiden, das heisst von überlebenden Bausteinen der Planeten. In vielen Meteoriten sind in der Tat metallisches Eisen und Silikate fein verteilt und etwa im gleichen Massenverhältnis zu finden wie in Kern und Mantel der Erde. Es gibt also Asteroide, welche nicht so



heiss wurden, dass sich Eisen und Silikate voneinander trennten. Dies sind aber nur kleine Körper von kaum mehr als hundert Kilometer Grösse. Daneben gibt es sehr eisenarme Meteorite und solche, die fast nur aus Eisen-Nickel-Legierungen bestehen. Diese kommen offensichtlich aus grösseren Asteroiden, welche innen sehr heiss wurden, wobei sich metallisches Eisen von den Silikaten trennte und im Kern der Asteroide sammelte. Diese Trennung geschah sehr früh, innerhalb weniger Millionen Jahre nach dem Kollaps der Molekülwolke. Die Wärmequelle war vermutlich der Zerfall von radioaktivem Aluminium-26 oder vielleicht auch Eisen-60. Diese Isotope sind heute vollständig ausgestorben.

Seit wann existiert der Erdkern?

Wir können also davon ausgehen, dass zumindest die grösseren Bausteine der Erde ihrerseits bereits einen Kern hatten. Es scheint deshalb äusserst unwahrscheinlich, dass die Erde selbst während ihrer ganzen Bildungsphase homogen gemischt blieb. Mit den Mitteln der Isotopengeologie lässt sich eine relativ frühe Trennung von Erdkern und Erdmantel beweisen. Das Werkzeug hierfür ist der radioaktive Zerfall des Isotops Hafnium-182 in Wolfram-182 mit einer Halbwertszeit von 8,9 Millionen Jahren (siehe Abb. 1). Wolfram hat eine chemische Affinität zu Eisen und sinkt somit vorwiegend in den Kern ab, während Haf-

niurn ausschliesslich in den Silikaten des Mantels konzentriert wird. Wenn nun der Kern entstand, solange das ^{182}Hf noch nicht vollständig zerfallen war, wird der an Hafnium reiche Mantel heute ein grössere Menge ^{182}W (oder genauer ein grösseres $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ -Verhältnis) aufweisen als der Kern ohne Hafnium. Wir haben zwar keine Proben vom Erdkern, um dies direkt zu prüfen, aber wir können davon ausgehen, dass die Erde im Mittel dasselbe $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ Verhältnis hat wie die unveränderten Meteorite aus den kleinen Mutterkörpern. Der Erdmantel sollte also im Vergleich zu Meteoriten am Isotop ^{182}W aus dem Zerfall von ^{182}Hf angereichert sein. Das ist in der Tat so. Allerdings ist der Unterschied zwischen Mantelproben und Meteoriten nicht leicht zu messen, beträgt er doch nur gerade 0,2 Promille.

Somit ist klar, dass die Erde bereits einen Kern hatte, als noch ^{182}Hf vorhanden war, das heisst, der Erdkern ist seit spätestens etwa 50–60 Millionen Jahren nach der Bildung der ersten Meteorite vom silikatischen Mantel isoliert. Soweit herrscht Einigkeit. Versuche, die Kernbildung genauer zu datieren, stellen uns nun allerdings vor das Problem, dass wir nicht wissen, wie sie im Detail vor sich ging. Hat sich bei jedem neuen Einschlag das gesamte Material des Projektils zuerst gut mit dem Mantel der Protoerde gemischt, bevor dann das Eisen des Projektils relativ schnell in den wachsenden Erdkern absank? Dies ist denkbar, weil die Einschlagsenergien enorm sind

und weil der frühe Erdmantel vielleicht gossenteils aufgeschmolzen war. Oder ist vielleicht das Eisen aus den Kernen von bereits differenzierten Planetenbausteinen mindestens teilweise direkt in den Kern der Protoerde abgesunken? Für dieses Szenario sprechen numerische Simulationen des Rieseneinschlags, dank dem sich wohl der Mond gebildet hat. Ein grosser Teil des Materials aus dem Eisenkern des Projektils (genannt Theia) kommt in den Simulationen direkt auf den Kern der Protoerde zu liegen (Abb. 2). Oder hat es doch einen wohl definierten Zeitpunkt in der Geschichte der frühen Erde gegeben, in dem letztmals das gesamte Eisen und die Silikatmineralien – und damit die Isotope von Hafnium und Wolfram – gut durchmischt waren? Das könnte zum Beispiel der Fall gewesen sein, wenn der Rieseneinschlag, welchem der Mond seine Existenz verdankt, die ganze Erde wieder homogenisierte, was allerdings im Widerspruch zu den heutigen Simulationen steht.

Wie schnell hat sich die Erde gebildet?

Diese verschiedenen Szenarien resultieren in unterschiedlichen scheinbaren Altern für den Erdkern. Die letztgenannte Möglichkeit ist formal am einfachsten zu behandeln. Eine augenblickliche Kernbildung wäre gemäss den Hf-W Daten etwa 30 Millionen Jahre nach der Bildung der ersten Meteorite

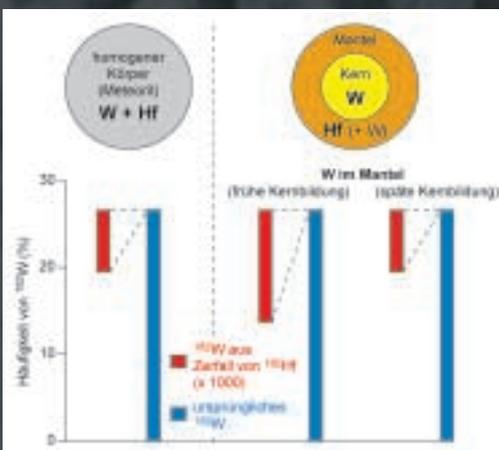


Abb. 1: Das radioaktive Isotop ^{182}Hf (Halbwertszeit: 8,9 Millionen Jahre) wurde in Sternen nahe der zukünftigen Sonne hergestellt und von dort in die solare Akkretionsscheibe aus Staub und Gas eingebracht. Ein Teil davon wurde schliesslich in die Bausteine der Erde und die Erde selbst inkorporiert. Bei einer Trennung von metallischem Eisen und gesteinsbildenden siliziumreichen Mineralien geht Wolfram vorwiegend mit dem Eisen in den Kern, Hafnium verbleibt ausschliesslich im silikatischen Mantel. Falls bei der Erde diese Trennung stattfand, solange ein Teil des ^{182}Hf noch vorhanden war, so wird der Erdmantel (hohes Hf/W) heute etwas mehr ^{182}W haben als der Kern mit niedrigem Hf/W. Die Häufigkeit des Isotops ^{182}W wird dabei relativ zur Häufigkeit eines anderen Isotops von Wolfram gemessen (meist ^{184}W), welches nicht durch den radioaktiven Zerfall beeinflusst wird (hier nicht gezeigt). Die Unterschiede sind allerdings so klein, dass sie hier 1000-mal vergrössert dargestellt werden müssen.

ten erfolgt. Da wir oben ausgeschlossen haben, dass der Kern aus einer bis zu diesem Zeitpunkt stets homogenen Protoerde absank, müsste dieses hypothetische Ereignis wie gesagt am ehesten den Rieseneinschlag und die Bildung des Mondes datieren. Wenn die Kernbildung kontinuierlich erfolgte und die neu einfallenden Planetesimale alle immer vollständig mit dem Mantel der Protoerde durchmischt wurden, so definieren die Hf-W-Daten eher eine Bildungsgeschwindigkeit statt eines «Alters» für die Erde und ihren Kern. Nach nur etwa 10 Millionen Jahren wäre die Erde bereits zu knapp zwei Dritteln vorhanden gewesen, nach 25 Millionen Jahren bereits zu 90% und nach 30 Millionen Jahren hätte sie praktisch ihre heutige Masse gehabt.

Der Erdkern wuchs parallel zur Erde

Eine solch «schnelle» Bildung des Erdkerns ist allerdings mit verschiedenen anderen Beobachtungen kaum in Einklang zu bringen. Das Wachstum der Erde durch Einschläge von Planetesimalen wird von verschiedenen Gruppen mit dem Computer simuliert. Mit den wahrscheinlichsten Anfangsbedingungen ergeben die Modelle meist Bildungsdauern von 50 bis 100 Millionen Jahren. Ausserdem deutet auch ein anderes Isotopensystem auf eine langsamere Bildung der Erde hin, nämlich der radioaktive Zerfall von Uran und Thorium zu Blei. Modellrechnungen am Institut für Iso-

topengeologie und Mineralische Rohstoffe der ETH zeigen denn auch, dass die Häufigkeiten der Wolfram-Isotope eine langsame Bildung der Erde bedingen, falls die Planetesimale nicht vollständig mit dem Mantel der Protoerde gemischt wurden. Die Daten können zum Beispiel mit einem Einschlag von Theia nach 55 Millionen Jahren erklärt werden, wenn dabei etwa drei Viertel des Eisenkerns von Theia direkt in den Kern der Protoerde absank und nur das restliche Viertel mit dem Erdmantel gemischt wurde. Auch die Wolfram-Daten des Mondes selbst deuten auf eine «späte» Bildung nach rund 50 Millionen Jahren hin.

Wahrscheinlich ist also der Erdkern mehr oder weniger parallel zur Erde selbst gewachsen. Der absolute Massenzuwachs war am Anfang wohl schneller als später, weil die Zahl der Planetesimale kontinuierlich abnahm. Der Rieseneinschlag von Theia passierte vermutlich etwa 50 Millionen Jahre nach der Bildung der ersten Meteorite. Die Modellrechnungen an der ETH zeigen aber auch, dass mit Wolfram-Analysen, auch wenn sie noch so präzise sind, das Alter beziehungsweise die Bildungsrate der Erde nicht mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden können, solange wir nicht besser verstehen, wie die Trennung zwischen Mantel und Kern vonstatten ging.

Ich danke Philipp Heck, Ghylaine Quitté und Uwe Wiechert für ihre Mithilfe an diesem Beitrag.

Literatur

C. Allègre (1992): *De la pierre à l'étoile*, Paris, Fayard (Englisch: *From stone to star* (1992), Harvard University Press, Cambridge MA).

A. N. Halliday (2004): *Mixing, volatile loss and compositional change during impact-driven accretion of the Earth*, *Nature*, 427, 505.

Forschungsinformationen

Ein Forschungsschwerpunkt des Labors für Isotopengeologie ist das Studium der Frühgeschichte des Sonnensystems mittels hochpräziser Isotopenanalysen an Meteoriten und irdischen Proben.

Wieler@erdw.ethz.ch

Tel. 044 632 37 32

Fax 044 632 11 79

Weitere Informationen unter:

http://www.erdw.ethz.ch/Institut.cfm?ID_Inst=2705&language=1

Prof. Rainer Wieler

Departement für Erdwissenschaften
ETH Zürich

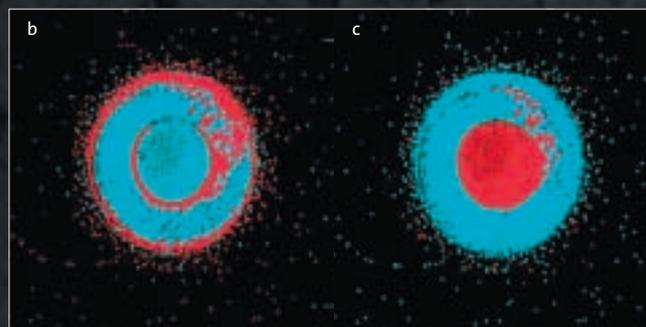


Abb. 2: Resultate einer Simulation des Einschlags des Planetesimals «Theia», der zur Bildung des Erdmonds führte. Theia hatte ungefähr die Grösse des Planeten Mars. Die Figuren zeigen Querschnitte durch die Protoerde kurz nach dem Einschlag. In der linken Figur ist Material, das ursprünglich aus Theia kam, rot dargestellt, in der rechten Figur ist Eisen rot und die Silikate sind blau codiert. Die Kombination beider Figuren zeigt, dass sich ein grosser Teil von Theias Eisenkern direkt um den ursprünglichen Kern der Protoerde gelegt hat, während Theias Mantel vorwiegend an der Oberfläche der Erde deponiert wird. Ebenfalls schwach zu sehen ist Material in Umlaufbahnen um die Erde, aus welchem später der Mond akkretiert. [Nachdruck aus: «Simulations of a Late Lunar Forming Impact», *Canup R. M., Icarus* 168, 433 (2004), mit Genehmigung von Elsevier].

VULKANE – FEUER DER ERDE

VOLKER DIETRICH

Furcht und Faszination: Unerschöpfliche Flüsse aus heissem und kaltem Wasser fließen, in der Tiefe ein gewaltiger, gewundener Feuerstrom. Die Erde schmilzt. Vulkanausbrüche gibt es seit der Entstehung unseres Planeten, seit 4,5 Milliarden Jahren. Heute sind ungefähr 600 Vulkane aktiv, einige weitere tausend verharren vorläufig in Ruhe. Kann man Vulkaneruptionen vorhersagen?



Pro Jahr fördern Vulkane zirka 2 km³ Laven und Asche sowie grössere Mengen an Wasser und Gasen. Weit grössere Magmamengen (zirka 15 km³/Jahr) ergiessen sich kontinuierlich in unzähligen Vulkanen und formen dabei den über 70 000 km langen mittelozeanischen Rücken. All diese sichtbaren und quantifizierten Magmamengen stellen jedoch nur einen Bruchteil des geschmolzenen Materials dar, das aus den Tiefen des Erdinnern an die Oberfläche gelangt. Der grösste Schmelzanteil erstarrt in den kalten Lithosphärenplatten und oberen Krustenpartien.

Vulkane an der Erdoberfläche sind Ausdrucksformen hoher geodynamischer Aktivität des Erdmantels und der Lithosphäre sowie Zeugnisse kontinuierlicher Materie- und Energieabgabe. Vulkane treten sowohl an Plattengrenzen als auch innerhalb von kontinentalen und ozeanischen Platten auf. Im mittelozeanischen Rücken (divergierende Plattengrenzen) markiert Vulkanismus das ständige Anwachsen der ozeanischen Platten, ausgelöst durch das Aufschmelzen heisser Mantelgesteine entlang schmaler, aus der Tiefe aufsteigender Wärmezonen (Prozesse der Mantelkonvektion und Dekompression nahe der Erdoberfläche). Über Subduktionszonen (divergierenden Plattengrenzen) der in den heissen Erdmantel abtauchenden erkalteten, starren ozeanischen Platten entstehen die gefährlichen vulkanischen Feuergürtel mit ihren langlebigen Stratovulkanen und grossräumigen kristallinen Magmakammern, welche über Jahrmillionen zu granitoiden Gesteinsmassen (Plutonen) erkalten. Der Ursprung dieser Magmen wird auf ein gewisses Aufschmelzen von Erdmantelgesteinen zurückgeführt, welchem komplexe thermodynamische Prozesse und Eintrag von wässrigem «Fluid» in den Erdmantel zugrunde liegen.

Diamanten – bis zu 200 km tief im Erdmantel versteckt

Vulkanfelder auf Kontinenten und Meeresböden («hot spots») entstehen ebenfalls durch Aufschmelzen von Erdmantelgesteinen, bedingt durch den Aufstieg heissen Erdmantelmaterials («plumes») aus grossen Manteltiefen, die wahrscheinlich bis zu 2900 km an den Rand des Erdkerns reichen können. Beispiele stellen Island, die Kette der Hawaii-Emperor-Vulkane und die zwei- bis dreitausend Kilometer langen, symmetrischen und erloschenen Vulkanketten der Walfisch- und Rio-Grande-Rücken im Südatlantik dar. Vor 120 Millionen Jahren wurden aus einer gemeinsamen Mantel-

quelle die grossflächigen Deckenbasalte des Parana (heute Südamerika) und des Etendeka (Namibia) gefördert. Heute ergiessen sich die Laven, noch immer durch die gleichen «plumes» gespeist, aus den Vulkanen Tristan da Cunha und Gough im Zentrum des Südatlantiks.

Die eindrucksvollsten Vulkaneruptionen – Ventile des Erdinnern – lieferten uns «kanonenschussartige» Vulkaneruptionen, welche Tuffschlote und Kimberlit-Diatreme in den alten Kontinentalschilden Südafrikas, Sibiriens und Australiens hinterlassen. CO₂- und Magmaeruptionen fördern in diesen Vulkanschloten eine riesige Vielfalt von Mineralien und Gesteinen aus dem oberen Erdmantel zutage, darunter den wertvollsten natürlichen Rohstoff, den Diamanten. Seit es mit Hochdruckexperimenten gelungen ist, Diamanten synthetisch herzustellen, wissen wir, dass seine natürliche Kristallisation 150 bis 200 km tief im Erdmantel liegt.

Die Menschheit im Banne der Vulkankatastrophen

Vulkanausbrüche erzeugen Furcht und Faszination. Als unerklärbare Ereignisse werden sie verwüstend und todbringend in Mythen, Legenden und selbst in der Bibel dargestellt. Sie haben unsere Weltanschauung und den Glauben massgeblich beeinflusst.

Einzigartig in der Menschheitsgeschichte erscheint die hochstehende kykladisch-minoische Kultur und Religion im ägäischen Raum, der Handel und die Schifffahrt sowie ihr Untergang durch die gigantische Vulkaneruption Santorins vor 3640 Jahren. Während Aschewolken tagelang das Sonnenlicht verdrängten, zerstörten riesige Flutwellen, entstanden durch Glutlawinen und den Einbruch der grossen Caldera, die Küsten Kretas und der umliegenden kykladischen Inselwelt. Die Harmonie des Naturglaubens wird durch allmächtige Götter des Guten und des Bösen abgelöst. Die Atlantis-Sage über eine Welt, welche im Meer versank, scheint auf dem grössten Vulkanausbruch der Frühantike zu beruhen. Griechische Sagen berichten von völliger Finsternis, Erde- und Feuerregen, Bergen hoher Wellen und der Deukalionischen Flut. Auch die Schilderungen im «Alten Testament», die Plagen und Wunder, spiegeln derartige Naturkatastrophen wider.

Erst tausend Jahre später deuten griechische Philosophen und Geographen wie Aischylos und Pindar die vulkanische Tätigkeit des Ätna. Sie ist das Werk von Hephaistos, dem Gott des Feuers. In seiner unterir-

dischen Schmiede bearbeitet er, in Rauch und Funken gehüllt, die Waffen der Götter mit Hammerschlägen auf dem Amboss. Empedokles erklärt die Welt als von vier Elementen regiert, die der «Ursprung aller Dinge» sind: Das unterirdische Feuer, das Wasser, die Luft und die Erde. In der griechischen Mythologie tritt neben der lebenszerstörenden auch die lebenserhaltende Seite der Vulkangewalten zutage: mit dem Geschenk des Feuers, das er dem Hephaistos in der Tiefe gestohlen hatte, verhalf Prometheus dem Menschen zu seiner wahren Existenz. Als erster erklärt Platon die Entstehung des Basalts: *«Die unterirdischen Welten sind durch zahllose Kanäle verbunden, in denen die unerschöpflichen Flüsse aus heissem und kaltem Wasser fließen. In der Tiefe nährt ein gewaltiger, gewundener Feuerstrom, der Pyriphlegeton, die vulkanischen Öffnungen.»*

Manchmal, wenn die Erde durch das Feuer geschmolzen wird und sich wieder abkühlt, entsteht ein Stein von schwarzer Färbung.»

Das ewige Feuer der Hölle

In der christlichen Vorstellungswelt verdeutlichen Vulkanausbrüche sowohl den Allmächtigen als auch das ewige Feuer der Hölle. Jahwe, der Gott der Israeliten, ähnelt in seltener Weise einem Vulkan. Er lässt, berichtet die Heilige Schrift, Schwefel und Feuer über Sodom und Gomorra regnen.

Die dramatische Schilderung Plinius' des Jüngeren über die gigantische Eruption des Vesuv 79 n. Chr. lässt den Schluss einer direkten Beziehung zwischen Naturkatastrophe und der visionär phantastischen Bildhaftigkeit der Offenbarung des Johannes zu. Der kausale Zusammenhang wird durch Einbezug der Chronologie deutlicher. Nach einem Leben voller Leid und Unterdrückung der Juden und Christen erschütterte die völlig unvorhergesehene Eruption des Vesuvus am 24. August 79, welche die blühenden Städte Kampaniens Pompeji und Herculaneum unter Ascheregen, Glutwolken und Schlammströmen begrub, als direkten Zeugen des Chaos seinen Glauben und seine Weltanschauung. Nach der Machtergreifung des grausamen Despoten Domitian im Jahre 81 wird Johannes nach Patmos verbannt, wo er noch im hohen Alter das Evangelium verkündet. Altersgeschwächt und nur von einem Schüler begleitet, verbringt er sein Exil in einer Höhle unterhalb der Chora, welche zum Quell der Entstehung der Apokalypse werden soll. Sie liegt als Erosionsprodukt der Stürme eingebettet inmitten eines Vulkankegels, umgeben von Millionen Jahre alten Vulkanschloten.

Zwiespältige Vorstellungen

Während orientalische Überlieferungen von einem reinigenden Feuerstrom der Vulkane berichten, benutzt der katholische Fundamentalismus die feurigen Naturgewalten zu repressiven Fegefeurvorstellungen.

Aus der Zwiespältigkeit zwischen doktrinärem Glauben und rationalem Wissensdrang gründet sich das ständige Interesse um die Erkenntnis des Vulkanismus. Gegen Ende des «dunklen Mittelalters» gelang es dem Naturforscher und Jesuiten Athanasius Kircher mit seinem Werk «Mundus Subterraneus» (Die unterirdische Welt, 1664), das Interesse an einer nonkonformistischen Entstehungsgeschichte zu entfachen. Die Darstellung zeigt den kugeligen Aufbau der Erde mit ihren Pyrophyllaceen (Feuerherden), welche die feurigen Naturkräfte veranschaulichen, die Vulkane an der Erdoberfläche speisen und das Meer erwärmen. Doch es sollten noch zwei Jahrhunderte, geprägt von kirchlich-dogmatischen Doktrinen und dem an Vermutungen geknüpften Zwist zwischen Neptunisten und Plutonisten, vergehen, bis die vulkanischen Phänomene im wissenschaftlichen Denken richtig erkannt wurden. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts verhalf der Schotte James Hutton, der Begründer der moderneren Geologie, auch der Vulkanologie zum Durchbruch, indem er erkannte, dass granitische wie basaltische Schmelzen, aus dem Erdinneren kommend, Sedimentgesteine durchdringen.

Erfolgreiche Vorhersage

Präzise Schilderungen über Eruptionsabläufe und damit Information über mögliche zukünftige Vulkankatastrophen liegen erst 200 Jahre zurück. Weltweit trugen zehn bedeutende Ausbrüche dazu bei: Tambora 1815, Krakatau 1883, Mont Pelé 1902, Vesuv 1906, Katmai 1912, Bezymianny 1956, Mt. St. Helens, Nevado del Ruiz, Pinatubo 1991 und Montserrat 1997.

In den Apriiltagen des Jahres 1815 explodierte der Vulkan Tambora, einige hundert Kilometer südwestlich der Südspitze von Celebes, welcher seit Menschengedenken im tropischen Dschungel geruht hatte. Seine unglaubliche Eruptionsenergie sprengte in wenigen Tagen ca. 150 km³ Magma und Ge-

steinsmaterial in den Himmel. Die Bilanz war grauenvoll. 10 000 Bewohner der umliegenden Inseln wurden Opfer dieser Eruptionsphase und der damit verbundenen Flutwellen und Stürme, weitere 80 000 Menschen starben an Hungersnöten und Seuchen in den folgenden Monaten. Der Sommer 1816 wurde durch die Absorption der Sonnenstrahlen weltweit zu einer Kälteperiode mit einer durchschnittlichen Absenkung der Temperatur von 3 °C und den daraus resultierenden Missernten.

Nur 68 Jahre später wurde die gleiche Region durch eine weitere Vulkankatastrophe heimgesucht. Am 27. August 1883 verschwand unter heftigsten Explosionen, welche 5000 km weit zu hören waren, die Vulkaninsel Krakatau in der Sundastrasse. Auf den Nachbarinseln und an den Küsten Sumatras und Javas kamen ca. 36 000 Menschen in den Flutwellen um. Aus vielen Schilderungen dieser Zeit geht hervor, dass sich die Himmelsfarbtöne während eines Jahres, bedingt durch feinste Aschenteilchen des Krakatau in der Stratosphäre, in einem Spektrum von Blau zu Violett präsentierten.

Den erschütterndsten Anblick bot jedoch die Hafenstadt St-Pierre auf der Antilleninsel Martinique am 8. Mai 1902. Innerhalb weniger Minuten wurde die gesamte Stadt mit 30 000 Einwohnern von einer mit rund 160 Stundenkilometern den Mont Pelé hinunter rasenden Glutwolke hinweggefegt. Am 13. November 1985 flimmerten Schreckensbilder aus Kolumbien über die Bildschirme. Das katastrophale Ausmass einer durch die Eruption des Nevado del Ruiz ausgelösten Schlammkatastrophe mit 25 000 Opfern hätte sicher verringert werden können, wären Regierungsstellen und lokale Behörden den Warnungen von Vulkanologen und Katastrophenexperten rechtzeitig gefolgt.

Modernste vulkanologische, geophysikalische, geochemische und geodätische Überwachungsmethoden erlaubten dagegen 1991 am Pinatubo, unweit der philippinischen Millionenstadt Manila, eine erfolgreiche Ausbruchvorhersage. 250 000 Menschen wurden aufgrund von Vorwarnungen und einer militärisch koordinierten Evakuierung vor dem «Jahrhundertausbruch» gerettet, der über 10 km³ Material explosiv bis in 30 km Höhe förderte.

Neapel – Drei Millionen auf dem Pulverfass

Kaum ein anderes Vulkangebiet hat in den vergangenen 50 000 Jahren derart zahlreiche und verheerende Vulkanausbrüche erlebt wie jenes der Campi Flegrei mit ihren über 25 Eruptionszentren inmitten und am Rande einer Mega-Caldera von 20 km Durchmesser und des 1280 m hohen Stratovulkans Vesuv.

Während katastrophale explosive Eruptionen in den Campi Flegrei in Grössenordnungen von tausenden von Jahren abliefen, waren es aus dem Vesuv nur hunderte von Jahren. So verwüstete die erste Eruption (der grösste Vulkanausbruch Europas) vor zirka 37 000 Jahren mit ihren Glutwolken flächenhaft die gesamte kampanische Provinz, ein Gebiet von 33 000 Quadratkilometern (zwei Drittel der Fläche der Schweiz). Vor 12 000 Jahren folgte ein weiterer Ausbruch, der die gesamte Region von Neapel zerstörte. Das letzte vulkanische Ereignis datiert aus dem Jahr 1538, wo während einer Woche am Ufer des Golfs von Pozzuoli der 123 m hohe Vulkan Monte Nuovo entstand. Seither ruht «Vulcanus». In grosser Krustentiefe sorgen riesige Mengen von abkühlenden magmatischen Gesteinskörpern für ständige Zufuhr heisser Gase und Wässer (Solfatara), sowie für seismische Unrast mit starken Hebungen und Senkungen in Meterhöhen.

Der Vesuv, der bekannteste Vulkan der Erde, der in den vergangenen zweitausend Jahren über 150 Eruptionsabläufe hatte, erscheint gegenüber den Campi Flegrei um Dimensionen kleiner. Der katastrophalste explosive Ausbruch Ende August 79 n. Chr.

deckte während dreier Tage die Städte Herculaneum und Pompeji vollständig mit Bimsen, Aschen und Glutwolken und kostete Zehntausenden das Leben. Seit diesem Inferno zerstörten zahlreiche Eruptionen mit den ebenfalls geförderten Lavamassen nahezu alle Siedlungen an den Hängen des Vesuv und den Ufern des Golfes von Neapel. Zu den schrecklichsten Ereignissen zählen die Ausbrüche von 1631 und 1906. Obwohl der Vesuv seit seinem letzten Ausbruch 1944 ruht, ist er nicht erloschen. Der Untergrund ist geodynamisch hoch aktiv und kontinuierlich mit modernster Messmethodik durch das «Osservatorio Vesuviano» überwacht.

Doch ungeachtet möglicher Vulkan- und Erdbebenkatastrophen wächst ständig die Bevölkerung. Mehr als drei Millionen leben in der Region Neapel inmitten der blühenden kampanischen Provinz. Gerade hier sollte das japanische Sprichwort beherzigt werden: «Naturkatastrophen schlagen zu, wenn man ihre Gefahr vergessen hat.»

Seit Jahren bemühen sich Vulkanologen, Regierungsstellen und Zivilschutz um eine realistische Risikoanalyse und deren machbare Umsetzung, denn aus der «roten Zone» auf den Hängen des Vesuvs zwischen Neapel, Pompeji und Castellamare müssten im Ernstfall innerhalb von Tagen allein 600 000 Menschen evakuiert werden. So hat die Regierung der Region von Campania ein Programm zur Risikoverminderung lanciert. Trotz illegalen Bauens will man die Bevölkerungszahl mittels Umsiedlung aus den am stärksten gefährdeten Gebieten reduzieren und grosszügige Fluchtstrassen anlegen.

Forschungsinformationen

Junge Forscher aus dem Institut für Mineralogie und Petrographie der ETH Zürich fanden in den Spurengasen zweier sich kontrastierender Vulkane, der Fossa auf der Insel Vulcano (Italien) und des Kudriavi (Kurilen) bei Fumarolentemperaturen zwischen 500 und 900 Grad Celsius auch die langlebigen halogenierten Kohlenwasserstoffe. Mengemässig übersteigen diese Freone um mehrere Grössenordnungen ihre Konzentrationen in der Umgebungsluft. Letztere hat man bis heute nur dem industriellen Eintrag zugeschrieben (Protokoll von Montreal). Es ist daher absehbar, dass zukünftige Diskussionen und Modelle der Atmosphärenverschmutzung wie diejenige des Ozonabbaus vermehrt den natürlichen Eintrag durch schlafende Vulkane berücksichtigen müssen.

Prof. Volker J. Dietrich

Institut für Mineralogie und Petrographie der ETH Zürich



Abb. 1: Ausbruch des Stromboli-Vulkans 2002.

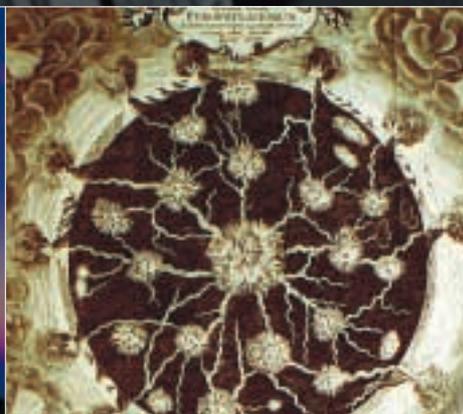


Abb. 2: Die Erde mit ihren Feuerherden, Vulkanen und Ozeanen aus «Mundus subterraneus» (Athanasius Kircher, 1664).



Abb. 3: Aufbau und Dynamik des Erdinnern: Ein Simulationsmodell, das auf seismischer Tomographie nach U. Hansen und Mitarbeitern beruht (Universität Münster; aus GEO März 2004).

WASSER IM TIEFEREN ERDINNERN

DOMENICO GIARDINI UND EDUARD KISSLING

Wir leben auf einem Planeten mit grossen Mengen von Wasser. Wasser bedeckt mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche und ist die wichtigste Komponente der Biosphäre. Wasser ist eine Voraussetzung für Entwicklung und Erhalt von Leben. Es steht deshalb zuoberst auf unserer Liste der schützenswerten natürlichen Ressourcen. Allerdings sollten wir unser Augenmerk nicht nur auf die Oberflächenwässer richten: Eine grosse Menge von Wasser ist durch geologische Prozesse in den Gesteinen im tieferen Erdinnern gebunden.

Fast täglich erhalten wir Bilder von Robotern, welche die Marsoberfläche erkunden. Wie wir heute wissen, gab es auch auf dem Mars einmal Wasser und vielleicht Leben. Heute jedoch ist die Marsoberfläche wasserfrei; Wasser ist einzig noch gebunden in Gesteinen im Marsinnern vorhanden. Für die Erde wird der Anteil von im Planeteninneren gebundenen Wasser auf bis 50% des gesamten Wasserbudgets geschätzt, wobei diese Zahl mit grosser Unsicherheit behaftet ist. Zum Verständnis der Evolution unseres Planeten sind bessere Kenntnisse über das in der tiefen Erde gespeicherte Wasser und ein besseres Verständnis des gesamten Zyklus des Wassers in der Erde nötig. Die Seismologie kann hierzu wichtige Informationen liefern: Die Analyse von seismischen Erdbebenwellen, welche die Erde in alle Richtungen durchstrahlen, erlaubt einen Einblick in die Struktur und in die Funktionsweise des tieferen Erdinnern. Seit kurzem ist auch klar: Seismische Untersuchungen helfen uns, die Menge von Wasser im tieferen Erdinnern zu bestimmen und die Wechselwirkung von Wasser in den globalen plattentektonischen Prozessen besser zu verstehen.

Lithosphäre – isolierende Haut der Erde

Seit ihrer Entstehung vor etwa 4500 Millionen Jahren kühlt die Erde langsam ab. Die Abkühlung des heissen Erdinnern wird verzögert durch die feste isolierende Haut –

welche als Lithosphäre bezeichnet wird – und durch die Heizwirkung des Zerfalls der radioaktiven Elemente. Konvektionsströmungen im zähflüssigen Erdmantel bringen heisses Material in die Nähe der kalten Erdoberfläche und kaltes Material zurück zur Kern-Mantel-Grenze. Das dynamische Zusammenspiel von Strömungen im Erdmantel mit Bewegungen und Veränderungen der Lithosphärenplatten wird als globale Plattentektonik bezeichnet und bildet die Grundlage für unser Verständnis der Entwicklung der Erde.

Die Lithosphäre besteht aus mehreren Schichten mit chemisch verschiedenem Gesteinsmaterial. Von entscheidender Bedeutung für die Funktionsweise der Plattentektonik ist der Unterschied zwischen ozeanischer und kontinentaler Lithosphäre (OL und KL). Letztere ist leichter und wird deshalb nur in unwesentlichen Mengen subduziert. Die OL dagegen besteht zum grössten Teil aus an den mittelozeanischen Rücken (MOR) und bei etwa 1300 Grad gefrorenem und anschliessend weiter abgekühltem Mantelmaterial. Sie ist deshalb schwerer als der direkt darunter liegende zähflüssige obere Mantel und wird fast vollständig subduziert. Die OL bewegt sich vom MOR zur Subduktionszone, wo sie unter die benachbarte Lithosphärenplatte abtaucht und in den Mantel absinkt (subduziert). Die OL ist damit integraler Bestandteil der Konvektionsströmungen im Erdmantel (Abbildung 1), welche in ihrer Gesamtheit als globales Rezykliersystem bezeichnet werden kann.

Wasser in der tiefen kontinentalen Lithosphäre

In Sedimenten eingeschlossenes und im lithosphärischen Gesteinsmaterial gebundenes Wasser wird mit der OL subduziert und gelangt so in grössere Tiefen, wobei allerdings der grösste Teil des Wassers bereits in den obersten 150 km abgegeben wird und in die darüberliegende Lithosphärenplatte entweicht. Tomographische Beobachtungen nach dem Mag8-Antofagasta-Erdbeben (Nord-Chile) 1995 geben Aufschluss über Prozesse beim Entweichen von Wasser in den obersten 50 km der Subduktionszone. Die in Nordchile subduzierende Nazca-Lithosphärenplatte (NLP) zeigt an ihrer Oberseite eine Horst-Graben-Struktur, welche mit wassergesättigten Sedimenten gefüllt ist (Abbildung 2A). Die Grenze zwischen der abtauchenden ozeanischen NLP und der darüber liegenden südamerikanischen kontinentalen Lithosphärenplatte (SALP) besteht aus einer tektonischen Störungszone, in welcher sich aufgrund der grossen differentiellen Bewegungen der beiden Platten ein Band von zermahlenem Gestein (Mylonit) gebildet hat. Diese im Normalzustand für Wasser undurchlässige Schicht wird bei einem grossen Erdbeben an verschiedenen Stellen durchbrochen und erlaubt dem unter Druck stehenden Wasser, in die darüber liegende SALP zu entweichen. Gesteinsmechanische Modellrechnungen für diesen Prozess erklären in erster Näherung die tomographischen Beobachtungen der Effekte von diesen ein-

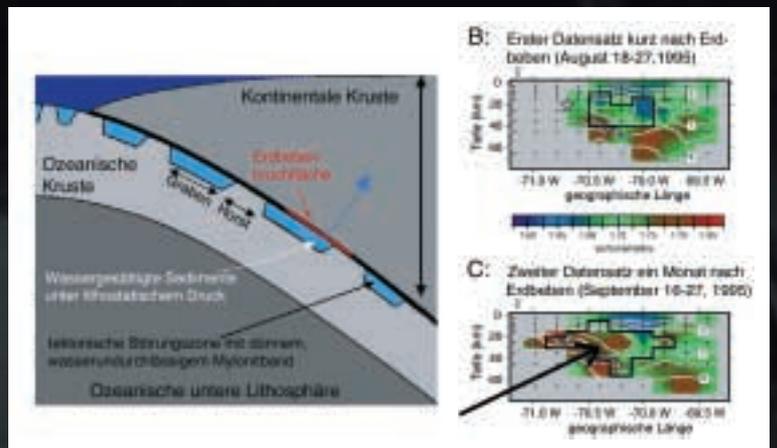


Abb. 2: In Subduktionszonen wird unter lithostatischem Druck stehendes Wasser in den Sedimenten der Grabenstrukturen in grössere Tiefen gebracht. Wenn bei einem grossen Erdbeben (Beispiel Antofagasta-M8-Beben 1995 in Nordchile) die Mylonitzone entlang der Plattengrenze zerstört wird, dringt die Flüssigkeit in die darüber liegende kontinentale Kruste ein. A: schematisches Modell; B und C: tomographische Bilder der seismischen Geschwindigkeiten (Verhältnis von P- zu S-Wellengeschwindigkeit) für denselben Querschnitt zu verschiedenen Zeiten zeigen im Vergleich den Effekt (Pfeil) des eingedrungenen Wassers. Der Stern markiert das Hypozentrum des grossen Bebens, die weissen Punkte bezeichnen Nachbeben, welche zur Berechnung der Tomogramme verwendet wurden. Schwarz eingrahmt ist das gut aufgelöste Gebiet.

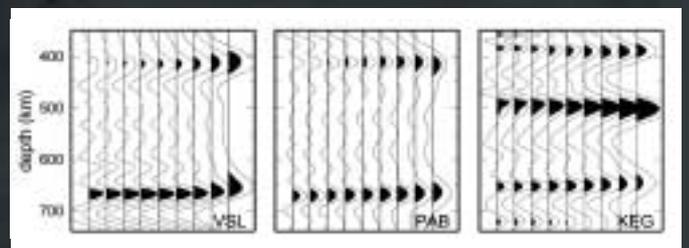


Abb. 3: Gestapelte Seismogramme («Receiver functions») für drei Stationen aus dem Mittelmeergebiet. Zur Stapelung werden die Seismogramme von verschiedenen Erdbeben (registriert an einer Station) summiert, nachdem sie für die Ankunftszeit der ersten P-Welle ausgerichtet sind. Für jede der drei Stationen ist das gestapelte Seismogramm für verschiedene Low-pass-Filter dargestellt, wobei die Filterfrequenz von links nach rechts jeweils 0,75, 0,62, 0,5, 0,4, 0,3, 0,25, 0,2, 0,15 Hz beträgt. Jede markante Auslenkung in den Signalen bedeutet eine P-S-Wellenkonversion an einer Grenzfläche im Untergrund. Die Tiefenlage der Grenzfläche kann aus der Zeitverzögerung relativ zur erstankommenden P-Welle abgeleitet werden. Unter Annahme einer Gauss'schen Fehlerverteilung wird die Standardabweichung für jedes gestapelte Seismogramm berechnet. In Schwarz sind die Standardabweichungen für die P-S-Konversionen mit 95% Vertrauensintervall dargestellt. Alle drei Stationen (VSL Sardinien; PAB Spanien; KEG Ägypten) zeigen frequenzabhängige Konversionen an der 410-km- und frequenzunabhängige Konversionen von der 660-km-Diskontinuität. An KEG beobachten wir ausserdem eine konvertierte Welle von einer Grenzfläche in etwa 510 km Tiefe.

Gibt es Wasser in der Mantelübergangszone?

Um zu untersuchen, ob in der Mantelübergangszone Wasser vorhanden ist, haben wir die Eigenschaften der seismischen Diskontinuitäten unter dem Mittelmeergebiet studiert. Dieses Gebiet war während der vergangenen 190 Millionen Jahre stark durch die Subduktion von OL beeinflusst worden, was zur Bildung von Kollisions-Gebirgsgürteln wie zum Beispiel den Alpen und dem Apennin sowie zur Öffnung von jungen ozeanischen Becken wie zum Beispiel des Tyrrhenischen und des Ligurischen Meeres geführt hat. Aktive Subduktionszonen sind gegenwärtig im südlichen Italien und in Griechenland zu finden. Die subduzierte Lithosphäre versinkt mit einer Geschwindigkeit von 5–10 cm/Jahr im Mantel und bleibt wegen ihrer tiefen Temperaturen bis in Tiefen von Hunderten von Kilometern zusammenhängend. Tomographische Bilder zeigen eine Ansammlung von immer noch kaltem lithosphärischem Material in der Übergangszone (410–660 km Tiefe) unter dem gesamten Mittelmeergebiet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die subduzierte Lithosphäre nur schwer in den viskosereren unteren Mantel einzudringen vermag. Die Übergangszone unter dem Mittelmeer ist folglich ein ideales Gebiet, um nach Wasservorkommen im Mantel zu suchen – wobei dieses Wasser in Gestein fest eingebunden und nicht frei ist.

Seismogramme von Fernbeben untersuchen

Wir untersuchten Seismogramme von Fernbeben, registriert an Stationen im Mittelmeergebiet, nach S-Wellen, die durch Umwandlung aus P-Wellen an Diskontinuitäten entstanden sind. Um das Auflösungsvermögen des Versuches zu erhöhen, haben wir 18 temporäre seismische Breitband-Stationen entlang der Plattengrenze zwischen Eurasien und Afrika (MIDSEA) eingesetzt und über 500 Seismogramme analysiert. Wir haben durch RFA verschiedene umgewandelte Wellen identifiziert und haben für alle Stationen von P zu S umgewandelte Wellen von der 410-km- und der 660-km-Diskontinuität gefunden.

Die Umwandlungen bei der 410-km-Diskontinuität sind klein in der Amplitude für RFA-Seismogramme, welche mit einem Low-pass-Filter von 0,5 Hz oder mehr gefiltert werden. Die Amplituden nehmen bei abnehmender Filter-Grenz-Frequenz zu. Diese Wirkung wurde für die Umwandlungen bei der 660-km-Diskontinuität nicht beobachtet, welche vergleichbare Amplituden für den ganzen Frequenzbereich zeigt. Diese Frequenzabhängigkeit der Amplituden und die Bedeutung der Signale erlauben uns, die Mächtigkeit der Übergangsbereiche der 410-km- und der 660-km-Diskontinuitäten abzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Phasenübergang in 410 km Tiefe nicht scharf ist und bei den meisten Stationen über einen Tiefenbereich von etwa 20–25 km vorkommt, unter dem westlichen Mittelmeer sogar über einen Tiefenbereich von 30–35 km. So ein breites Intervall könnte der Grund sein, warum frühere RFA-Studien versagt haben beim Versuch, die 410-km-Diskontinuität in diesem Gebiet zu finden. In Einklang mit vorherigen Beobachtungen zeigen unsere Resultate unter den meisten Stationen einen verhältnismässig dünnen (5 km) Übergangsbereich für die 660-km-Diskontinuität.

Das globale Wassersystem besser verstehen

Wir interpretieren unsere Beobachtung der Verdickung der 410-km-Diskontinuität mit einem lokal erhöhten Wassergehalt der Mantelmineralien in dieser Tiefe. Diese Mineralien können eine beträchtliche Menge an Wasser enthalten: bis zu 1000 ppm für Olivin und ungefähr 20 000 ppm für Wadsleyit. Der maximale Wassergehalt in Olivin für einen Übergangsbereich von 20–25 km Mächtigkeit wird auf 500 ppm geschätzt, ein Übergangsbereich von 30–40 km erfordert einen Wassergehalt in Olivin von 700–1000 ppm.

Während diese seismologischen Beobachtungen noch keine bessere Abschätzung des Anteils von im Gestein des Erdinnern gebundenem Wasser erlauben (siehe oben, Schätzung bis zu 50%), ermöglichen sie uns einen Schritt in Richtung zu einem besseren Verständnis des globalen Wassersystems und der damit verbundenen Prozesse in und auf unserem Planeten.

Literatur

S. Husen & E. Kissling, Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile, *Geology*, 29, 847–850, 2001.

A. Koerner, E. Kissling, S. A. Miller, A model of deep crustal fluid flow following the Mw=8.0 Antofagasta, Chile earthquake, *J. Geophys. Res.*, in press, 2004.

M. van der Meijde, F. Marone, D. Giardini & S. van der Lee, Seismic evidence for water deep in Earth's upper mantle, *Science*, 300, 1556–1558, 2003.

S. van der Lee, F. Marone, M. Van der Meijde, D. Giardini et al., Project MIDSEA yields new seismographic data from the Eurasia-Africa plate boundary region, *Eos, Trans. Am. geophys. Un.*, 82, 637–646, 2001.

Prof. Domenico Giardini

Professor für Seismologie und Geodynamik, Direktor des Schweizerischen Erdbebendienstes, Departement Erdwissenschaften ETH Zürich

Prof. Eduard Kissling

Professor am Institut für Geophysik ETH Zürich

TIEFE TUNNELBAUWERKE IN DEN ALPEN

HILMAR INGENSAND, SIMON LÖW UND CHRISTIAN ZANGERL

Der neue Gotthard-Basistunnel des AlpTransit-Projektes ist mit 57 km der längste Eisenbahntunnel der Welt in einer alpinen Region. Die technischen Herausforderungen bestehen dabei nicht nur im Tunnelvortrieb unter speziell schwierigen geologischen Bedingungen, sondern auch in der Lösung der Vermessungsaufgaben.

Auch wenn heute mit dem Global Positioning System (GPS) viele Vermessungsprobleme einfacher zu lösen sind, so ist diese Technik nur unter freiem Himmel einsetzbar. GPS hat jedoch dazu beigetragen, dass für den 57 km langen Gotthard-Basistunnel von Erstfeld bis nach Bodio mit Millimetergenauigkeit Passpunkte für die unterirdische Vermessung erstellt werden konnten. Diese oberirdischen Koordinaten müssen über die Zugangsstollen und Schächte der Haupt- und Zwischenangriffe auf das Tunnelniveau übertragen werden. Dies geschieht mit elektrooptischen Messverfahren, die sich in den letzten Jahren ebenso weiterentwickelt haben wie GPS. So genannte Robotertheodolite mit automatischer Anzielung durch eingebaute CCD-Kameras ersetzen inzwischen das scharfe Auge des Geodäten.

Navigation 1 km unter der Erde

Eines der Hauptprobleme bleibt jedoch die unterirdische Richtungsangabe für den Tunnelvortrieb. Dazu werden so genannte nordsuchende mechanische Kreisel eingesetzt, die ihre Drehachse aufgrund des physikalischen Gesetzes der Präzession auf die Rotationsachse der Erde ausrichten (siehe Abbildung 1). Diese Methode ist auch tief im Erdinneren nahezu unabhängig von anderen Einflüssen. Einzig die lokalen Lotabweichungen müssen bei einem bandgehängten Kreisel berücksichtigt werden. In diesem Jahr wurde auch erstmals in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ und der Technischen Universität München ein Inertialsystem eingesetzt. Wie der Name schon sagt, stellt die-

ses Gerät ein völlig autonomes Messsystem dar, das Koordinaten bestimmt und welches über drei Laserkreisel und drei Beschleunigungssensoren verfügt. Mit diesem System können ebenfalls Richtungen von der Erdoberfläche in den Berg übertragen werden. Es wurde in einem der Aufzüge in Sedrun installiert, die mit 11 m/s in die Tiefe fahren. Damit wird erstmals eine unabhängige Kontrolle der eingangs erwähnten Kreismessungen möglich.

Das Gebirge senkt sich

Vor einigen Jahren wurde von den Geodäten der Landestopographie und der ETHZ festgestellt, dass sich das Gebirge über dem Gotthard-Strassentunnel in den letzten 30 Jahren bis zu 12 cm gesenkt hat (Ab-



Abb. 1: Vermessungskreisel der ETHZ. Die Erde verhält sich aufgrund der Rotation wie ein Kreisel und ist aufgrund der Fliehkraft abgeplattet. Da die Rotationsachse der Erde rund $66,5^\circ$ gegen die Ebene der Ekliptik geneigt ist, verursacht die Anziehung von Sonne und Mond ein Drehmoment, das die Erdachse aufzurichten versucht. Dieses führt ebenso zu den kreiseltypischen Achsbewegungen der Präzession und Nutation. Zusätzliche Effekte entstehen durch Verlagerung von Massen im Erdinneren. Die Bewegung der Rotationsachse der Erde wird als Polbewegung mit hochgenauen Verfahren wie z.B. der Very Long Baseline Interferometry beobachtet. Die Bewegungen haben für die Präzession eine Periodizität von 25 600 Jahren und für die Nutation von 18,6 Jahren. Die momentane Abweichung der Erdachse von der idealen Achse wird natürlich bei den Kreismessungen im Gotthard mitberücksichtigt.

bildung 2). Die Geologen führen diese Beobachtung auf eine Entwässerung des Gebirges zurück, die auch im Bereich des Gotthard-Basistunnels erfolgen könnte. In geklüfteten Gneisen, Graniten und Schiefen sind die Zusammenhänge zwischen der Gebirgsentwässerung entlang einem tief liegenden Tunnel und den Verformungen an der Geländeoberfläche sehr kompliziert und bis heute nicht vollständig verstanden. Umfangreiche Studien der Ingenieurgeologie an der ETHZ zeigen, dass wasserdurchlässige Störzonen eine grosse Bedeutung für die Auslösung und Form von Setzungen haben (Abbildung 3).

Die Analyse dieser Prozesse und die Vorhersage der Auswirkungen von zukünftigen Tunnelvortrieben auf die Geländeoberfläche erfolgt durch eine Kombination von geologischen Geländekartierungen, felsmechanischen Laborversuchen und numerischen Computermodellen. Abbildung 4 zeigt eine Simulation der vertikalen Verschiebungen (Setzungen) in einem vereinfachten Längsprofil entlang des Gotthard-Strassentunnels zwischen Hospental und Airolo. Die berechneten Setzungen breiten

sich ausgehend von Sustenegg über mehrere Kilometer sowohl nach Norden wie Süden aus. Die Verbindung zwischen den Tunnelzuflüssen und den Setzungen stellen Störzonen und Klüfte (in Abbildung 4 grün dargestellt) dar, die sich als Funktion der reduzierten Wasserdrucke schliessen oder lokale Scherbewegungen der angrenzenden Felsblöcke ermöglichen (rote Bereiche der Störzonen und Klüfte in Abbildung 4). Neue Laborversuche, welche die ETHZ zusammen mit der Technischen Universität Graz ausgeführt hat, zeigen, dass sich vermutlich auch die Blöcke zwischen den Klüften und Störzonen als Funktion der reduzierten Wasserdrucke verformen. Dies könnte eine mögliche Erklärung dafür sein, dass es sehr schwierig ist, durch die Verformungen der Diskontinuitäten (Klüfte und Störzonen) allein den gemessenen Setzungsbetrag von 12 cm zu erreichen (Abbildung 4). Die Gesamtsetzung (das Volumen des Setzungstrichters) ist proportional zur Wasserentnahme aus dem Gebirge (Tunnelzufluss minus Grundwasserneubildung) im betrachteten Gebiet.

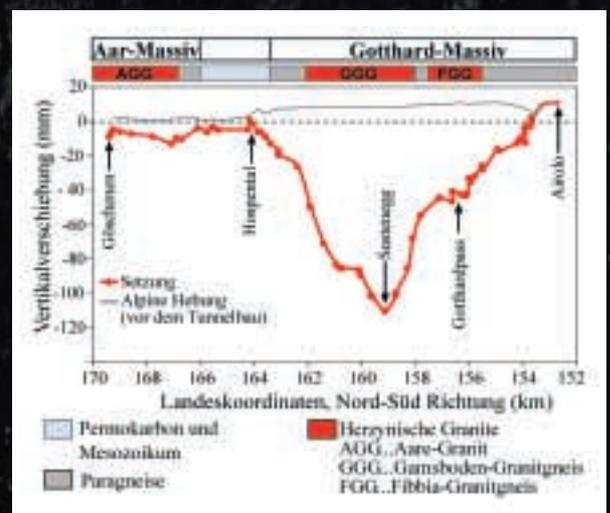


Abb. 2: Durch Präzisionsnivellements entlang der Gotthardpassstrasse gemessene vertikale Oberflächenverschiebungen vor und nach dem Bau des Gotthard-A2-Strassentunnels. Die vertikalen Verschiebungen vor dem Bau (grau) beziehen sich auf eine jährliche Hebungsrates, jene nach dem Bau (rot) auf ein vermutlich mehrjähriges, durch den Tunnelbau ausgelöstes Setzungsereignis.

Sind die Staumauern im Gotthardgebiet gefährdet?

Es ist von anderen Stauanlagen bekannt, dass Gelände­verformungen, wie sie im Gotthardgebiet beobachtet wurden, unter Umständen zu Schäden an Bogenstaumauern führen können. Aus diesem Grunde wurden im Gebiet des Gotthard-Basistunnels vorsorglich umfassende geodätische Messanlagen installiert, die permanent die Oberflächengeometrie im potenziellen Einflussbereich des Tunnels überwachen. Da sich die Erdoberfläche auch ohne drainierende Tunnelbauwerke verformt, zum Beispiel als Funktion der mittleren Tagestemperaturen, der Gezeiten oder des Wasserstandes in den Stauseen, wurden diese Messungen schon vor dem Bau der Haupttunnel am Gotthard begonnen. Wie erste Resultate zeigen, führen die natürlichen Gelände­verformungen zum Beispiel zu periodischen Verbreiterungen und Verengungen der Talquerschnitte von mehreren Millimetern pro Kilometer. Diese Werte sind durchaus vergleichbar mit jenen, die durch geringe Tunnelzuflüsse ausgelöst werden – und zu keinen Beeinträchtigungen der Stauanlagen führen. Bei grösseren Tunnelzuflüssen müssten zur Verhinderung grösserer Gelände­verformungen Gegenmassnahmen – wie abdichtende Gebirgsinjektionen – ergriffen werden.

Forschungsinformationen

Forschungsschwerpunkte der Gruppe um Prof. Ingensand (geomETH) des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) sind die Gebiete Geodätische Messtechnik sowie Sensorik und Ingenieurgeodäsie. Seine Forschungsgruppe hat sich zum Ziel gesetzt, hochpräzise Richtungsmessverfahren zur Tunnelvortriebsmaschinensteuerung zu entwickeln. Dies ist unter anderem mit dem weltweit ersten Zweifarblaser-Dispersometer gelungen. Ebenso sind Entwicklungen im Bereich hochpräziser hydrostatischer Messsysteme, Monitoring von Naturgefahren und der Gleis­messtechnik für Hochgeschwindigkeitsbahnen zu nennen. Prof. Ingensand ist auch als Experte im Projekt AlpTransit tätig.

Kontakt:

Prof. Hilmar Ingensand
01 633 30 56
hilmar.ingensand@geod.baug.ethz.ch
www.geometh.ethz.ch

Referenzen

Bundesamt für Landestopographie (1998): Bodensenkungen über dem Gotthardstrassentunnel. Press Release 22.1.1998.

Ingensand, H., Ryf, A., Stengele, R. (1998): The Gotthard Base Tunnel – a challenge for geodesy and geotechnics. Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, April 20–22, Eisenstadt, Austria.

Salvini, D. (2002): Geotechnic problems related to major construction projects. Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Organized by the Department of Applied and Engineering Geodesy, Vienna University of Technology, Austria. Berlin, May 21–24, 2002.

Zangerl, C. (2003): Analysis and Surface Subsidence in Crystalline Rocks above the Gotthard Highway Tunnel, Switzerland. Dissertation ETH No. 15051.

Prof. Hilmar Ingensand

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (ETHZ)

Prof. Simon Löw

Geologisches Institut (ETHZ)

Christian Zangerl

Geologisches Institut (ETHZ)

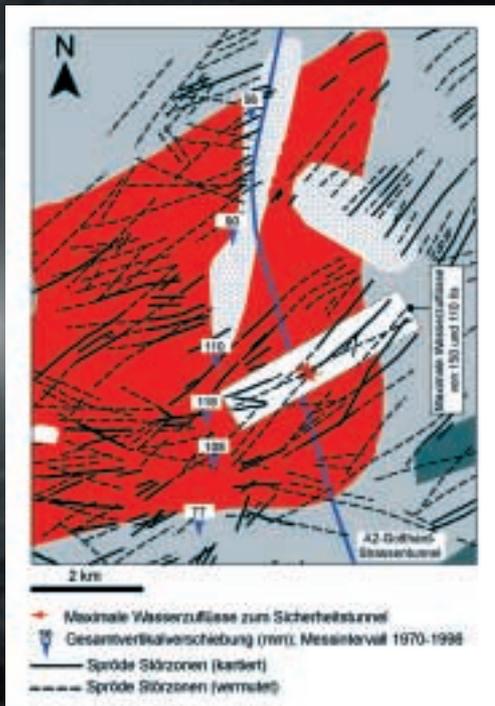
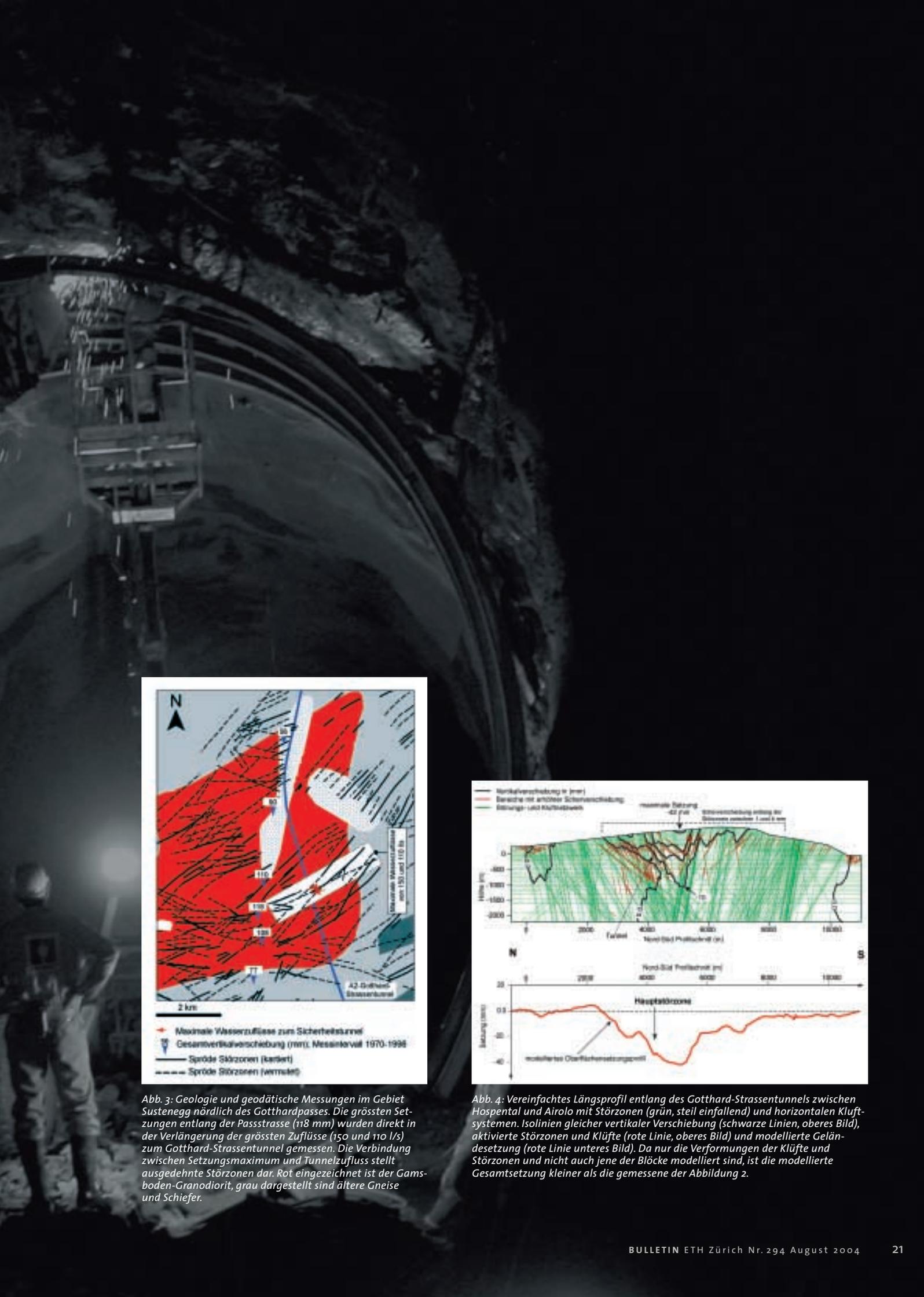


Abb. 3: Geologie und geodätische Messungen im Gebiet Sustenegg nördlich des Gotthardpasses. Die grössten Setzungen entlang der Passstrasse (118 mm) wurden direkt in der Verlängerung der grössten Zuflüsse (150 und 110 l/s) zum Gotthard-Strassentunnel gemessen. Die Verbindung zwischen Setzungsmaximum und Tunnelzufluss stellt ausgedehnte Störzonen dar. Rot eingezeichnet ist der Gamsboden-Granodiorit, grau dargestellt sind ältere Gneise und Schiefer.

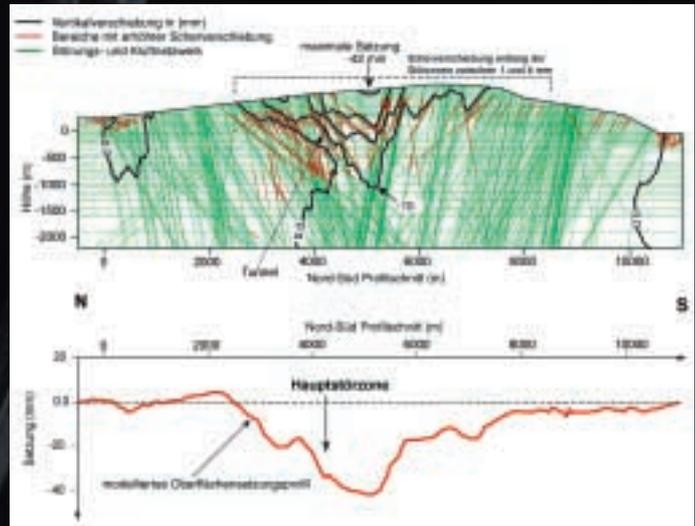


Abb. 4: Vereinfachtes Längsprofil entlang des Gotthard-Strassentunnels zwischen Hospental und Airolo mit Störzonen (grün, steil einfallend) und horizontalen Kluftsystemen. Isolinien gleicher vertikaler Verschiebung (schwarze Linien, oberes Bild), aktivierte Störzonen und Klüfte (rote Linie, oberes Bild) und modellierte Geländesetzung (rote Linie unteres Bild). Da nur die Verformungen der Klüfte und Störzonen und nicht auch jene der Blöcke modelliert sind, ist die modellierte Gesamtsetzung kleiner als die gemessene der Abbildung 2.

WELTMEISTER IM TUNNELBAU

SIMON LÖW

Die Schweizer sind Weltmeister im Tunnelbau. Dieser ist stark an die Geologie der Alpen gekoppelt. Genaue Kenntnisse der Gebirgsstruktur der Alpen sowie des Verhaltens der verschiedenen Gesteinsformationen sind für eine erfolgreiche Bewältigung dieser Bauvorhaben notwendig.

Zumindest was die Länge und Tiefe der gebauten oder im Bau befindlichen Tunnel betrifft, gehören die Schweizer zur Weltspitze. Auch bezüglich der Erfahrung kann sich die Schweiz sicher in die vordersten Ränge stellen. Die Eisenbahn-Scheiteltunnel an Gotthard, Lötschberg und Simplon, die vor rund 100 Jahren gebaut wurden, stellen noch heute wichtige internationale Referenzobjekte dar, gefolgt von einer sehr grossen Anzahl weiterer Verkehrstunnels, Wasserkraftstollen und militärischer Untertagebauwerke.

Der Bau dieser Untertagebauwerke ist stark an die Geologie der Alpen gekoppelt: Ohne genaue Kenntnisse der Gebirgsstruktur der Alpen sowie des Verhaltens der verschiedenen Gesteinsformationen ist eine erfolgreiche Bewältigung dieser Bauvorhaben nicht möglich, und gleichzeitig ergeben grosse Untertagebauwerke einen einmaligen Einblick in den Aufbau der oberen Erdkruste, einen Einblick, wie er mit keiner anderen Erkundungsmethode gewonnen werden kann. So hat in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Tunnelbau wichtige Beiträge zur geologischen Erforschung der Alpen geliefert und geologische Grundlagen geschaffen, die noch heute als wichtige Quellen der praxisorientierten Forschung gelten. Ein solches Paradestück, den Gotthard-Scheiteltunnel, erarbeitete zum Beispiel der Projektgeologe Stapff vor 130 Jahren.

Schweizer Erfahrung

In diesen historischen Tatsachen liegt der Grund, dass die Schweizer Geologen und Ingenieure ihre Tunnelbauwerke hauptsächlich basierend auf früheren Erfahrungen planen und realisieren, ein Vorgehen, welches zum Teil stark von jenen anderer Länder abweicht. Dabei kann der Erfahrungs-

schatz Schweizer Untertagebauwerke auf unterschiedlichste Art und Weise genutzt werden, nämlich als empirischer Befund oder auch als Grundlage für die Erarbeitung allgemeiner Gesetzmässigkeiten. Für die Forschung und neuartige Tunnelprojekte sind generalisierbare Erkenntnisse zum Aufbau eines Gebirges und zum Verhalten der verschiedenen Gesteine und Gebirgsabschnitte unter verschiedenen Belastungszuständen und Belastungsgeschichten wichtig. Solche neuen Erkenntnisse aus früheren Untertagebauwerken der Gotthard-Region (Abbildung 1) werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Hoher Wasserdruck und hohe Temperaturen

Tunnelbauwerke im Alpenraum wie die neuen Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg sind mit hohen Gebirgsspannungen, hohen Wasserdrücken und hohen Gebirgstemperaturen konfrontiert. Diese führen dazu, dass sich das Gebirge um den ausgebrochenen Hohlraum (den Tunnel) stark verformt oder sogar einbricht, dass Grundwasser unter Umständen unter hohem Druck in den Tunnel einströmt, den Vortrieb gefährdet, den gesamten Bergwasserhaushalt verändert und zum Austrocknen von Quellen und zu Setzungen an der Geländeoberfläche führt. Viele dieser Gefährdungsbilder sind mit dem Auftreten und den Eigenschaften grösserer tektonischer Bewegungsfugen oder Störzonen verbunden.

Störzonen im Aar- und Gotthard-Massiv

In den letzten Jahren wurden hydraulische und mechanische Eigenschaften von Störzonen und ihre Bedeutung für den Tunnelbau im Rahmen mehrerer Dissertationen der Professur für Ingenieurgeologie an der ETH Zürich untersucht (Laws 2001, Lützenkirchen 2003, Zangerl 2003). Wie die Abbildung 2 zeigt, treten im Aar- und Gotthard-Massiv Störzonen in enorm hoher Dichte auf. Rund 90% dieser Störzonen stellen für die Untertagebauwerke aber keine echte Gefährdung oder Vortriebsbehinderung dar. Dies zeigt zum Beispiel die Abbildung 3, in der die Häufigkeiten und Summenkurve der anfänglichen Zuflüsse zu allen Untertagebauwerken der Abbildung 1 dargestellt sind und aus der klar hervorgeht, dass nur ein kleiner Prozentanteil aller Störzonen überproportional zum gesamten Grundwasserzufluss beiträgt. Bei der Interpretation dieser Abbildung muss auch berücksichtigt werden, dass in dieser der Logarithmus der Zuflüsse dargestellt ist oder, konkreter, dass die Schüttungen zwischen 0,01 l/s und 1000 l/s variieren! Die Herausforderung des Ingenieurgeologen liegt nun darin, nicht nur die Gesamtzahl aller Störzonen korrekt zu erkennen, sondern vor allem jene wenigen Störzonen, welche echte Probleme darstellen, frühzeitig genug zu identifizieren und bezüglich ihres Verhaltens korrekt zu charakterisieren. Detaillierte Analysen des Aufbaus und der Mineralogie solcher Störzonen haben nun gezeigt, dass diese wertvolle Hinweise sowohl zum mechanischen wie zum hydraulischen Verhalten solcher Strukturen liefern können. So treten hohe Durchlässigkeiten nur in Störzonen auf, die noch während später Phasen der alpinen Gebirgsbildung aktiv waren und Mineralfüllungen mit Zeo-

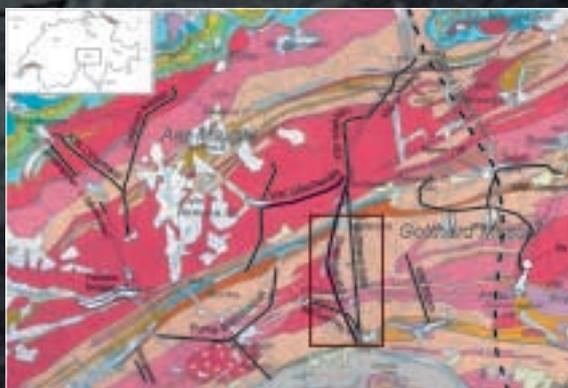


Abb. 1: Geologische Karte mit Verlauf des mittleren Abschnitts des Gotthard-Basistunnels (gestrichelt), bestehender Tunnelbauwerke und Wasserkraftstollen im Gebiet des zentralen Aar- und Gotthard-Massivs (rote Farbtöne). Das braune Rechteck stellt das Gebiet der Abbildung 2 dar.



Abb. 2: An der Oberfläche und im Gotthard-Strassentunnel kartierte Störzonen zwischen Hospental und Airolo (aus Dissertation C. Zangerl, ETH 2003).

liten enthalten (Abbildung 4). Indikatoren für solche Bewegungen finden sich bevorzugt im Gotthard-Massiv, aber kaum mehr im Aar-Massiv (mit Ausnahme seines südlichen Randes). Diese beiden Massive müssen darum auch eine fundamental andere spätalpine Entwicklungsgeschichte erlebt haben.

Wo kommen die Tunnelwässer her?

Analysen der Edelgaskonzentrationen in Grundwässern sowie der stabilen und radiogenen Isotope von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, welche am Labor für Isotopengeologie der ETH, am Physikalischen Institut der Universität Bern und bei der GSF in München gemessen wurden, zeigen, dass diese den Tunnelbauwerken zuströmenden Grundwässer sehr unterschiedliche Herkunft und Vorgeschichten haben (Offerdinger 2001, Lützenkirchen 2002, Kipfer et al. 2004). Während die grössten Zuflüsse zum Gotthard-Strassentunnel (bei Tunnelkilometer 10) aus Tiefen von vielen Kilometern stammen (95% des ^4He ist ra-

diogen und nicht atmosphärisch) und ein Alter von mindestens 50 Jahren haben, entstammen die höchsten Zuflüsse zum Fensterstollen des Furka-Basistunnels (Abbildung 1) zu rund 70% schmelzendem Gletschereis und -firn und zu rund 30% jungem Niederschlag. Die Wässer aus diesen permeablen Störzonen sind darum im Gotthard-Tunnel auch deutlich wärmer, und im Furka-Tunnel deutlich kälter, als nach den regionalen geothermischen Gradienten zu erwarten wäre, und unterscheiden sich auch namhaft in anderen Wasserinhaltsstoffen. Grundwässer, welche dem Gotthard-Strassentunnel und dem Furka-Basistunnel ausserhalb der hochpermeablen Störzonen und untiefen Portalbereiche zufließen, haben typischerweise ein Alter von 2 bis 15 Jahren und werden primär im Sommerhalbjahr durch infiltrierende Schnee-Schmelzwässer gebildet.

Verformung des Gebirges

Untertagebauwerke in kristallinen Gesteinen wie dem Aar- und Gotthard-Massiv verändern die Strömungsraten und Strömungsrichtungen des Grundwassers über viele Kilometer. Dies zeigen sowohl numerische Modellrechnungen wie direkte Beobachtungen an der Geländeoberfläche. So fielen vor 30 Jahren während des Baus des Obergesteln-Stollens im Oberwallis (Abbildung 1) aufgrund einer starken Absenkung des Bergwasserspiegels zahlreiche wichtige Quellen der Wasserversorgung des Dorfes Obergesteln trocken. Sorgfältige Beobachtungen und Aufzeichnungen des Projektgeologen während des Baus erlauben es heute nicht nur, die räumlichen, sondern auch zeitlichen Beziehungen in diesem Prozess genauer zu untersuchen. So reagierten Quellen auf den Tunnelvortrieb nach kurzer Zeit auch in grossen Distanzen (bis zu 1,5 Kilometer) in Richtung quer zur Tunnelvortriebsachse, jedoch nie in Richtung des Vortriebs. Dies lässt Rückschlüsse auf eine starke Anisotropie der Gebirgsdurchlässigkeit zu und ermöglicht die Ermittlung gross-

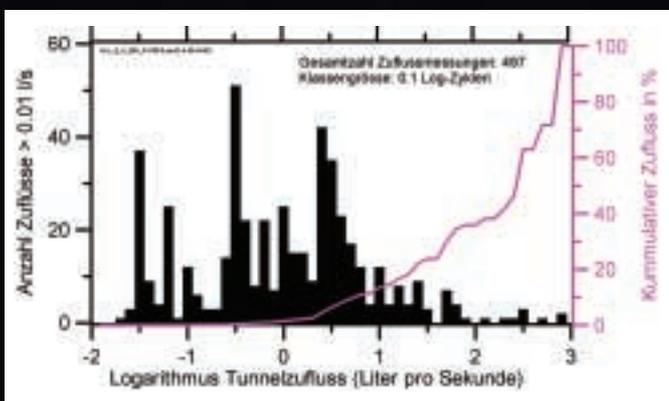


Abb. 3: Histogramm und Summenkurve der Verteilung von anfänglichen Grundwasserzuflüssen zu bestehenden Untertagebauwerken im weiteren Gotthard-Gebiet (Abbildung 1). Dargestellt ist der Logarithmus der anfänglichen Zuflüsse in l/s.

räumiger hydraulischer Gebirgsparameter zum transienten Grundwasserfluss in geklüfteten kristallinen Gesteinen. Solche Erkenntnisse können mit herkömmlichen Methoden nicht erarbeitet werden und sind für viele praktische Probleme (Endlagerung radioaktiver Abfälle, geothermische Energie, Tunnelbau, Wasserkraftanlagen), welche sich im Grössenbereich von Hunderten bis Tausenden von Metern abspielen, von sehr hohem Nutzen.

Reduktionen der Porenwasserdrucke und der Höhenlage des Wasserspiegels führen zu einer Verformung des Gebirges. Dies war bisher aus weichen Lockergesteinen bekannt, aber kaum aus harten Gneisen und Graniten. Wie im Artikel von Ingensand, Löw und Zangerl (Seite 18–21) gezeigt wird, haben die grössten Zuflüsse zum Gotthard-Strassentunnel einen über 10 Kilometer in Nord-Süd-Richtung ausgedehnten Setzungstrichter verursacht, mit einem maximalen Setzungsbetrag von 12 Zentimetern. Differenzielle Verformungen im Bereich solcher Setzungsmulden können zu Schäden an sensiblen Bauwerken wie Bogenstaumauern führen.

Forschungsinformationen

Tunnelbauwerke wie die Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg stellen die Geologen und Ingenieure nicht nur vor grosse Herausforderungen, sondern ermöglichen im Idealfall auch die Erarbeitung neuer Grundlagenkenntnisse. Dies ist auch ein wichtiges Thema der im September 2005 stattfindenden und von der Professur für Ingenieurgeologie organisierten internationalen Tagung «Geologie AlpTransit 2005» (www.geato5.ethz.ch).

Kontakt: Prof. Dr. Simon Löw
Tel. 01 633 32 31
Fax 01 633 11 08
E-Mail: loew@erdw.ethz.ch

Forschungsschwerpunkte

Forschungsschwerpunkt der Professur für Ingenieurgeologie sind hydromechanische Eigenschaften und Prozesse in geklüfteten Gesteinen. Neue Erkenntnisse über diese Eigenschaften und Prozesse werden erarbeitet im Zusammenhang mit tiefen Untertagebauwerken, der Endlagerung radioaktiver Abfälle, der Nutzung tiefer geothermischer Energie, der Bewältigung von Naturgefahren (Bergstürze, Rutschungen) und der Grundwasserbewirtschaftung. Viele Projekte der Professur für Ingenieurgeologie sind interdisziplinär und werden in Zusammenarbeit mit Geophysikern und Ingenieuren ausgeführt.

Prof. Simon Löw

Institut für Geologie der ETH Zürich

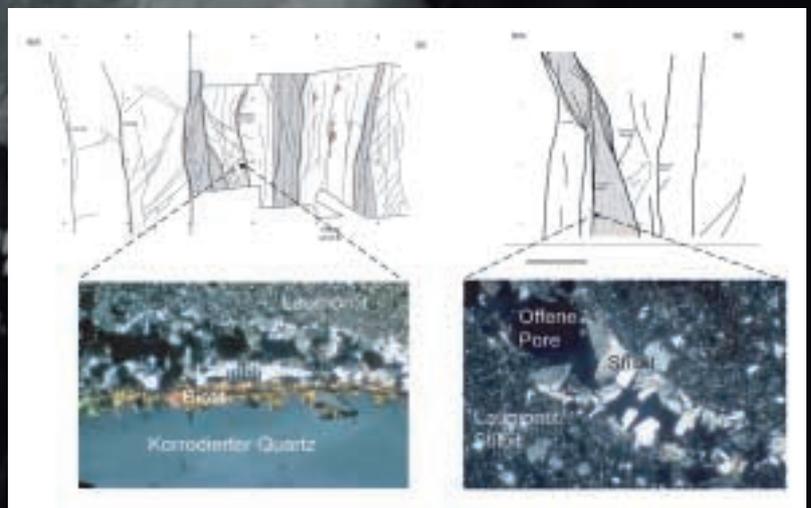


Abb. 4: Struktur und Mineralogie von Störzonen im Gotthard-Massiv. Die Strukturen (oben) wurden im Bedretto-Fenster des Furka-Basistunnels kartiert und weisen eine Breite von 5–6 Meter auf (Balkenbreite 1 m). Die Mineralogie (unten) entstammt Dünnschliffbildern mit einer Kantenlänge von 3 Millimetern (aus: Dissertation V. Lützenkirchen, ETH 2003).

DAS GEHEIMNIS DES ERDINNEREN

WILLIAM LOWRIE

Das Erdmagnetfeld sieht wie ein Dipolfeld aus: Seine Achse fällt im Wesentlichen mit der Rotationsachse der Erde zusammen. Dieses Phänomen erlaubt es, wichtige geologische Informationen aus den Magnetisierungen von Gesteinen zu erhalten. Wie sieht es im Erdinneren aus? Wo lagen frühere Kontinente? Einem Geheimnis auf der Spur.

Die Geometrie eines magnetischen Feldes wird von Feldlinien dargestellt, welche die Feldrichtungen im Raum um den Magneten herum beschreiben. Ausserhalb der Erde ist das Erdmagnetfeld zum grössten Teil ein so genanntes Dipolfeld, dessen Feldlinien an zwei «Polen» zusammen kommen, wovon der eine im Norden Kanadas und der andere in der Antarktis liegen (siehe Abb. 1). Die Achse des erdmagnetischen Dipols weist eine Neigung von 11,5 Grad zur Rotationsachse auf. Carl Friedrich Gauss hat bereits vor rund 160 Jahren bewiesen, dass das geomagnetische Dipolfeld im Erdinneren entsteht. Moderne Erkenntnisse, die zum Teil aus Satellitenbeobachtungen des Erdmagnetfeldes stammen, bestätigen das Ergebnis von Gauss und lassen Rückschlüsse über den Ursprung des Feldes zu.

Wie entsteht das Erdmagnetfeld?

Der Entstehungsprozess des Erdmagnetfeldes ist sehr komplex. Wegen der extrem hohen Temperatur im flüssigen äusseren Kern entstehen dort Konvektionsströme, welche das heisse Material von innen nach aussen transportieren, während gleichzeitig der Kern mit – im Vergleich zum Erdmantel – leicht erhöhter Rotationsgeschwindigkeit um die Drehachse rotiert. Das Eisen im Kern ist ein sehr guter elektrischer Leiter, in dem elektrische Ströme fliessen. Infolge der Ströme wird ein ringförmiges «toroidales

Feld» erzeugt, dessen Stärke einige hundert Male grösser ist als die Intensität des Erdmagnetfeldes an der Erdoberfläche. Das toroidale Feld kann aber nicht aus dem Kern entweichen und ist daher nicht direkt messbar. Auch ein «poloidales Feld» wird erzeugt, dessen Feldlinien ausserhalb der Erde vorwiegend einem Dipolfeld entsprechen. Obwohl das Erdmagnetfeld komplizierter ist als ein einfaches Dipolfeld und so genannte Quadrupol- und Oktupolkomponenten sowie Komponenten noch höherer Ordnung enthält, wird es langfristig von der Dipolkomponente dominiert. Gemittelt über einige Tausend Jahre verschwindet sogar die Neigung der Dipolachse gegenüber der Drehachse, sodass das Erdmagnetfeld wie ein Dipolfeld aussieht, dessen Achse mit der Rotationsachse der Erde zusammenfällt. Dieses Phänomen erlaubt es, wichtige geologische Informationen aus den Magnetisierungen von Gesteinen zu erhalten.

Wie ist das Erdinnere aufgebaut?

Der schalenartige Aufbau des Erdinneren besteht aus drei Hauptbereichen. Die spröde Erdkruste mit einer Mächtigkeit von 5 bis 50 km umgibt den plastischen Erdmantel, der in eine Tiefe von zirka 2890 km reicht. Darunter liegt der Erdkern, der im Wesentlichen aus Eisen besteht. Bis zu einer Tiefe von zirka 5155 km ist der äussere Kern auf-

grund der hohen herrschenden Temperaturen flüssig. Der immense Druck im Kern führt mit zunehmender Tiefe, trotz ebenfalls weiter zunehmender Temperatur, zur Verfestigung des Eisens. Daher ist der innere Kern bis zum Erdmittelpunkt bei einer Tiefe von ungefähr 6370 km wieder fest.

Paläomagnetismus

Die meisten Mineralien in Gesteinen sind nur schwach magnetisch. Einige wenige, so genannte ferrimagnetische Mineralien, wovon die wichtigsten die Eisenoxide Magnetit und Hämatit sind, sind relativ stark magnetisch und besitzen eine wichtige Fähigkeit: Sie können einen Teil der Magnetisierung, auch nach dem Ausschalten des Magnetfeldes, bewahren. Die Restmagnetisierung wird als «remanente Magnetisierung» bezeichnet. Sie kann sehr stabil sein und über sehr lange geologische Zeitintervalle unverändert bleiben. So erhielten Gesteine im bei der Gesteinsbildung herrschenden Erdmagnetfeld eine remanente Magnetisierung, die Millionen von Jahren später im Forschungslabor gemessen werden kann. Diese Eigenschaft erlaubt es, geologische und tektonische Interpretationen zu machen und die relativen Bewegungen der grossen tektonischen Platten zu rekonstruieren.

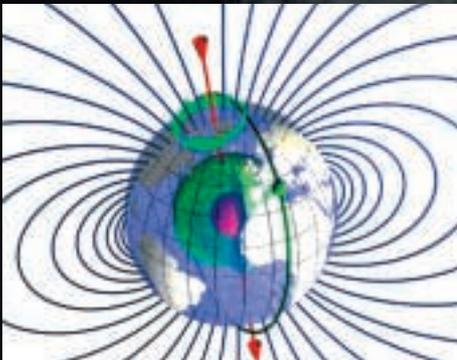


Abb. 1: Schematische Darstellung der Feldlinien des Erdmagnetfeldes, der Dipolachse sowie des inneren Aufbaus der Erde, bestehend aus dem Erdmantel, dem äusseren und dem inneren Erdkern.

Wo lagen frühere Kontinente?

Aus den Magnetisierungsrichtungen von Gesteinen kann berechnet werden, wo der geomagnetische Pol während der Gesteinsbildung lag. Studiert man die paläomagnetischen Pollagen von Gesteinen verschiedenen Alters und aus dem gleichen Kontinent, so stellt man fest, dass scheinbar der Pol, und somit auch die Erdrotationsachse, während der geologischen Zeitepochen einer charakteristischen Kurve entlang gewandert ist. Die so genannte «Polwanderungskurve» Europas unterscheidet sich deutlich von derjenigen Nordamerikas. Da die Erde aber nur eine einzige Rotationsachse besitzt, ist es unmöglich, dass diese sich gleichzeitig entlang von zwei Kurven bewegen konnte. Die Polwanderungskurven belegen somit nicht die Bewegungen des Pols, sondern die relative Bewegung der europäischen und amerikanischen Platten bzw. Kontinente. Die Polwanderungskurven sind daher als Evidenz für frühere Plattenbewegungen zu verstehen. Aus paläomagnetischen Daten dieser Art können die früheren Positionen der Kontinente rekonstruiert werden. Ein mögliches Modell der Positionen und der relativen Bewegungen der Kontinente in den zurückliegenden 250 Millionen Jahren (Ma) wird in Abbildung 2 gezeigt.

Superkontinent «Pangäa»

Im späten Karbon bildeten alle heute bekannten Kontinente einen einzigen Superkontinent namens «Pangäa». Dieser Superkontinent existierte im späten Karbon und im frühen Perm (vor etwa 320–260 Ma) in der Konfiguration «Pangäa B». Danach haben interne Verschiebungen stattgefunden. Eine neue Konfiguration, genannt «Pangäa A2», existierte im späten Perm und in der frühen Trias (vor etwa 250–230 Ma). Noch später fand eine weitere Neuorganisation der Platten statt, und die Konfiguration «Pangäa A1» entstand in der späten Trias und im frühen Jura (vor etwa 230–180 Ma). Seit dem frühen Jura hat sich Pangäa aufgespalten, und die damit verbundenen plattentektonischen Bewegungen haben zur Bildung der modernen Ozeane geführt.

Nord gleich Süd

Es passiert in unregelmässigen Zeitabständen, dass die magnetischen Nord- und Südpole ihre Lagen austauschen und so die Polarität des Erdmagnetfeldes wechselt. Der Vorgang, der zu dieser «Polaritätsumkehrung» führt, dauert etwa 4000–6000 Jahre. Zwischen den Umkehrungen, die in zeitlichen Abständen von etwa 10 000 bis einige Millionen Jahren stattfinden, besitzt das Feld eine konstante normale (heutige) bzw. umgekehrte Polarität.

Die Polaritätsabfolge des Erdmagnetfeldes spiegelt sich auch in den Magnetisierungs-

gen von Gesteinen wider. So werden bei der Ablagerung von Sedimenten winzige Teilchen von Magnetit, die von der Erosion der Kontinente stammen, im herrschenden Magnetfeld orientiert. Auch Ergussgesteine registrieren die Polaritätsabfolge. Bei der Abkühlung von Laven, zum Beispiel bei der Bildung neuer Lithosphäre an konstruktiven Plattenrändern, wird eine so genannte thermisch-remanente Magnetisierung erworben. Normal magnetisierte basaltische Laven verstärken das aktuelle Feld, umgekehrt magnetisierte Laven schwächen es ab. Es entstehen so an den ozeanischen Rücken streifenartige magnetische Anomalien, die als eine Abfolge von geomagnetischen Polaritätsintervallen interpretiert werden können.

Abbildung 3 zeigt die magnetischen Anomalien entlang von magnetischen Messprofilen in drei Ozeanen und die daraus hergeleitete Polaritätsgeschichte des Erdmagnetfeldes. Die Profile sind Hunderte von Kilometern lang. Bei der Ablagerung von gleichaltrigen Sedimenten, wie z.B. den pelagischen Kalksteinen im nördlichen Apennin Italiens, ist auch eine remanente Magnetisierung erworben worden. Paläomagnetische Analysen der Polaritätsabfolge in dieser 250 Meter mächtigen Kalksequenz ergeben eine Magnetostratigraphie, welche von einer identischen Polaritätsabfolge wie in den entsprechenden ozeanischen Profilen gekennzeichnet ist. Anhand des Fossilieninhaltes der Sedimente konnte das Alter des Kalksteins bestimmt und der späten Kreide (vor 90–65 Ma) zugeordnet werden. Diese Korrelation



Abb. 2: Modelle des Superkontinents Pangäa. (a) Modell A1 von der späten Trias (LT) bis zum frühen Jura (EJ); (b) Modell A2 vom späten Perm (LP) bis zur frühen Trias (ET); (c) Modell B vom späten Karbon (LC) bis zum frühen Perm (EP) [Irving, 2004].

erlaubt somit die Datierung der ozeanischen Kruste unter den magnetischen Anomalien in den drei Ozeanen. In dieser Weise haben Geophysiker und Geologen die Geschichte der Polarität des Erdmagnetfeldes in den letzten 180 Ma detailliert aufgeschlüsselt und datiert. Sie dient als magnetische Zeitskala für Datierungs- und Korrelationszwecke.

Magnetit im menschlichen Gehirngewebe

Als Folge der Erosion auf den Kontinenten werden kleine Teilchen von Gesteinen und Böden in die Seen und Ozeane verfrachtet und dort abgelagert. Der Mineralinhalt der so gebildeten Sedimente enthält einen kleinen Anteil an feinkörnigen ferrimagnetischen Mineralien, hauptsächlich Magnetit. Auch die Winde transportieren kleine Staubpartikel und lagern sie weit von ihrem Herkunftsort entfernt als so genannte Löss-Sedimente wieder ab. Die Prozesse der Erosion und Ablagerung sind abhängig von den herrschenden klimatischen Verhältnissen. Daher dienen Sedimente als gute Klimaarchive der geologischen Vergangenheit. Die magnetischen Eigenschaften der Sedimente können wichtige Beiträge zum Verständnis des Paläoklimas liefern. Aus einer Analyse der Variation von magnetischen Parametern in Sedimentkernen aus schweizerischen Seen ist es beispielsweise möglich, den Übergang zu wärmeren Temperaturen nach der letzten Eiszeit aufgrund der entsprechenden Auswirkungen auf die

Korngrösse des Magnetitgehalts der See-Sedimente zu interpretieren.

Als Beispiel der magnetischen Erforschung von paläoklimatischen Verhältnissen dient eine Untersuchung in den mächtigen Ablagerungen von Löss-Sedimenten in China (Abb. 4). Diese Sedimente werden in kalten, trockenen Zeiten abgelagert und enthalten keine Fossilien, die eine präzise Datierung ermöglichen würden. Die Magnetisierungsrichtungen in einem stratigraphischen Aufschluss weisen eine Polaritätsabfolge auf, die mit der magnetischen Zeitskala korreliert werden kann. Der Vergleich zeigt, dass die ältesten Lössproben fast zwei Millionen Jahre alt sind, was wesentlich älter ist, als man vorher angenommen hatte. Die Konzentration von ferrimagnetischen Teilchen kann anhand der magnetischen Suszeptibilität bestimmt werden. Spitzenwerte korrelieren mit Bodenschichten, die während wärmerer Zeitintervalle gebildet wurden. Daher weisen die Variationen des magnetischen Signals auf paläoklimatische Änderungen in China während der zurückliegenden zwei Millionen Jahre hin.

Ein interessantes junges Forschungsgebiet ist der Biomagnetismus. Kleine Teilchen von Magnetit sind in den Zellen von Säugtieren und Vögeln gefunden worden. Auch im menschlichen Gehirngewebe ist experimentell erwiesen worden, dass winzige Teilchen von Magnetit vorhanden sind. Welche Funktion diese magnetischen Teilchen haben, ist noch grösstenteils unbekannt und wird gegenwärtig erforscht.

Literatur

Irving, E., 2004. The case for Pangea B, its origin and development. In: Time-scales of the Paleomagnetic Field, American Geophysical Union Monograph, Editors: J.E.T. Channell, D.V. Kent, W. Lowrie, and J.G. Meert, in press.
 Heller, F. & Evans, M.E., 1995. Loess magnetism. Rev. Geophys., 33, 210–240.
 Lowrie, W., & Alvarez, W., 1977. Late Cretaceous geomagnetic polarity sequence: detailed rock- and palaeomagnetic studies of the Scaglia Rossa limestone at Gubbio, Italy. Geophys. J. R. astr. Soc., 51, 561–581.

Forschungsinformationen

Anhand der magnetischen Eigenschaften von Gesteinen werden die tektonische Deformation der Erdkruste und die früheren Bewegungen der Kontinente erforscht. Polaritätsumkehrungen des Erdmagnetfeldes dienen als magnetische Zeitskala für Datierungs- und Korrelationszwecke. Die Magnetisierungen von Böden und See-Sedimenten lassen Rückschlüsse auf klimatische und umweltrelevante Verhältnisse in der geologischen Vergangenheit zu.

Prof. William Lowrie
 Institut für Geophysik
 ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

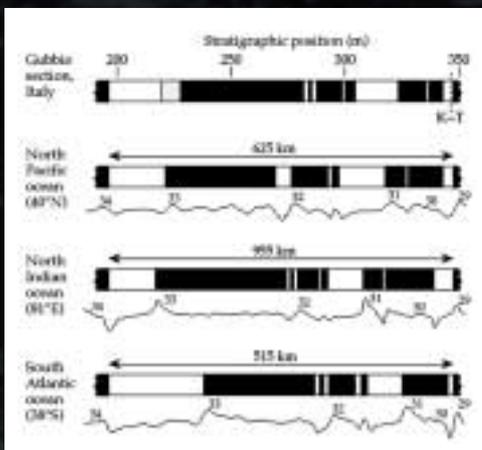


Abb. 3: Geschichte der Polarität des Erdmagnetfeldes in der späten Kreidezeit vor 90–65 Ma. Intervalle normaler (umgekehrter) Polarität sind schwarz (weiss) gefärbt. Die Polaritätsabfolge in einer Kalksequenz bei Gubbio im nördlichen Appenin (oben) wird mit der aus drei ozeanischen magnetischen Profilen interpretierten Polaritätsgeschichte korreliert (Lowrie & Alvarez, 1977).

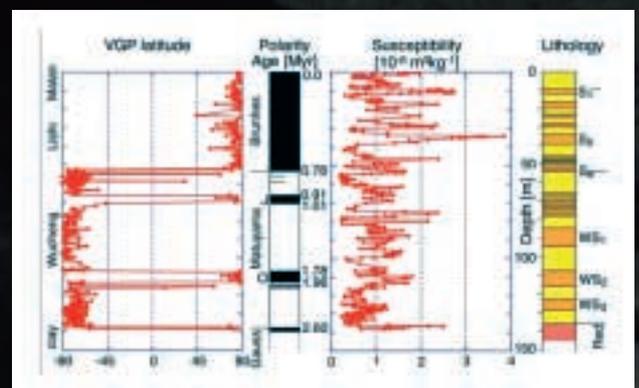


Abb. 4: Schwankungen der magnetischen Polarität in einem Bohrkern in Löss-Sedimenten von Luochuan, China, korrelieren mit der magnetischen Zeitskala und erlauben somit die Datierung der Sedimente. Die Suszeptibilitätsänderungen entstehen infolge paläoklimatischer Schwankungen (mit Dank an F. Heller, nach Heller & Evans, 1995).

MEHR ALS NUR RIESENPIILZE?

JOSEF ZEYER, MARTIN SCHROTH, JUTTA KLEIKEMPER UND HELMUT BÜRGMANN

Als Jules Verne vor rund 150 Jahren Professor Otto Lidenbrock auf die Reise zum Mittelpunkt der Erde aussandte, konnten auf der abenteuerlichen Fahrt an den Gestaden der unterirdischen Meere Riesenpilze und Dinosaurier beobachtet werden. Seit dieser Reise, und vor allem in den letzten 10 bis 20 Jahren, hat sich aber viel verändert. Die Nachweismethoden haben sich markant verfeinert: Mit Hilfe von molekularbiologischen, biogeochemischen und spektroskopischen Methoden kann man heute die biologischen Strukturen und Funktionen im Untergrund sehr genau erkunden. Was würden wir auf einer heutigen Reise sehen?

Bis vor wenigen Jahrzehnten war die Mikrobiologie weitgehend eine Domäne der Mediziner, Biochemiker und Gärungswissenschaftler. Die Mikroorganismen unter der Erdoberfläche waren für die Naturwissenschaftler kaum ein Thema, und die verfügbaren Nachweismethoden erlaubten ohnehin keine zuverlässigen Aussagen über das Leben im Untergrund. Das Interesse umfasste allenfalls ein paar ausgewählte Organismengruppen im Oberboden, die für die Landwirtschaft und die Forstwirtschaft von unmittelbarem Nutzen waren – allen voran die Stickstofffixierer und die Mykorrhizen. Schauen wir uns an, was wir auf einer heutigen Reise von der Erdoberfläche in die Tiefe zu sehen bekommen. Wir können in diesem Artikel aus Platzgründen keinen umfassenden Reisebericht abliefern und beschränken uns auf ein paar ausgewählte Stationen wie Pionierflächen, Rhizosphäre, Unterboden, Grundwasser und *Deep Sub-surface*.

Bodenbildung und Pionierflächen

Der Oberboden (A-Horizont) einer landwirtschaftlich genutzten Fläche wie Ackerland oder Wiese ist rund 10–30 cm mächtig. Ein Kilogramm Boden enthält nebst einer reichhaltigen Fauna (Würmer, Milben, Tausendfüssler, Käfer usw.) rund 3 g Bakterien und Pilze. Diese fruchtbaren Habitats voller Leben sind im Verlaufe der Bodenbildung über Jahrtausende aus einer anorganischen Umwelt aus Silikaten und Karbonaten entstanden. Unzählige physikalische, chemische und biologische Verwitterungsprozesse spielen bei der Bodenbildung eine Rolle. Insbesondere die biologischen Pro-

zesse in den frühen Phasen der Bodenbildung sind schlecht beschrieben, und viele Fragen sind offen. Wie können sich Mikroorganismen den Nährstoff Phosphor aus dem Gestein (zum Beispiel Apatit) bioverfügbar machen, das heisst, wird Phosphor durch rein chemische Prozesse verfügbar gemacht oder ist der Auflöseprozess mikrobiell katalysiert? Ist Stickstoff zu Beginn tatsächlich ein limitierender Faktor oder wird Stickstoff erst relevant, wenn die Populationsdichten grösser werden?

Viele dieser Fragen lassen sich heute auf Pionierflächen untersuchen. Beispielsweise wurden in der Region des Mount St. Helens nach dem Ausbruch von 1980 umfassende Studien zur Bodenbildung lanciert. In unserer Arbeitsgruppe studieren wir die bodenbildenden Prozesse im Vorfeld des Dammagletschers, der sich in den letzten 100 Jahren um 500 m zurückgezogen hat. Im Prinzip kann eine Achse entlang des Vorfeldes als Chronosequenz betrachtet werden. Das zu Beginn aus Sand und Steinen bestehende Vorfeld wird von Bakterien, Pilzen und Pflanzen zunehmend dichter besiedelt. Mit enzymatischen, molekularen (zum Beispiel: Gensonden, PCR-Amplifikationen, Denaturing Gradient Gel Electrophoresis [DGGE]) und geochemischen Methoden können die «Pioniere» und die von ihnen katalysierten Prozesse detailliert erfasst werden (Abbildung 1).

Rhizosphäre als Hotspot der mikrobiellen Aktivität

Der Bereich der Pflanzenwurzeln, die so genannte Rhizosphäre, bildet für das mikrobielle Leben im Untergrund einen eigentli-

chen Hotspot. Die in den Pflanzenblättern photosynthetisch gebildeten Assimilate werden von der Pflanze nur zum Teil für das eigene Wachstum und die Atmung verwertet. Rund 10–30% der Assimilate werden in die Wurzeln transportiert und dort als so genannte Exsudate in den Boden ausgeschieden, wo sie das mikrobielle Leben markant stimulieren. In der Rhizosphäre findet man rund zwei bis drei Zehnerpotenzen mehr Mikroorganismen als im umgebenden Boden. Viele Mikroorganismen gehen mit der Pflanze Symbiosen ein. Seit langem bekannt sind die Mykorrhizen («Wurzelpilze», deren Myzel eine Brücke zwischen Pflanzenwurzel und Boden bildet. Das Myzel kann in den engsten Porenräumen des Bodens Wasser und Nährstoffe erschliessen und der Pflanze zuführen – und zur Freude der Feinschmecker bilden die Mykorrhizen hin und wieder auf der Bodenoberfläche Fruchtkörper, die dann als Morcheln, Steinpilze und Eierschwämme auf den Markt kommen. Für die Pflanzenproduktion von grossem Interesse sind auch die Stickstoff fixierenden Symbionten (insbesondere *Rhizobien* und *Frankia*), die N_2 aus der Atmosphäre zu pflanzenverfügbarem NH_3 reduzieren. Pro Jahr fixieren diese Symbionten bis 200 kg N pro ha, was natürlich für das Pflanzenwachstum nicht unerheblich ist. Mit hochauflösenden molekularbiologischen Methoden (zum Beispiel: DGGE, *Terminal restriction fragment length polymorphism [T-RFLP]*) gelingt es, die Populationsstrukturen dieser Organismen im Boden detailliert zu erfassen und auch die Expression der funktionellen Gene (beispielsweise durch Extraktion der *nifH*-spezifischen mRNA) zu verfolgen. Diese Studien wiederum erlauben, im Hinblick



Abb. 1: Im Vorfeld des Damma-Gletschers überlagern sich die Effekte von mikrobieller Sukzession und der Einfluss der Rhizosphäre von alpinen Pionierpflanzen. Mit Hilfe von PCR und Denaturing Gradient Gel Electrophoresis können die Veränderungen in der Populationsstruktur der Bodenbakterien sichtbar gemacht werden.

auf eine nachhaltige Landwirtschaft die biologische Stickstofffixierung gezielt zu stimulieren und damit die Zugabe von Mineraldüngern zu reduzieren.

Unterboden als biologischer Filter

Reisen wir vom Oberboden und der Rhizosphäre weiter in die Tiefe, gelangen wir in den Unterboden beziehungsweise in die so genannte ungesättigte Zone (1–3 m mächtig). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Dichte der Mikroorganismen ab, weil die Nährstoffquellen (insbesondere Zufuhr von reduzierten C-Verbindungen) langsam versiegen. Mengenmässig weniger Mikroorganismen heisst aber noch lange nicht, dass ihre Funktion weniger bedeutungsvoll ist. Die Mikroorganismen in den tieferen Horizonten tragen beispielsweise entscheidend dazu bei, dass infiltrierende Pestizide aus der Landwirtschaft mineralisiert werden und nicht ins Grundwasser gelangen. Andererseits können Mikroorganismen aber auch dafür sorgen, dass Methan (CH_4) aus dem Untergrund oxidiert wird und nicht in die Atmosphäre gelangt. Zur Illustration dieser Aktivität machen wir auf unserer Reise in die Tiefe einen kurzen Marschhalt. CH_4 wird im Untergrund von den so genannten methanogenen Mikroorganismen unter strikt anaeroben Bedingungen gebildet. Beispielsweise produzieren Reisfelder, Hochmoore oder kontaminierte Grundwasserleiter CH_4 (Abbildung 2A). Bilanzstudien zeigen aber, dass nur ein geringer Teil des in der Tiefe produzierten CH_4 in die Atmosphäre gelangt. Der grösste Teil wird von den so genannten methanotrophen Mikroorganismen oxidiert. Diese Mikroorganismen entfalten ihre Aktivität im Tiefenbereich, wo das aufsteigende CH_4 auf Sauer-

stoff (O_2) trifft (Abbildung 2B). In einem Forschungsprojekt entwickeln wir Verfahren, die direkt (*in situ*) die Quantifizierung der Methanoxidation erlauben. Diese Verfahren beruhen darauf, die Reaktionspartner CH_4 und O_2 simultan mit den nicht reaktiven Edelgasen Neon und Argon in den Untergrund zu injizieren. Nach einer genau definierten Inkubationszeit werden im zurückgepumpten Gas die relativen Anteile analytisch bestimmt. Aus diesen Daten wiederum lässt sich mit speziellen mathematischen Verfahren die Umsatzkinetik berechnen.

Grundwasser ist nicht steril

In vielen Gebieten der Schweiz treffen wir in einer Tiefe von 3–10 m auf bis zu 100 m mächtige Grundwasserleiter. Bis vor wenigen Jahrzehnten glaubte man, dass Grundwasser weitgehend steril sei. Zur Kontrolle wurde jeweils Grundwasser an die Erdoberfläche gepumpt, und Proben wurden auf Petrischalen mit nährstoffreichen Medien ausgestrichen, die zur Erfassung von koliformen Keimen in Oberflächengewässern verwendet wurden. In der Regel wuchsen auf diesen Petrischalen keine Mikroorganismen, und man folgerte beruhigt, dass Grundwasser steril sei und ohne Bedenken konsumiert werden könne. Im Verlaufe der Jahre konnte dann mit Hilfe von verfeinerten Methoden gezeigt werden, dass die Mikroorganismen, im Grundwasser zum einen vorwiegend in sesshaften Biofilmen leben und damit nur zum Teil an die Oberfläche gepumpt werden können. Zum anderen wurde erkannt, dass diese Mikroorganismen an oligotrophe (nährstoffarme) Bedingungen angepasst sind und auf nährstoffreichen Medien häufig gar nicht wach-

sen können. Heute weiss man, dass sich in einem oligotrophen Grundwasser bis zu 10^4 Bakterien pro ml befinden. Diese sind allerdings für den Menschen unbedenklich.

Schadstoffe abbauen

Viele Mikroorganismen im Grundwasser können Schadstoffe wie Heizöl, Dieselöl und Lösungsmittel als Nährstoffquellen nutzen und zu harmlosen Endprodukten abbauen. Diese mikrobielle Aktivität ist für die Grundwasserqualität von entscheidender Bedeutung. In einem Forschungsprojekt versuchen wir, die am Abbau beteiligten Populationen mit molekularbiologischen Nachweisprotokollen zu charakterisieren und ihre Aktivität mit isotopengeochemischen Methoden zu quantifizieren. Ein Beispiel aus dieser Studie ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Oxidation von Heizöl (formal mit $\text{CH}_{1,85}$ beschrieben) ist häufig mit der Reduktion von Sulfat (SO_4^{2-}) gekoppelt, wobei das leichte Isotop (^{32}S) schneller umgesetzt wird als das schwere Isotop (^{34}S). Diese so genannte Fraktionierung führt entlang der Grundwasserflussrichtung zu einer relativen Zunahme von $^{34}\text{SO}_4^{2-}$ (Abbildung 3B). In der unkontaminierten Zone weiter stromabwärts (im vorliegenden Fall >60 m) wird wiederum pristines Grundwasser zugemischt. Das Ausmass der Fraktionierung lässt sich mit dem so genannten ϵ -Wert ausdrücken (Abbildung 3C). Im Feld können die ϵ -Werte dazu dienen, die mikrobiellen von den geochemischen Prozessen zu unterscheiden.

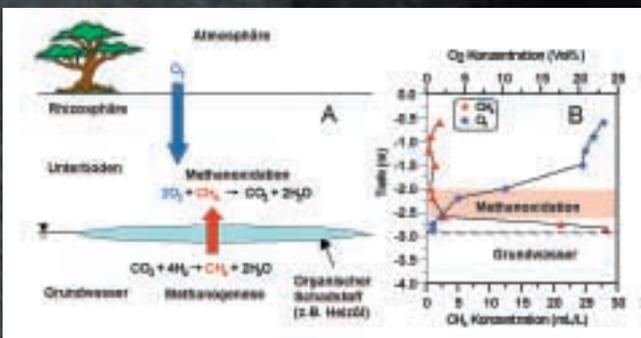


Abb. 2: Methan (CH_4) entsteht unter strikt anaeroben Bedingungen durch den mikrobiellen Prozess der Methanogenese (A). Im Unterboden treffen CH_4 und atmosphärischer Sauerstoff (O_2) zusammen und schaffen günstige Bedingungen für methanotrophe Mikroorganismen, die CH_4 und O_2 zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) umwandeln. Im gemessenen Bodenprofil von CH_4 und O_2 ist die methanotrophe Zone deutlich erkennbar (rot schraffiert in B).

Schlüssel zum Weltall?

Erst seit wenigen Jahren verfügen die Mikrobiologen über Methoden, zuverlässig Bohrungen abzuteufen, um das mikrobielle Leben in mehreren Kilometern Tiefe zu erkunden. Eine der grössten Herausforderungen besteht darin, zu beweisen, dass die in den Bohrkernen gefundenen Organismen endogen sind und nicht mit dem Bohrkopf von der Erdoberfläche nach unten verschleppt wurden. Es kann heute als gesichert gelten, dass selbst in Tiefen von über 3 Kilometern bei hohem Druck, bei schlechter Wasserverfügbarkeit und bei Temperaturen von weit über 100 °C hin und wieder eine grosse Diversität von Mikroorganismen zu beobachten ist. Es gibt sogar Spekulationen, dass die Evolution in der tiefen Biosphäre begonnen haben könnte. Forschungsarbeiten in diesen Tiefen laufen heute unter dem Schlagwort *Deep Subsurface Microbiology*.

Woher kommen sie, wovon leben sie?

Es drängt sich natürlich die Frage auf, woher diese Mikroorganismen kommen und wovon sie leben. Sicherlich können alte Sedimente mit organischen Anteilen als Energiequelle dienen. Daneben sind aber auch sehr viele andere Energiequellen denkbar. In südafrikanischen Goldminen ergaben sich beispielsweise Hinweise, dass natürliche radiolytische Prozesse Spuren von Wasserstoff freisetzen können, der dann wiederum den Organismen als Energiequelle dienen kann. Es ist nahe liegend, dass die *Deep Subsurface Microbiology* zusammen mit den aufregenden neuen Forschungsergebnissen aus der *Deep Sea Microbiology* (Stichwort *Hydrothermal Vents*) die Phanta-

sie der Astrobiologen beflügelt. Im Hinblick auf das mögliche Vorkommen von Mikroorganismen wird intensiv nach Analogien zwischen diesen extremen terrestrischen Habitaten und dem Mars sowie gewissen Monden des Jupiters (vor allem Europa und Io) und des Saturns (vor allem Titan) gesucht.

Damit ist der Bogen von der *Deep Subsurface* zum Weltall geschlagen, und wir können nach unserer Reise in die Tiefe langsam wieder auftauchen. Noch weiter abzutau- chen hätte sich für einen Mikrobiologen wohl auch kaum gelohnt, denn irgendwo kommt die Tiefe, in der seine Wissenschaft definitiv nicht mehr gefragt ist und wo er das Zepter den Geologen übergeben muss.

Forschungsinformationen

Die Forschungsaktivitäten im Fachbereich Bodenbiologie konzentrieren sich auf die qualitative und quantitative Erfassung von mikrobiologischen Prozessen in Böden und in Grundwasserleitern. Im Weiteren werden mikrobiologische Interaktionen sowie Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse untersucht. Bei diesen Studien werden vor allem molekularbiologische (DNA- und RNA-basierend) und biogeochemische Methoden (insbesondere stabile Isotope) eingesetzt. Kontakt: zeyer@env.ethz.ch und <http://www.ito.umnw.ethz.ch/SoilBio/>

Literatur

Sigler W.V., Zeyer J., 2002: Microbial Diversity and activity along the forefields of two receding glaciers. *Microb. Ecol.* 43, 397–407.

Bürgmann H., Widmer F., Sigler W.V., Zeyer J., 2003: mRNA extraction and reverse transcription-PCR protocol for detection of *nifH* gene expression by *Azotobacter vine-landii* in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 1928–1935.

Kleikemper J., Schroth M.H., Sigler W.V., Schmucki M., Bernasconi S.M., Zeyer J., 2002: Activity and diversity of sulfate-reducing bacteria in a petroleum hydrocarbon-contaminated aquifer. *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 1516–1523.

Prof. Josef Zeyer

Professur für Bodenbiologie
Fachbereich Bodenbiologie
Institut für Terrestrische Ökologie
Departement Umweltwissenschaften
ETH Zürich

Martin Schroth

Oberassistent im Fachbereich
Bodenbiologie

Jutta Kleikemper

Postdoktorandin im Fachbereich
Bodenbiologie

Helmut Bürgmann

Postdoktorand im Fachbereich
Bodenbiologie

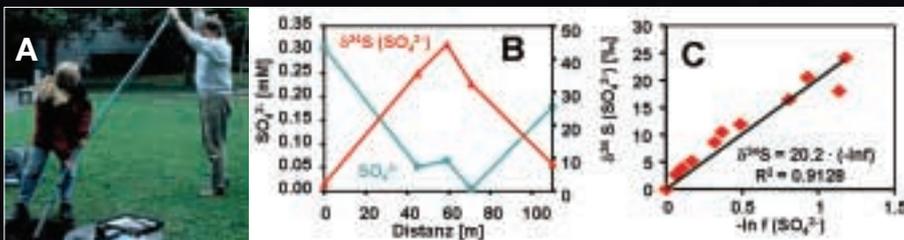


Abb. 3: In einem heizölverschmutzten Grundwasserleiter werden Proben entnommen (Abb. 3A) und analysiert. Der Abbau von Heizöl ist gekoppelt mit einer Zehrung von Sulfat (SO_4^{2-}) und einer Erhöhung des $\delta^{34}\text{S}$ -Wertes im SO_4^{2-} (Abb. 3B). In der unkontaminierten Zone weiter stromabwärts steigt die Sulfatkonzentration wieder an, und der $\delta^{34}\text{S}$ nimmt ab. Der so genannte ϵ -Wert lässt sich mit Hilfe von grafischen Verfahren bestimmen (Abb. 3C). Die Steigung der Geraden entspricht dem ϵ -Wert, und die Fraktion des noch vorhandenen Sulfats wird mit f angegeben.

GRUNDWASSER WELTWEIT

FRITZ STAUFFER

Ob als Trink- oder Brauchwasser, Grundwasser ist eine weltweit wichtige Ressource. Allerdings ist nicht jede geologische Formation zur Nutzung geeignet. Ausgewählte Grundwasservorkommen rund um die Erde.

Wenn Grundwasser als das Wasser bezeichnet wird, das in zusammenhängenden Poren, Hohlräumen beziehungsweise Klüften des Untergrundes zirkuliert, sind seiner geografischen Ausdehnung kaum Grenzen gesetzt. Dies gilt durchaus auch in Richtung Erdinneres, ist Wasser doch in Tiefen von bis zu Tausenden von Metern zu finden (Huenges et al., 1997). Im Brennpunkt des Interesses der Öffentlichkeit steht allerdings das Wasser, das zur Nutzung zur Verfügung steht. Tatsächlich stellt Grundwasser eine weltweit wichtige Ressource zu Bewässerungszwecken dar, als Trinkwasser und als Brauchwasser. Allerdings ist lange nicht jede geologische Formation zur Nutzung geeignet. Kriterien dazu sind die Ergiebigkeit sowie die Zugänglichkeit des Vorkommens und die Qualität des Wassers. Somit werden quantitative, qualitative und ökonomische Elemente umfasst. Im Vordergrund stehen geologische Formationen, die einen aktiven Wasseraustausch mit der Hydrosphäre aufweisen. Süswasser aus Grundwasservorkommen geniesst generell einen guten Ruf und verdankt seine häufig gute Qualität all den physikalischen Filtrationsvorgängen und den chemischen sowie biologischen Transformationsprozessen während der Untergrundpassage. Ausserdem stellt es eine in der Regel gut geschützte Reserve dar, auf welche in Trockenzeiten zurückgegriffen werden kann. Wie muss man sich die Grössenordnung dieser Vorkommen vorstellen? Die Erdoberfläche ist bekanntlich zu etwa 71% mit Wasser bedeckt. Insgesamt beträgt der Wasservorrat auf der Erde gemäss UNEP (2000) ca. 1,4 Mrd. km³. Davon sind aber lediglich ca. 2,5% Süswasser, was dem Volumen von 35 Mio. km³ entspricht. Wiederum davon liegen ca. 8 Mio. km³ im Untergrund. Vom zugänglichen nutzbaren Süswasser macht Grundwasser immerhin etwa 90% aus, was noch zirka

180 000 km³ ausmacht. Die vorhandenen Volumen sind also beträchtlich.

Grundwasser in der Schweiz

Werfen wir zunächst einen Blick auf die Grundwasserverhältnisse in der Schweiz: Aus der Sicht der Nutzung stehen an prominenter Stelle hochdurchlässige kiesig-sandige Lockergesteinsgrundwasserleiter (Abbildung 1). Diese sind hauptsächlich Talfüllungen in den Alpentälern sowie im Alpenvorland. Ihre Mächtigkeit ist allerdings häufig beschränkt und liegt typischerweise im Bereich von 10 bis 20 m. Das Wasservolumen kann in solchen Formationen etwa 10 bis 20% erreichen. Ihre Entstehung verdanken sie vor allem den fluvio-glazialen Transport- und Sedimentationsprozessen der letzten Eiszeiten. Dank ihrer Oberflächennähe und guter Durchlässigkeit ist ihr Wasserhaushalt eng mit Atmosphäre und Oberflächengewässern verbunden. Ein Beispiel für die vorhandene Dynamik ist in Abbildung 2 gezeigt. Es illustriert die Reaktion des Grundwasserspiegels auf den trockenen Sommer 2003.

Weitere Grundwasservorkommen der Schweiz, welche vor allem kleinere Quellen und Fassungen speisen, sind in Ablagerungen von Terrassenschottern, in Sandsteinformationen, aber auch in Moränenablagerungen usw. zu finden. Im Gebiet der Kalkalpen und des Schweizer Juras sind zum Teil ergiebige Karstgrundwasserleiter mit stark verzweigten Hohlräumssystemen zu finden. Im Bereich der Alpen sind schliesslich ausgedehnte Kluftgrundwassersysteme in Felsformationen zu erwähnen. Insgesamt ist in der Schweiz Grundwasser als Trinkwasser sehr verbreitet und deckt gemäss BUWAL über 80% des gesamten Bedarfs. Werfen wir einen kurzen Blick auf andere Beispiele von Grundwasservorkommen weltweit.

Grundwasser in Lockergestein

Gut durchlässige sandige und sandig-kiesige Grundwasservorkommen sind weit verbreitet. In den USA zum Beispiel sind riesige Formationen vorhanden, wie etwa der Ogallala-Aquifer im Bereich der High Plains mit Mächtigkeiten von zirka 150 m (Red River Authority of Texas). Obwohl sehr gross, ist das System stark von Übernutzung betroffen, während die Grundwasserneubildung hauptsächlich wegen des semi-ariden Klimas sowie geologischer Gegebenheiten limitiert ist. Etwas anders liegt es bei der ausgedehnten marinen Lockergesteinsformation des Indusbeckens in Pakistan (Saeed, 2003). Der Grundwasserleiter besteht hauptsächlich aus Sand- und Siltablagerungen und ist rund 300 m mächtig. Das Grundwasser ist grundsätzlich stark salzhaltig und wird lediglich im obersten Teil durch infiltrierendes Regenwasser ausgesüsst. Die Süswasserschicht ist typischerweise etwa 30 bis 60 m dick und wird grossflächig durch eine Vielzahl von angepassten Entnahmesystemen genutzt. Dabei besteht die Kunst darin, das Grundwasser so zu entnehmen, dass langfristig kein Salzwasser angesaugt wird. Es ist dies ein klassisches Beispiel einer nachhaltigen Bewirtschaftung.

Das Sahara-System

Ein Beispiel aus ariden Zonen ist das Sahara-Aquifersystem (Sahara and Sahel Observatory, 2003). Dieses besteht hauptsächlich aus zwei geologischen Schichtpaketen, dem gespannten Intercalary Continental mit einer Mächtigkeit von bis zu 1000 m und dem darüber liegenden Terminal Complex. Es erstreckt sich über die Staaten Algerien, Tunesien und Libyen mit einer



Abb. 1: Ausschnitt aus einer Kiesgrube im Rafzerfeld (Kanton Zürich) mit einer Breite von zirka 5 m. Die sandig-kiesige Formation liegt hier in einer Mächtigkeit von über 50 m vor. Obwohl über dem Grundwasserspiegel gelegen, sind Aufschlüsse dieser Art äusserst wertvoll für die Visualisierung des heterogenen Aufbaus von Grundwasserleitern. Die Durchlässigkeit für Wasser kann in diesem gezeigten Ausschnitt bereits über mehrere Zehnerpotenzen schwanken.

Fläche von gegen 1 Mio. km². Das riesige System besteht in den durchlässigen Teilen aus Sandstein- sowie Kalksteinschichten und wird in erster Linie im Gebiet des Atlasgebirges in Algerien gespeist. Die gesamte Nutzung durch jährlich über 2 Mrd. m³ übersteigt die Infiltration aber bei weitem. Die Folge davon sind stetig fallende Grundwasserspiegel bzw. Wasserdrücke. Dies hat zur Folge, dass der Aufwand für die Wassergewinnung ständig ansteigt und zudem lokal eine zunehmende Versalzung eintritt. Letztere tritt einerseits an der Meeresküste auf, wo Meerwasser als Folge des sinkenden Wasserdrucks in den Grundwasserleiter eindringt. Andererseits findet Versalzung auch im Landesinnern in der Nähe von Salzwasserbecken statt, bei welchen Wasser durch Evaporation verdunstet und versalzt. Als Folge der Übernutzung kehren sich die Strömungsgradienten um, und Salzwasser gelangt in Fassungen.

Kluft und Karstgrundwasser

Während bei Sandsteinformationen das Porenvolumen gegenüber Lockergesteinen bereits reduziert ist, weist dieses bei Kluftgrundwasserleitern nur noch wenige Prozente auf. Diese bilden zusammenhängende Spalt- und Hohlräumssysteme in Felsformationen, in welchen Wasser zirkulieren kann. Ihre Ergiebigkeit ist allerdings häufig beschränkt. Ein Beispiel solcher Kluftgrundwasserleiter ist die ausgedehnte kristalline und metamorphe Felsformation in Südwest-Australien (Lloyd, 1999). Wegen des zum Teil hohen Salzgehalts kann es dort allerdings lediglich vereinzelt genutzt werden. Kluftgrundwasserleiter spielen aber insbesondere in semi-ariden Gebieten eine bedeutende Rolle für die lokale Wasserversorgung.

Eine weitere wichtige Gruppe sind die Karst-Grundwasserleiter in Karbonatformationen. Gemäss dem US Global Change Research Information Office ist bis zu etwa 10% der Oberfläche der Erde mit Karstformationen bedeckt, allerdings eher in gemässigten Klimazonen. Etwa ein Viertel

Literatur

Lloyd J. W. (1999), Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones. Studies and reports in hydrology 58, UNESCO, Paris.
Huenges E., J. Erzinger, J. Kück, B. Engesser, and W. Kessels (1997), The permeable crust: Geohydraulic properties down to 9101 m depth. J. Geophys. Res. 102 (B8) 18 255-18 265.
Saeed M. M. (2003), Survey of current practices, assessment of modeling tools, and development of guidelines for improving design and operation of skimming wells in Pakistan. Thesis Univ. College Dublin, Ireland.
Sahara and Sahel Observatory (2003), The north-western Sahara aquifer system. Synthesis Report, Obs. du Sahara et du Sahel, Tunis, Tunisia.
UNEP (2000), United Nations Environment Programme, Vital Water Graphics, <http://www.unep.org/vitalwater/index.htm>.

der Weltbevölkerung hängt von Wasser aus solchen Systemen ab. Wasser zirkuliert in mehr oder weniger grossen zusammenhängenden Hohlräumssystemen, entstanden durch chemische Auflösungsprozesse. Diese Systeme können zum Teil sehr hohe Fliessgeschwindigkeiten aufweisen und reagieren dementsprechend rasch auf Niederschläge. Als Folge davon können Karstquellen in Trockenjahren versiegen. Ausserdem reagieren Karst-Grundwasserleiter unter Umständen sehr empfindlich auf Verschmutzungen, was besondere Anforderungen an ihren Schutz stellt.

Nur ein Teil des Wassers nutzbar

Volumen und Durchlässigkeit wasserführender Formationen sind das eine. Wesentlich für die nachhaltige Nutzung jeglicher Grundwasserleiter sind die gegebenen Erneuerungsraten. Global erreichen schätzungsweise nach Abzug von Verdunstung

Forschungsinformationen

Forschungsschwerpunkte von Fritz Stauffer sind Strömungs- und Stofftransportprozesse im Grundwasser mit Einschluss des Kapillarbereichs. Im Vordergrund stehen insbesondere mathematische Modellierung sowie Methoden der Geostatistik und der stochastischen Modellierung. Ein aktuelles Forschungsprojekt ist die Entwicklung von Methoden zur Einschätzung der Genauigkeit bzw. der Unsicherheit der Resultate von Grundwassermodellen als Folge der Unsicherheit sowie starker räumlicher Variabilität von Parametern. Ein weiteres Forschungsprojekt betrifft die stochastische Modellierung des Transports von Umwelttracern im Grundwasser.

Kontakt: Tel. 044 633 3079;

Fax 044 633 1061;

E-Mail: stauffer@ihw.baug.ethz.ch

und Transpiration jährlich zirka 45 000 km³ Wasser die Erdteile. Davon ist allerdings nur ein Teil nutzbar. Gemäss UNEP werden jährlich etwa 700 km³ Grundwasser entnommen. Hauptsächlich erfolgt die Neubildung von Grundwasser durch den Anteil des Niederschlags, welcher versickert oder aus Oberflächengewässern infiltriert. Die Neubildung ist häufig der begrenzende Faktor für die Nutzung und ihre Kenntnis daher von vorrangiger Bedeutung. Die langfristige Verfügbarkeit des Grundwassers ist aber erst gegeben, wenn auch die Qualität den geforderten Kriterien entspricht. Erkundung, Schutz und Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen sowie die dazu notwendigen Grundlagen gehören daher weltweit zu den wichtigen Themen der Forschung.

Prof. Fritz Stauffer

Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich

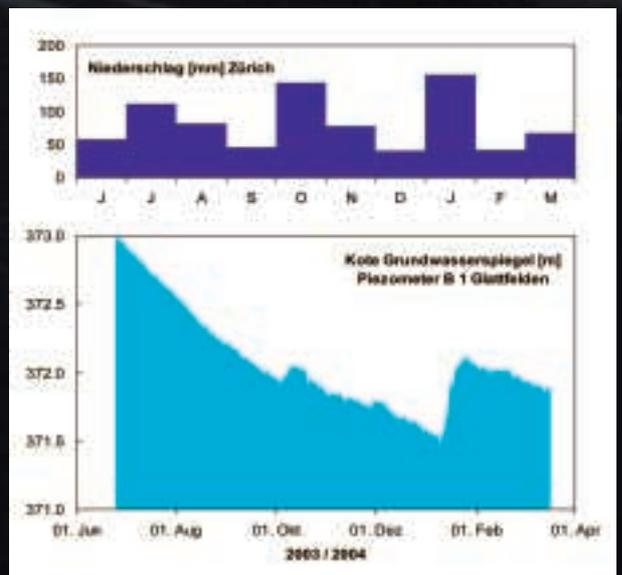


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung des Grundwasserspiegels im sandig-kiesigen Grundwasserleiter des unteren Glatttals (Kanton Zürich) im Sommer/Winter 2003/2004. Erst stärkere Niederschläge im Januar 2004 vermochten wieder einen nennenswerten Anstieg zu bewirken. Der Grundwasserspiegel liegt in einer Tiefe von etwa 12 m. Die Lage des Piezometers ist in unmittelbarer Nähe der Glatt (Daten H.-J. Hendricks Frannssen und T. Keller, IHW, sowie MeteoSchweiz).

DIE «WELT» UNTER DEN VULKANEN

THOMAS PETTKE, WERNER E. HALTER UND CHRISTOPH A. HEINRICH

Vielleicht haben Sie gerade Licht eingeschaltet, um diesen Artikel zu lesen. Vielleicht geistern die letzten Nachrichten betreffend des steigenden Ölpreises noch in ihrem Hinterkopf umher. Nicht unerschöpflich ist die Quelle fossiler Brennstoffe; erneuerbar ist nur die Wasserkraft, predigt die hiesige Energielobby. Seit dem Altertum basieren verblüffend viele menschliche Errungenschaften auf metallischen Rohstoffen: Eine Aufgabe der Geologen ist es, die zukünftige Versorgung unserer Gesellschaft mit essenziellen Metallen zu sichern.

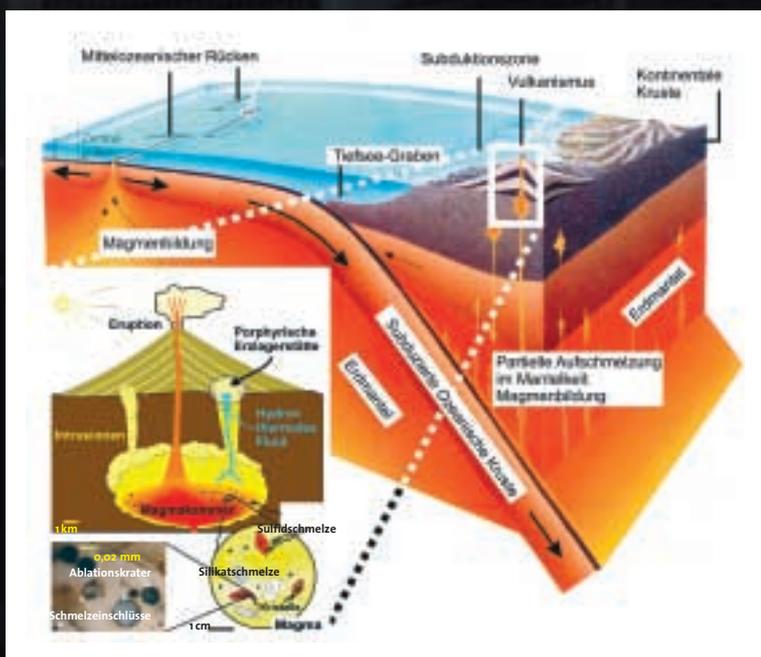


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Subduktionszone. Ozeanische Kruste wird unter kontinentale Kruste subduziert und verliert dabei chemische Komponenten, die eine partielle Aufschmelzung im Mantelkeil bewirken. Diese Schmelzen steigen dann auf und sammeln sich in Magmakammern unterhalb von Vulkanen. Die aufgeblähte Detailansicht zeigt schematisch die Koexistenz von Kristallen, Silikatschmelze und Sulfidschmelztropfen im Magma. Solche Kristalle, hier eine Hornblende, enthalten oft Schmelzeinschlüsse, deren chemische Zusammensetzung mittels Laser-Ablation induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie bestimmt werden kann; Einschlüsse werden einzeln herausgebohrt (siehe Ablationskrater) und analysiert. Erst solche Analysen erlauben es, die Elementverteilungen zwischen diesen unterschiedlichen Phasen zu bestimmen und so die Anreicherungsprozesse von Metallen besser zu verstehen.

Technologien zur Verteilung von Energie wie unser Stromnetz sind selbstverständlich geworden, und die Gesellschaft akzeptiert mit «gutem Gewissen» weiterhin den stetig steigenden, Benzin-basierten Strassenverkehr seit der Verbreitung der Katalysatortechnik. Die Art des gesellschaftlichen Umganges mit den metallischen Rohstoffen ist erstaunlich. Der Verbrauch metallischer Rohstoffe in der modernen Gesellschaft nimmt stetig zu, der Wiederverwertungsgrad ist jämmerlich tief. Das Verbrauchsmaterial Metall ist momentan nicht knapp, doch dessen Gewinnung wird immer aufwändiger, und das Auffinden neuer Lagerstätten wird in den nächsten Jahrzehnten schwieriger werden. Geologen befassen sich damit, das Zusammenspiel verschiedener geologischer Prozesse, die unter Vulkanen zu abbaubwürdigen Erzreicherungen führen können, zu verstehen. Diese Grundlagenforschung trägt dazu bei, neue Vorkommen zu finden und somit den wachsenden Metallverbrauch unserer Gesellschaft mittelfristig zu sichern. Als Erzlagerstätte verstehen wir, ganz generell, eine hinsichtlich finanziellem und energetischem Aufwand abbaubwürdige Masse an metallhaltigem Gestein. Für Kupfer (Cu) in porphyrischen Lagerstätten ist rund 1 Gewichtsprozent notwendig, und die kombinierte Gewinnung mehrerer Metalle (beispielsweise Cu, Gold [Au] und Molybdän [Mo]) erhöht natürlich die Rentabilität des grossräumigen Abbaus. Solche Metallgehalte sind jedoch rund tausendmal höher als jene gewöhnlicher Krusten- und Mantelgesteine. Unsere moderne Forschung befasst sich mit den Schlüsselfragen der geologischen Metallanreicherungsprozesse.

Grosse Fortschritte in der Analyse kleinster Proben

Vieles, was wir heute wissen, verdanken wir den Fortschritten in der Analytik von geologischen Proben, dem stetig wachsenden experimentellen Datensatz zum chemischen Verhalten der Erzelemente bei Temperaturen über 300 °C und einem Druck, der bis zu 50 000 bar erreichen kann, sowie der numerischen Modellierung nicht direkt beobachtbarer geologischer Prozesse. Laser-Ablation Induktiv-Gekoppelte-Plasma-Massenspektrometrie (LA-ICPMS) erlaubt seit kurzem die chemische Analyse von 0,01 mm grossen Einschlüssen von Fluiden und Gesteinsschmelze in Mineralien (siehe Abbildungen 1 und 2), mit Nachweisgrenzen, die beispielsweise für Gold (Au) unter einem Gramm pro Tonne liegen. Diese bahnbrechende Entwicklung am Departement Erdwissenschaften erlaubt nun erstmals, die Konzentration und Umverteilung von Erzelementen zwischen unterschiedlichen Gesteinsschmelzen und hydrothermalen Fluiden – wässrigen, salzreichen Lösungen – direkt zu studieren (siehe Abb. 2). Solche Daten sind essenziell zum besseren Verständnis der Entstehung abbaubwürdiger Vererzungen, wie im Folgenden für die Genese porphyrischer Erzlagerstätten illustriert wird.

Porphyrische Erzlagerstätten: Lieferanten von Metallen

Porphyrische Erzlagerstätten sind mit Magmatismus und Vulkanen über Subduktionszonen assoziiert (Abb. 1) und sind das sichtbare Resultat komplexer Vorgänge in einer

Tiefe von bis zu hundert Kilometern (siehe Artikel Schmidt/Ulmer, S. 50-54). Unmittelbar unter Vulkanen in Tiefen von gewöhnlich weniger als 15 km befinden sich Magmakammern (hier existieren Mineralien schwimmend in Gesteinsschmelze, Abb. 1), welche als zentrale Zwischenstufe in der kontinuierlichen Entwicklung vulkanischer Systeme gelten. Über solchen Magmakammern, jedoch noch unter den Vulkanen, können sich so genannte porphyrische Erzlagerstätten bilden, unsere Hauptquelle von Cu und Mo; sie sind auch wichtige Lieferanten von Edelmetallen wie Au oder Rhenium (Re). Die Entstehungsprozesse von solchen Erzlagerstätten erscheinen prinzipiell einfach, sind aber im Detail sehr komplex und in der Erdgeschichte nur relativ selten verwirklicht.

Intrusionen und Eruptionen

Die Genese der Gesteinsschmelze ist eng verknüpft mit aus der subduzierten ozeanischen Krustenplatte freigesetzten chemischen Komponenten (unter anderem H₂O, Alkali- und Erdalkalimetalle, Halogenide, Schwefel), welche dann im darüber liegenden Mantelkeil partielle Aufschmelzung auslösen (Abb. 1). Diese Schmelzen sammeln sich, steigen auf und können Magmakammern bilden. Das zwischenzeitliche Verweilen von Magma in solchen Kammern erlaubt nun einer grossen Anzahl physikochemischer Prozesse, wirksam zu werden. Wichtig dabei sind die periodische Zumischung von Gesteinsschmelze aus der Tiefe und das Aufsteigen von Magma, sei es bis zur Erdoberfläche als Vulkaneruptionen oder sei es als Intrusionen, die in der Kruste

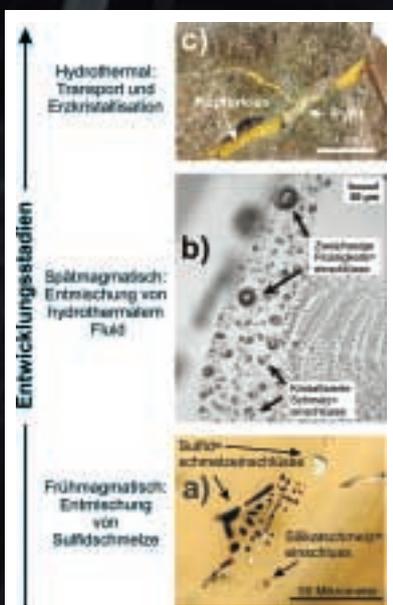


Abb. 2: Drei zentrale Metallanreicherungsphasen in der Genese porphyrischer Erzlagerstätten, chronologisch von unten nach oben illustriert. Abbildung 2a zeigt koexistierende Silikat- und Sulfidschmelzeinschlüsse (schwarz = im Kristall, hell = exponiert an der Oberfläche) in einem Amphibolkristall. Metalle wie Kupfer und Gold gehen zu 99,9% in die Sulfidschmelztropfen. Dieser Prozess findet bei rund 800–1000 °C statt und kann als erste Voranreicherungsphase verstanden werden. Abbildung 2b zeigt koexistierende Einschlüsse von Silikatschmelze und hydrothermale Fluid bei 600–800 °C. Metalle gehen zu 99% in das Fluid über, inklusive jener in Sulfidschmelztropfen, denn diese werden durch das Fluid aufgelöst. Metalle im hydrothermalen Fluid sind gegenüber dem Ursprungsmagma etwa hundertfach angereichert. Abbildung 2c zeigt ein vererztes Gestein mit auffälligen Adern von Kupferkies, Pyrit und Quarz. Die vererzte Gesteinsmasse enthält typischerweise 1 Gewichtsprozent Kupfer und oft bis zu 1 Gramm pro Tonne Gold.

unterhalb der Vulkane stecken bleiben. Essenziell für die Entstehung porphyrischer Erzlagerstätten aber sind – nach neuesten Erkenntnissen in der Grundlagenforschung – chemische Prozesse in der Magmakammer. Die Kristallisation von wasserarmen Mineralien bewirkt, dass sich die verbleibende Restschmelze immer mehr mit gelöstem Wasser anreichert bis zur Sättigung, wo sich ein hydrothermales Fluid entmischt. Dieses ist gewöhnlich salzreich (Salzgehalte sind ein Mehrfaches von Meerwasser) und vermag effektiv eine ganze Anzahl Metalle zu lösen. Messungen der Elementgehalte koexistierender Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüsse (Abb. 2b) erlauben nun die direkte Bestimmung von Metallverteilungskoeffizienten zwischen Schmelze und Fluid, entstanden bei rund 700-800 °C in mehreren Kilometern Tiefe. Solche Resultate zeigen, dass der Gehalt an Cu und Au in der Restschmelze (bereits angereichert durch die Kristallisation metallarmer Mineralien wie Feldspäte, Quarz, Amphibole oder auch Pyroxene) bei Fluidsättigung gesamthaft vom Fluid aufgenommen wird, indem die Metalle zusammen mit den Halogeniden und Schwefel fluidlösliche Komplexe bilden. Der Grad der Metallanreicherung liegt hier im Bereiche zweier Grössenordnungen. Sättigen sich nun grosse Teile einer Magmakammer von 10-20 km³ Grösse, so bildet sich in der Grössenordnung von einer Milliarde Tonnen Erzmetall-beladenes Fluid.

Mobile Fluide

Solche Erzmetall-beladenen Fluide sind mobil und erfahren aufgrund ihrer geringen Viskosität und Dichte von weniger als 1 g/cm³ starken Auftrieb. Seichte, fingerförmige Intrusionen bilden oft bevorzugte Wegsamkeiten (Abb. 1). Was nun noch fehlt zur Bildung einer reichen Erzlagerstätte ist das konzentrierte Ausfällen von Erzmineralien in einem möglichst begrenzten Gesteinsvolumen, um eine weitere Aufkonzentration der Erzmetalle erreichen zu können (Abb. 2c). Auch hier ist erneut eine Vielfalt von Prozessen am Werk, wobei die Entmischung des Fluids in koexistierende wässrige, salzreiche Lösung und salzarmen, aber schwefelreichen Wasserdampf und Temperaturabnahme essenziell ist.

Wie entsteht eine porphyrische Erzlagerstätte?

Sind nun die geologischen Rahmenbedingungen derart, dass fokussiertes, langsames Aufsteigen des Fluids dessen fortschreitende Abkühlung um etliche zehn Grad in einem vertikalen Intervall von wenigen hundert Metern erlaubt, so kann mehr als 90% des Kupfers in Form von Kupfersulfiden ausgeschieden werden (Abb. 2c). Diese Ausscheidungseffizienz resultiert von der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit vieler Metallkomplexe, wie aus Experimenten bekannt ist. Wird nun dieser Ausscheidungshorizont über eine gewisse Zeitspanne von immer

neuem erzbeladenem Fluid durchwandert und verändern sich die geologischen Rahmenbedingungen nur unwesentlich, so ergibt sich eine ausgeprägt lokalisierte Ausfällung von Erzmineralien. Somit ist eine porphyrische Erzlagerstätte entstanden (Abb. 3). Modellberechnungen zeigen (ein kontinuierlicher Prozess ist dabei vorausgesetzt), dass sich solche Lagerstätten innert einigen zehntausend Jahren bilden können.

Der Metallinhalt porphyrischer Erzlagerstätten

Was genau bestimmt nun die Metallverhältnisse einer Vererzung? Die genetische Bedeutung vorab des Cu/Au-Verhältnisses wird seit Jahrzehnten diskutiert, denn die Anwesenheit von Au ist ein zusätzlicher «Bonus» für den Erzabbau. Neueste Erkenntnisse über den Cu-Au-Metallinhalt von Magmakammern konnten nun aus Analysen kleinster Einschlüsse von Sulfidschmelzen in gesteinsbildenden Mineralien gewonnen werden (Abb. 2a). Ähnlich wie bei einem wässrigen Fluid, können sich ebenfalls geringste Mengen einer Schwefel-Eisen-reichen Schmelze (Sulfidschmelze) aus einem silikatischen Magma früh in dessen Entwicklung entmischen. Analysen koexistierender Sulfid- und Silikat-Schmelzeinschlüsse mittels LA-ICPMS zeigen, dass Metalle wie Cu und Au quantitativ in die Sulfidschmelze gehen. Vergleicht man nun die gemessenen Metallverhältnisse in Sulfid-Schmelzeinschlüssen mit denen des Erz-beladenen hydrothermalen Fluids und



Abb. 3: Tagebau in der Kupfer-Gold-Lagerstätte Bajo de la Alumbrera, argentinische Anden. Täglich werden rund 100 000 Tonnen Erz abgebaut, was nach der Aufbereitung rund 500 Tonnen Kupfer und 60 Kilogramm Gold ergibt. Der elektrisch betriebene Bagger fasst um die 50 Tonnen Erz pro Schaufelladung; die Lastwagen haben eine Nutzlast von 250 Tonnen! Die Erzreserven in Bajo de la Alumbrera werden auf 3 300 000 Tonnen Kupfer und 380 Tonnen Gold geschätzt.

denen der daraus entstandenen Erzlagerstätte, so sind diese auffallend gleich. Die Metallverhältnisse der Ursprungsschmelze werden also durch die unterschiedlichen Prozesse der Lagerstättengenese (Fluidmischung in der Magmakammer, Fluidaufstieg und die lokalisierte Ausfällung) nur unwesentlich beeinflusst. Grundlegende Schlussfolgerungen sind einerseits die Tatsache, dass bereits Prozesse vor der Magmakammerbildung (Schmelzbildung im Mantelkeil oder sogar bereits die Entwässerung der subduzierten ozeanischen Kruste; Abb. 1) über das Metallverhältnis einer allfälligen Vererzung entscheiden. Andererseits haben Analysen solcher Sulfid-Schmelzeinschlüsse das Potenzial, die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit neu gefundener Erzkörper massgeblich zu verbessern.

Was bringt die Zukunft?

Der Wiederverwendungsgrad von Metallen nimmt zu, wird aber nie vollständig möglich sein. Neue Rohstoffquellen aus natürlichen Metallanreicherungen in der Erdkruste sind daher auch längerfristig von zentraler Bedeutung für unsere Zivilisation. Neue Vorkommen zu finden ist zunehmend schwieriger, und daher ist ein grundlegendes Verständnis der erzanreichernden geologischen Prozesse immer wichtiger, bis dereinst neue Rohstoffe weit unter der Erdoberfläche vorhergesagt, lokalisiert und vielleicht sogar ohne Abbau in Minen selektiv extrahiert werden können.

Forschungsinformationen

Thomas Pettke ist Laborleiter der Laserbasierten Plasma-Massenspektrometrie, in der Gruppe «Fluids and ore deposits» von Prof. C. A. Heinrich. Seine Hauptinteressen gelten dem Stoffkreislauf in Subduktionszonen mit Schwergewicht auf der chemischen Analyse mikroskopischer Einschlüsse von Flüssigkeiten und Gesteinsschmelze in Mineralien und deren Bedeutung auch für die Erzlagerstättengenese.

thomas.pettke@erdw.ethz.ch

Werner E. Halter hat zurzeit eine Förderungsprofessur des Schweizerischen Nationalfonds am Departement Erdwissenschaften und ist Leiter der Gruppe «Magma-Thermodynamik». Seine Forschung befasst sich mit der Struktur, der Thermodynamik und der Entwicklung von Silikatschmelzen in vulkanischen und erzbildenden Systemen.

werner.halter@erdw.ethz.ch

Christoph A. Heinrich ist ordentlicher Professor für mineralische Rohstoffe und Prozesse des Erdinnern und leitet seit 1994 die «Fluids and ore deposits»-Gruppe im Departement Erdwissenschaften. Sein Hauptinteresse gilt den geologischen Bildungsprozessen mineralischer Rohstoffe im Erdinneren.

christoph.heinrich@erdw.ethz.ch

Weitere Informationen unter:

<http://www.erdw.ethz.ch/Heinrich>

STROM UND WÄRME FÜR DIE ZUKUNFT?

KLAUS FRÖHLICH UND WILLY GEHRER

Um die knappen fossilen Reserven mit ihrer klimaschädigenden Wirkung wenigstens teilweise ersetzen zu können, bietet sich die Nutzung der Erdwärme an: Hier müsste man allerdings die Energie aus grösserer Tiefe holen. Ein geologisch geeigneter Standort dafür wäre die Schweiz. Sie hat ein hohes Forschungspotenzial und könnte auf diesem Gebiet eine führende Rolle übernehmen.

Die Nutzung der Erdwärme reicht weit in die Geschichte zurück. Neben den Griechen und Römern nutzten auch noch ältere Kulturen die Wärme, die in Form von Thermalquellen und Dampf aus dem Untergrund tritt. Heute wird geothermische Energie in über 50 Ländern für Wärme- und Stromerzeugung verwendet. Energie steht der Menschheit in verschiedenster Form zur Verfügung. Global betrachtet, wird die von der Menschheit verbrauchte Energie (Wärme und Kraft) zu 80% durch Verbrennung fossiler Energieträger aufgebracht. Davon werden im Mittel etwa 25% für die verschiedensten Anwendungen des täglichen Lebens in elektrische Energie umgewandelt. Der weltweite Bedarf an elektrischer Energie wird zu $\frac{2}{3}$ aus fossilen Brennstoffen erzeugt, während der Rest mit Wasserkraft und Kernkraft (je $\frac{1}{6}$) produziert wird. Nur ein sehr geringer Teil kommt aus so genannten neuen, erneuerbaren Quellen wie Wind, Biogas oder Solarenergie. Die bei der Verbrennung fossiler Energieträger erzeugten Emissionen haben die uns bekannten klimatischen Auswirkungen. Zudem gehen die problemlos gewinnbaren fossilen Vorräte zur Neige, und die Energiepreise werden dadurch möglicherweise auf ungewohnte Werte ansteigen. Durch finanzielle Förderung erneuerbarer Energieformen versucht die Politik dem entgegenzuwirken.

Windenergie in den Alpen speichern

Zur direkten Erzeugung elektrischer Energie wird vor allem die Windenergie in grossem Stil vorangetrieben. Allerdings ist der

Wind durch sein unregelmässiges Auftreten gekennzeichnet, was mit dem jeweiligen Bedarf oftmals nicht in Einklang steht. Um die Nachfrage mit einem stabilen elektrischen Versorgungssystem zu decken, muss daher immer ein sehr hoher Anteil aus Quellen kommen, welche jederzeit verfügbar und regelbar (Regelenergie) sind. Der vehemente Ausbau der Windenergie, wie er heute in einigen europäischen Ländern stattfindet, macht nur dann Sinn, wenn die entsprechende Regelenergie ebenfalls vorhanden ist (was nicht der Fall ist) oder wenn die oftmals überschüssige Windenergie gespeichert werden kann. Bis zu einem kleinen, aber bei weitem nicht ausreichenden Teil ist das durch die Pumpspeicherwerke (wie etwa in den Alpen) möglich. Fazit ist, dass wir noch mehr Wasserkraft, Kernenergie oder fossilthermische Kraftwerke benötigen werden, um den steigenden Bedarf an ständig verfügbarer Energie zu erzeugen. Im Sinne eines nachhaltigen ökologischen Bestrebens müssen wir daher nach Alternativen suchen, welche derartige Energie liefern und helfen, die Verbrennung fossiler Energieträger zu reduzieren, ohne unsere Umwelt anderwärtig zu belasten. Spätestens hier sollten wir uns bewusst machen, dass wir ohnehin auf einem praktisch unerschöpflichen Energiereservoir leben. 99% der Erdmasse ist heisser als 1000°C und 99,9% ist immerhin wärmer als 100°C. Die Quelle ist also vorhanden. Der Mensch müsste nur lernen, wie sie effektiv zu nutzen ist.



Wärmepumpen: Schweiz weltweit führend

Verschiedene Schichten sind für die Erdwärmenutzung verfügbar: In oberflächennahen Erdschichten (untiefe Geothermie) wird gespeicherte Sonnenenergie dem Erdreich oder dem Grundwasser entzogen. Dies geschieht mit Hilfe eines Wärmeträgermediums, das einen im Erdreich verlegten Wärmetauscher (Rohrregister in 2 m Tiefe oder Erdsonden bis 150 m Tiefe) durchströmt. Die in der Wärmequelle befindliche Energie wird einer Wärmepumpe zugeführt und zur dezentralen Wärmeversorgung von Objekten eingesetzt. Die Schweiz hat weltweit pro Einwohner die grösste Verbreitung von Wärmepumpen. Ein weiteres Prinzip ist die hydrothermale Erdwärmenutzung. Das in so genannten Aquiferen vorhandene energetische Potenzial von niedrigthermale, warmem (40–100 °C) oder heissem (>100 °C), aus der Erdkruste gewinnbarem Wasser wird für Wärmeversorgungsaufgaben und zur Stromerzeugung genutzt. Die weltweit installierte Leistung solcher Geothermiekraftwerke zur Stromerzeugung beträgt rund 10 GW.

Das Hot-Fractured-Rock-Verfahren: terrestrische Wärme nutzen

Das weitaus grösste theoretische Potenzial für die geothermische Energiegewinnung läge jedoch in der Nutzung der terrestrischen Wärme in tief liegenden, kristallinen Gesteinen. Ein wesentlicher Ansatz dafür ist das so genannte Hot-Fractured-Rock-Verfahren. Diese praktisch unerschöpfliche Energiequelle könnte überall auf der Erde genutzt werden. Das Prinzip ist relativ einfach: Mit einer Bohrung auf 4–6 km Tiefe erreicht man sicher das Grundgebirge, das heisst kristallines Gestein. In diesen Tiefen beträgt die Gesteinstemperatur in der Regel 150–250 °C. Wird nun Wasser in diese Bohrung gepresst, so verteilt sich dieses in natürlichen kleinen und grösseren Spalten (Klüften) des ursprünglich trockenen heissen Gesteins und wird erwärmt. Zur Vergrösserung der Oberfläche können diese Klüfte hydraulisch erweitert werden. Weitere Bohrungen nehmen das aufgeheizte Wasser wieder auf und fördern es an die Oberfläche. Damit ist ein natürlicher Wärmetauscher geschaffen.

Wärme aus der Erde in elektrische Energie umwandeln

Um die Wärme aus der Erde in elektrische Energie zu wandeln, stehen verschiedene Prozesse und Anlagen zur Verfügung. Alle beinhalten eine Turbine, in der das Arbeitsmedium entspannt wird und über eine Welle einen Generator antreibt. Da geothermische Energie, aus thermodynamischer Sicht, Niedertemperaturenergie darstellt, ist die Effizienz der Umwandlung durch den so genannten Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. Neben Reservoirtemperatur, Dampfgehalt und Druck legen der Gehalt an nicht kondensierbaren Gasen, die Mineralisation und auch die Ergiebigkeit des Wärmevorkommens die Art der Energiekonversion fest.

Sind die Temperatur und die Qualität des geothermischen Fluids ausreichend hoch, so kann es direkt genutzt werden. Aus dem geothermischen Reservoir tritt entweder Dampf aus, der direkt eine Turbine treibt, oder es tritt Heisswasser (>150 °C) mit hohem Druck aus, welches, über eine Drossel entspannt, der Turbine schlussendlich wiederum in Dampfform zugeführt wird.

Optimierungspotenziale ausschöpfen

Um Mineralisation, nicht kondensierbare Gase, aggressive Fluide usw. besser zu beherrschen, wird die Turbine über einen Sekundärkreislauf betrieben. Ersatz von Wasser im Sekundärkreis durch Arbeitsfluide mit niederen Siedetemperaturen erlaubt die Nutzung von Reservoiren mit relativ niedriger Temperatur. Einer dieser Prozesse ist der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle). Als Arbeitsmittel dienen hier kurzkettige Kohlenwasserstoffe wie zum Beispiel Pentan. Ein weiteres Verfahren ist der so genannte Kalina-Prozess. Das Arbeitsmedium im Sekundärkreislauf besteht aus einem Zweistoffgemisch wie beispielsweise Ammoniak-Wasser. Im Gegensatz zu Wasser, das bei einem gegebenen Druck mit konstanter Temperatur (isotherm) verdampft beziehungsweise kondensiert, siedet das Ammoniak-Wasser-Gemisch bei ständig steigenden Temperaturen, sprich kondensiert bei ständig sinkenden Temperaturen. Insgesamt wird damit eine deutliche Verbesserung des Carnot-Wirkungsgrades erreicht. Die Optimierungspotenziale dieser Verfahren sind noch nicht vollständig ausgeschöpft, jedoch sicher limitiert. Für die bei der Geothermie zur Verfügung stehenden Temperaturen werden die Wirkungsgrade auf ihrem jetzigen Niveau bleiben.

Deshalb ist es wichtig, neue Ansätze zu verfolgen, die nach Möglichkeit auch in bestehende Systeme integriert werden können, um die Gesamteffizienz zu verbessern.

Weltweit erstes Geothermie-Kraftwerk in Basel

Vor rund drei Jahren wurde in Basel beim Zoll Otterbach eine erste Bohrung als Basis für ein zukünftiges Geothermie-Kraftwerk erstellt. Millionen Jahre alte Sedimente mit Sand und Tonkalk wurden durchbohrt, bis man bei rund 2800 m auf kristallines Grundgebirge stiess. Da Basel mit dem Rheingraben eher auf tektonisch aktiveren Gebieten steht, bestand die Hoffnung, dass der Temperaturgradient höher liegt als bei einem Durchschnitt von 3 K pro 100 Meter Tiefe. Die Hoffnung hat sich bestätigt. Die erste Probebohrung ergab rund 4 K pro hundert Meter Tiefe. Dies ist ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor, zumal die Bohrkosten rund 70% des gesamten Projektes ausmachen. Da sich die HFR-Technologie in einem sehr frühen Stadium befindet (es gibt weltweit nur sehr wenige Forschungsprojekte, zum Beispiel das europäische in Soultz-sous-Forêts), besteht eine gewisse Unsicherheit, ob dieser in 5000 Meter unter der Erdoberfläche liegende natürliche Wärmetauscher auch erzeugbar ist. Deshalb waren die Geldgeber lange Zeit zurückhaltend. Nun hat Basel einen ersten Kredit von 32 Millionen Schweizer Franken zugesprochen, und es kann mit der Bohrung begonnen werden. Das Geothermie-Kraftwerk Basel soll in fünf Jahren Strom und Wärme für rund 5000 Haushalte liefern, das heisst rund 30 MW Wärme und 3 MW Strom. Die Investitionen für das ganze Kraftwerk sind auf 80 Millionen Schweizer Franken veranschlagt. Daraus ergeben sich Stromkosten von rund 15 Rappen pro kWh, eine Grössenordnung, wie sie bei der Windenergie anfällt. Im Gegensatz zur Windenergie liefert aber die Erdwärme Energie während 365 Tagen jeweils 24 Stunden lang. Es ist hier keine Regelenergie erforderlich, wie sie normalerweise benötigt wird, um Windenergie bei Windflauten zu kompensieren. Solche Flauten treten sogar in der Nordsee auf, und zwar zu mehr als 60% über das ganze Jahr gesehen. Die Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung für das Projekt sind positiv. Es produziert kein CO₂, und auch die Bohrschlämme (der Aushub) können unbedenklich und umweltgerecht deponiert werden. Es gibt in der Schweiz noch weitere Projekte sowie Projektideen. Doch solange

vom Projekt Basel noch keine Resultate vorliegen, halten sich die Investoren zurück.

Temperaturen in der Tiefe

Das Projekt in Basel kann selbstverständlich nur ein Anfang sein. Vieles ist noch unbekannt, viele Probleme werden auch bei Gelingen nur im Ansatz gelöst sein. Um die geothermische Gewinnung elektrischer Energie attraktiv und gegenüber den fossilen Lösungen konkurrenzfähig zu machen, ist noch ein weiter Weg zu beschreiten. Eine grundlegende Forschung ist erforderlich. Folgenden drei Themenbereichen ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken:

- Exploration
- Bohrtechnik
- Konversion in elektrische Energie

Das Auffinden geeigneter Stellen für das HFR-Verfahren ist heute noch aufwändig und damit teuer. Von der Oberfläche aus ist wohl eine grobe Ortung möglich; insbesondere die Temperatur des tiefen Gesteins ist jedoch ohne Probebohrung nicht vorhersehbar. Die Bestimmung einer geeigneten Lage ist daher problematisch. Präzisere und kostengünstigere Methoden sind zu finden, welche die Temperaturen in der Tiefe mit ausreichender Sicherheit ohne Bohrung feststellen können.

Sorgenkind Bohrtechnik

Ein weiteres Problem ist die Bohrtechnik. Beim Projekt Basel betragen die Bohrkosten etwa 70% der Gesamtkosten. Ein Anteil, der im Hinblick auf eine breite Anwendung und unter dem Konkurrenzdruck der bereits bestehenden Prinzipien inakzeptabel hoch ist. Erste Schritte zu besseren Methoden werden zurzeit im Rahmen eines EU-Projektes unter Beteiligung der Fachgruppe des Autors getan mit dem Ziel, durch ein so genanntes intelligentes Bohrsystem die Effizienz und die Geschwindigkeit zu erhöhen. Kernstück ist ein abrollbares, faserverstärktes Kunststoffrohr, das einen mit einem Elektromotor getriebenen Bohrkopf tragen soll. Der Motor wird über elektrische Leiter, welche in die Rohrwand eingelegt sind, versorgt. Lichtleiter erlauben einen leistungsfähigen Signalfuss für verschiedenste Sensoren und Diagnosewerkzeuge von und zur Oberfläche.

Visionen der Forschung

Da das im HFR-Verfahren gewonnene Wasser eine relativ niedrige Temperatur von 150–250 °C hat, ist der Umwandlungsprozess in elektrische Energie heute sehr ineffizient. Visionen zur Verbesserung sind vorhanden. Eine Idee besteht darin, einen statischen Wandler nach dem Prinzip der thermischen Emission von Elektronen zu konstruieren. Diese könnten selbstverständlich auch zur Erzeugung von Strom aus anderen Niedrigtemperaturquellen oder Abwärme eingesetzt werden. Dabei sollen die thermisch angeregten Elektronen von der warmen Elektrode durch einen Vakuumspalt von wenigen Nanometern zur kalten Elektrode übertreten. Damit wird eine Spannungsquelle realisiert, und die Konversion ist vollzogen. Geothermisch aufgeheiztes Wasser könnte die Wärmequelle dafür sein. Die Eleganz dieses Prinzips läge darin, dass die Elektronen den Spalt «durchtunneln» können und nicht einen Energie verzehrenden Potenzialwall überwinden müssen, wie das bei Thermionikelementen der Fall ist. Aber auch andere Quellen wie etwa die Abwärme jedweder Kühlsysteme wären denkbar. Die Machbarkeit eines solchen Konverters wird zurzeit am Institut des Autors studiert.

Mehr Energie aus der Tiefe gewinnen

Nüchtern betrachtet, stehen der Menschheit zur elektrischen Energiegewinnung vier grosse Energieressourcen zur Verfügung, welche 24 Stunden am Tag verfügbar sind. Die Wasserkraft, die Kernenergie, die fossilen Brennstoffe und die Erdwärme. Sonne und Wind sind zwar ebenso in grossem Masse vorhanden, sie sind aber nicht ständig verfügbar, und die geographische Effektivität ist minimal. Die drohende Verknappung der fossilen Brennstoffe sowie deren negativer Einfluss auf unser Klima fordern zum Handeln auf. Substanziell mehr Energie aus der Tiefe zu gewinnen wäre sicherlich ein entscheidender Schritt. Wir müssen aber durch intensive Forschung und Entwicklung lernen, dieses zu tun. Die Schweiz ist ein geeigneter Standort, und sie hat auch das Potenzial, eine führende Rolle einzunehmen.

Forschungsinformationen

Schwerpunkte:

- Neue Isoliermaterialien für elektrische Apparate
- Intelligenz und Technologie von Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung
- Zukunft der elektrischen Energieversorgung
- Geothermische Energiegewinnung

Weitere Informationen:

<http://www.eeh.ee.ethz.ch/hvl/>

Kontakt: Prof. Dr. Klaus Fröhlich

Tel. +4116322776, Fax +4116321202,

E-Mail: froehlich@eeh.ee.ethz.ch

Prof. Klaus Fröhlich

Ordentlicher Professor am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich

Willy Gehr

Präsident der Energietechnischen Gesellschaft der Schweiz
Leiter des Bereichs Transportation Systems / Siemens Schweiz

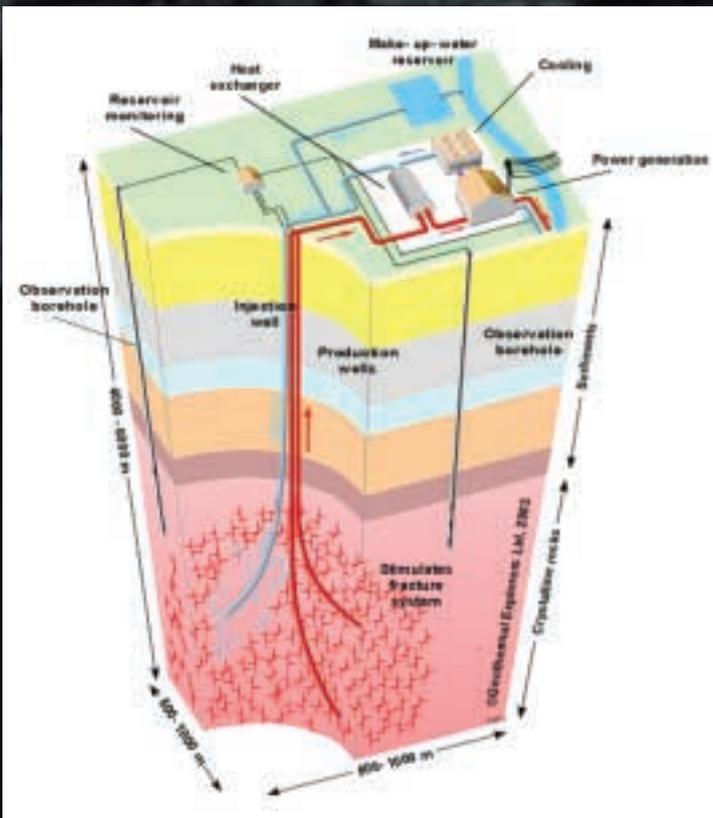


Abb. 1: Prinzip des Hot-Fractured-Rock-Verfahrens
(Quelle: M. Häring, Geothermal Explorers Ltd.)

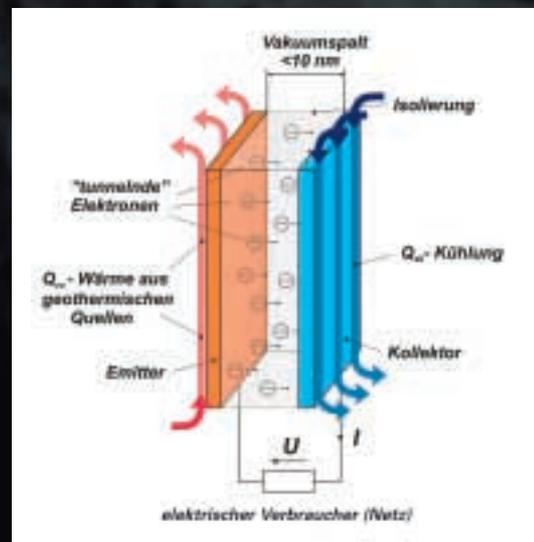


Abb. 2: Prinzip eines statischen Wandlers von thermischer in elektrische Energie

KÖNNEN ERDBEBEN VORHERGESAGT WERDEN?

STEFAN WIEMER

Im Mittel sterben etwa 10 000 Menschen weltweit pro Jahr an den Folgen von Erdbeben, davon mehr als 1000 in Europa. Durch die zunehmende Urbanisierung, insbesondere in Ländern der Dritten Welt, durch unzureichende Bausubstanz und durch die zunehmende Verletzbarkeit moderner Industriegesellschaften nehmen die Schäden und Todesfälle tendenziell zu. Es wird in den nächsten 50 Jahren wieder katastrophale Erdbeben geben. Kann man Erdbeben vorhersagen?



Abbildung 1: Zerstörte Häuser in der Stadt Boumerdes in Algerien. Das Beben vom 21. Mai 2003 der Magnitude 6,8 hat mehr als 2000 Menschen getötet. Der Schweizerische Erdbebendienst ist zusammen mit dem Schweizerischen Korps für Humanitäre Hilfe innert 24 Stunden nach dem Hauptbeben in Algerien angekommen, um dort Nachbeben zu messen und so mehr über das tektonische Umfeld zu lernen (Foto: Souad Sellami, SED).

Erdbeben sind ein faszinierendes und prinzipiell erstaunlich harmloses Naturphänomen. Ein Mensch, der in der freien Natur steht und ein starkes Erdbeben erlebt, wird wahrscheinlich das Gleichgewicht verlieren, wohingegen bei Überschwemmungen, Vulkanausbrüchen oder Lawinen direkte Gefahr für Leib und Leben besteht. Deshalb argumentieren Seismologen und Erdbebeningenieure, dass nicht Erdbeben Menschen töten, sondern Häuser (Abbildung 1).

Katastrophale Erdbeben wie etwa das Beben von 1556 in der Provinz Shensi in China, bei dem etwa 830 000 Menschen starben, oder das Bam-Beben im Iran im Jahr 2003, bei dem annähernd 40 000 Menschen gestorben sind, werden auch zukünftig passieren, meinen die Wissenschaftler. Die rein ökonomischen Auswirkungen von Erdbeben sind ähnlich erschütternd: Seit 1971 haben Erdbeben alleine in Kalifornien Schäden von mehr als 60 Milliarden US\$ verursacht. Ein zukünftiges starkes Erdbeben in der Tokioter Region könnte gar die weltweiten Aktienmärkte kollabieren lassen, da zu erwarten wäre, dass Japan seine Auslandsinvestitionen zurückzieht, um die Reparatur der Schäden zu finanzieren. Angesichts dieser düsteren Zukunftsaussichten werden Seismologen verständlicherweise immer wieder gefragt, warum Erdbeben nicht vorhergesagt werden können.

Was ist überhaupt eine Erdbebenvorhersage?

Der Begriff Erdbebenvorhersage wird von Laien und Wissenschaftlern unterschiedlich verstanden. Wenn Seismologen von Erdbebenvorhersage sprechen, dann differenzieren sie oft zwischen vier verschiedenen Stufen der Prognose beziehungsweise Vorhersage:

1. Zeitunabhängige probabilistische Vorhersagen (seismische Gefährdungskarten);
2. Zeitabhängige probabilistische Vorhersagen, die Erdbebencluster (Vorbeben/Nachbeben/Schwärme) mit in Betracht ziehen;
3. Probabilistische Vorhersagen, die aufgrund von Vorläuferanomalien Beben in einem Raum-Zeit-Magnitudenfenster eingrenzen;
4. Deterministische Vorhersagen, bei denen Ort und Zeit eines Bebens so genau vorhergesagt werden, dass Evakuierungen realistisch werden.

Die Öffentlichkeit versteht unter Erdbebenvorhersagen in der Regel allein die 4. Stufe. Die Erdbebenvorhersageforschung beschränkt sich gegenwärtig allerdings in der Regel auf die ersten drei Stufen.

Erdbebenvorhersageforschung im Wandel der Zeit

Nach dem grossen Beben von San Francisco im Jahr 1906 begann die ernsthafte wissenschaftliche Forschung im Bereich Erdbebenvorhersage. Vorher wurden Beben oft als göttliche Strafe betrachtet, und Erdbebenprävention war somit mehr Sache der Kirche als der Wissenschaft. Erst nach dem Beben von 1906 verstanden Wissenschaftler, dass Beben an Verwerfungen durch die Verschiebung zweier Platten gegeneinander auftreten und dass sich die dazu benötigten Spannungen über Jahrzehnte hinweg aufbauen. Es entstand bald die Hoffnung, diese Spannungen zu messen und somit den Zeitpunkt eines Bebens vorherzusagen zu können. Besonders in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts war unter Seismologen Optimismus weit verbreitet: Die Plattentektonik hatte ein solides Verständnis der Antriebskräfte von Erdbeben geliefert, viele so genannte Erdbebenvorläufer («earthquake precursors») wurden beobachtet. Allgemein wurde erwartet, dass in den folgenden 10 bis 20 Jahren viele, wenn nicht gar alle gefährlichen Erdbeben präzise vorhergesagt werden könnten und somit Evakuierungen realistisch würden. Diese Hoffnung schien sich zum ersten Mal 1975 beim Beben von Haicheng in China zu bestätigen. Chinesische Seismologen hatten es geschafft, die Stadt Haicheng Stunden vor dem Beben evakuieren zu lassen und somit Tausenden von Menschen das Leben zu retten. Erdbebenvorhersage schien machbar zu sein.

Der erste Rückschlag liess dann aber nicht lange auf sich warten: Nur ein Jahr später starben eine Viertelmillion Menschen in China bei Magnitude 7,8 (Tangshan-Erdbeben). Die Katastrophe ereignete sich ohne vorherige Warnung. In den nun bald 30 Jahren seit dem Erfolg von Haicheng folgten Dutzende katastrophaler Beben, und kein einziges wurde vorhergesagt. Mittlerweile sind die allermeisten Seismologen der Auffassung, dass eine allgemeine, verlässliche Vorhersage von Erdbeben auch in den nächsten 20 Jahren nicht möglich sein wird, und viele Experten befürchten nun, dass Erdbeben nie vorhergesagt werden können.

Warum ist es so schwer, Erdbeben vorherzusagen?

Erdbebenforscher haben mit einigen fundamentalen Problemen zu kämpfen. Zuerst ist da die Tatsache zu nennen, dass Erd-

beben bis zu einigen hundert Kilometern Tiefe stattfinden und die Gesteinsschichten zwischen dem Erdbebenherd und den Messsensoren direkte Beobachtungen unmöglich machen. Das zweite Problem liegt darin, dass insbesondere grosse Erdbeben selten auftreten. Deshalb können Messnetze nicht zur richtigen Zeit am richtigen Ort installiert werden. Instrumentelle Messungen reproduzierbarer Vorläufereffekte sind deshalb selten. Seismologen in den USA und in Japan haben in den späten 70er-Jahren versucht, dieses Problem zu lösen, indem sie jeweils eine Region mit der vermuteten grössten Wahrscheinlichkeit für ein Beben als Testgebiet zur Erdbebenvorhersage gewählt haben. Diese Regionen, ein Segment der San-Andreas-Verwerfung in der Nähe der 18 Einwohner zählenden Ortschaft Parkfield und die Tokai-Region nahe des 40 Millionen Einwohner zählenden Ballungsgebietes rund um Tokio und Yokohama, wurden mit einer Vielzahl von Instrumenten versehen. Diese messen etwa die seismische Aktivität, Deformationen der Erdoberfläche, elektromagnetische Signale sowie die Temperatur und die chemische Zusammensetzung des Grundwassers. In beiden Regionen ist allerdings bis heute kein Beben aufgetreten.

Es hat sich in den letzten Jahren herausgestellt, dass Erdbebenprozesse viel komplexer sind, als Seismologen früher gedacht haben. Die Spannungsverteilung in der Erdkruste hat sich als überaus heterogen herausgestellt. Bruchmechanische Laborversuche haben zwar wichtige Hinweise zum Verständnis der Physik von Erdbeben gegeben, aber sie lassen sich nicht von einer Probe von wenigen Zentimetern auf Kilometer skalieren. Numerische Simulationen des Bruchvorganges und der Bruchausbreitung waren bislang auch nicht in der Lage, neuen Ideen zur Erdbebenvorhersage zu liefern, da die zugrunde liegende Physik noch immer zu wenig verstanden wird.

Ein Beben bei Los Angeles diesen Sommer?

Ein nicht wissenschaftliches Problem der Erdbebenvorhersageforschung besteht zudem darin, dass sie mehr als die meisten Wissenschaftszweige auch von Pseudowissenschaftlern – bis hin zu Scharlatanen – betrieben wird. Leider haben sich aber auch immer wieder ernst zu nehmende Wissenschaftler im Bereich Erdbebenvorhersage zu weit aus dem Fenster gelehnt und so die Seismologie in Misskredit gebracht. Das aktuelle Beispiel einer solchen umstrittenen

Vorhersage führt momentan in Südkalifornien zu einer öffentlichen Debatte, die weite Kreise mit einbezieht. Ein Wissenschaftler der University of California in Los Angeles, Prof. Keilis-Borok, glaubt, eine Methode gefunden zu haben, um aus den Mustern vom Auftreten kleiner Beben Vorzeichen eines kommenden Grossbebens ableiten zu können. Er sagte mit dieser Methode eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für ein Beben der Magnitude $M \geq 6,4$ für den Zeitraum vom 5. Januar bis 5. September 2004 östlich von Los Angeles voraus. Viele Seismologen sind skeptisch bezüglich der angewandten Methode und unglücklich über die Tatsache, dass er seine Vorhersage öffentlich gemacht hat. Hier steckt die Seismologie in einem Dilemma: Einerseits wäre es sinnvoll, Erdbebenvorhersagen nicht zu veröffentlichen, bis die Methode an mehreren Ereignissen überprüft wurde und in der wissenschaftlichen Gemeinschaft akzeptiert wird; andererseits setzt sie sich so dem Vorwurf der Verheimlichung aus. Bei der erwähnten Vorhersage kommt erschwerend hinzu, dass in dem seismisch sehr aktiven und grossen Vorhersagegebiet die Wahrscheinlichkeit für ein Beben für jeden zufällig ausgewählten Zeitraum von neun Monaten bereits 15% beträgt; selbst wenn also ein Beben auftreten würde, ist das keinesfalls eine Bestätigung der Methode.

Hoffnung für die Erdbebenvorhersageforschung

Ist es also ein hoffnungsloses Unterfangen, Erdbeben vorhersagen zu wollen?

In einer viel beachteten Debatte in den Wissenschaftsmagazinen «Science» und «Nature» haben einige prominente Seismologen vor einigen Jahren argumentiert, dass Erdbebenvorhersageforschung eingestellt werden sollte. Die Misserfolge in der Vergangenheit und die Vermutung, dass Erdbeben prinzipiell nicht vorhersagbar seien, sind Argumente, um Forschungsgelder lieber für andere Projekte einzusetzen. Anhänger dieser Theorie argumentieren, dass sich die Erdkruste ständig in einem selbst regulierten kritisch gespannten Zustand befindet (self organized criticality) und dass in einem solchen System «am Rande des Chaos» jede noch so kleine Änderung des Zustandes mit einer bestimmten, wenn auch geringen Wahrscheinlichkeit ein grosses Beben entstehen lassen

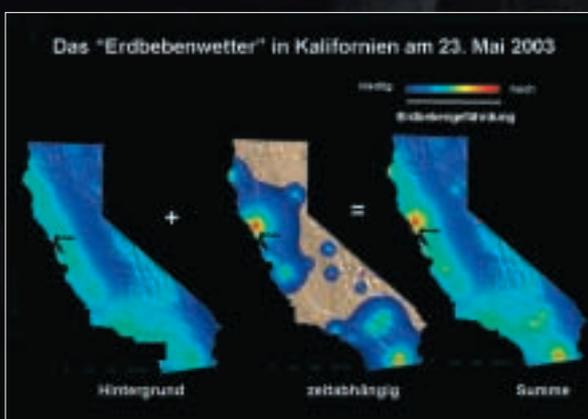


Abbildung 2: Die gezeigten drei Karten von Kalifornien zeigen, wie Wissenschaftler an der ETH versuchen, Kurzzeitprognosen der Erdbebengefährdung zu erstellen. Die linke Karte zeigt die Hintergrundwahrscheinlichkeit, an einem Tag (23. 5. 2003) eine starke Bodenbewegung zu erleben. Dieser Wert ändert sich nicht mit der Zeit. Die mittlere Karte zeigt den zeitunabhängigen Beitrag zur Gefährdung, berechnet aus der Aktivität der Tage und Monate vorher. Rote Flecken sind Regionen mit momentan erhöhter Gefährdung. Die rechte Karte kombiniert beide Anteile und liefert somit ein Gesamtbild der Gefährdung in Kalifornien.

kann. Somit hätten Erdbeben mehr Ähnlichkeit mit dem spontanen Zerfall von Nukleiden als mit Prozessen in der Meteorologie, in der zumindest eine recht verlässliche Kurzzeitvorhersage möglich ist.

Viele Seismologen sehen trotz alldem Hoffnung für die Erdbebenvorhersageforschung. Diese begründet sich zum Teil dadurch, dass neue Technologien (etwa das Global Positioning System, auf Satelliten basierende Radarinterferometrie) in der Lage sind, grossräumige und präzise Messungen, etwa der Deformation der Erdkruste, durchzuführen. Verbesserte Seismometernetzwerke liefern zudem ein immer präziseres und umfassenderes Abbild der seismischen Aktivität. Ausserdem sind vor ausgewählten Beben klare Vorläufer erkennbar, wie etwa die Serie starker Vorbeben, die das Haicheng-Beben angekündigt haben. Allerdings sind sich alle Seismologen bewusst, dass es noch viele Jahre dauern wird, bis eine verlässliche Erdbebenvorhersage selbst für selektive Beben realisierbar wird.

Forschung an der ETHZ

In unserer Forschungsgruppe Erdbebenstatistik des Schweizerischen Erdbebendienstes an der ETHZ, versuchen Wissenschaftler gegenwärtig, die Grundlagen für die neue Generation von Erdbebenvorhersageforschung zu schaffen. Wir verfolgen hierbei die Philosophie, uns graduell von der etablierten Basis der Stufe-1-Vorhersagen in Richtung zeitabhängige Gefährdungseinschätzung zu bewegen, dabei aber immer die statistische Signifikanz unserer Prognosen beziehungsweise Vorhersagen zu etablieren. In Zusammenarbeit mit dem United States Geological Survey und dem Southern California Earthquake Center haben wir deshalb ein Umfeld geschaffen, in welchem die unterschiedlichsten Vorhersagemodelle (der Stufen 1, 2 und 3) im direkten Vergleich und über einen Zeitraum von fünf Jahren in Echtzeit gegeneinander getestet werden sollen. Am Ende dieser Periode werden wir detailliert die Vorhersagekapazität der Modelle auswerten.

Eines der Modelle, an denen wir intensiv arbeiten, versucht das Erdbebenwetter der nächsten 24 Stunden möglichst genau vorherzusagen (Abbildung 2). Basierend auf einer detaillierten Analyse der Nachbeben- und Vorbebenaktivität werden stündlich Vorhersagemodelle berechnet und im In-

ternet publiziert. Erste Tests dieses Modells sind viel versprechend, allerdings muss man immer zu bedenken geben, dass die resultierenden täglichen Wahrscheinlichkeiten gering sind. Somit erlauben sie Schutzmassnahmen nur im sehr begrenzten Umfang. Unsere Hoffnung ist es aber, dieses Modell weiter auszubauen und zu verfeinern und somit dem Menschheitstraum von einer verlässlichen Erdbebenvorhersage in kleinen Schritten näher zu kommen.

Danksagung: Der Autor bedankt sich herzlich bei Dr. Francesca Bay und Danijel Schorlemmer für wertvolle Anregungen und Korrekturen.

Ein kleines 1 x 1 der Erdbebenwissenschaft

Ein Erdbeben ist die plötzliche Verschiebung zweier Flächen gegeneinander. Solch ein Bruch in der Erdkruste breitet sich von einem kleinen Startpunkt mit einer Geschwindigkeit von rund 3 km/s aus. Die Dauer eines Erdbebens ist deshalb direkt proportional zur Gesamtlänge des Bruches: Ein kleines Beben der Magnitude 4, wie es etwa am 28. Juni 2004 in 22 km Tiefe unter Brugg/AG auftrat, erstreckt sich über eine Fläche von etwa 1 x 1 km und dauert somit nicht mal eine Sekunde. Das bislang grösste bekannte Beben der Magnitude 9,5 in Chile im Jahr 1960 bricht hingegen eine Fläche von ungefähr 1200 x 50 km und dauert somit bis zu 6 Minuten. Seismologen sind sich deshalb auch einig, dass ein Beben der Magnitude 10 zwar theoretisch möglich ist – schliesslich erwähnen auch Journalisten gerne die nach oben offene Richterskala –, aber praktisch nie auftreten wird, da eine derartig lange Bruchfläche auf der Erde schlichtweg nicht existiert. Die relative Verschiebung der beiden Flächen gegeneinander ist ähnlich proportional zur Magnitude: Bei einem Beben der Magnitude 4 handelt es sich nur um Zentimeter, beim Chile-Beben dagegen um mehr als 30 Meter. Die Häufigkeit der Beben skaliert dabei auch mit einem Exponentialgesetz: Es gibt zehnmal mehr Beben der Magnitude 4 als solche der Magnitude 5 usw. Im statistischen Mittel gibt es weltweit pro Jahr ein Beben der Magnitude 8, aber mehr als 1 Million Beben der Magnitude 2. Diese Beziehung scheint sich bis in den Bereich der Molekularstruktur der Gesteine fortzusetzen. Im Labor lassen sich Minibebeben mit Magnituden von -5 erzeugen und beobachten. Deren Bruchlängen liegen im Sub-Millimeter Bereich. Erdbeben treten bevorzugt an Plattengrenzen und deren näherer Umgebung auf. Aber es treten auch immer wieder Beben weit entfernt von Kontinentalrändern auf. Wirklich erdbebensicher ist deshalb kein Ort der Erde, und auch auf anderen Planeten wird es wohl Erdbeben geben. Mondbeben wurden in der Tat schon aufgezeichnet, und nach Marsbeben soll im Rahmen der NetLander Mission mit Beteiligung der ETH Zürich in den nächsten Jahren gesucht werden.

Forschungsinformationen

Die Gruppe Erdbebenstatistik des Schweizerischen Erdbebendienstes an der ETH Zürich befasst sich hauptsächlich mit Fragen der seismischen Gefährdungsabschätzung und statistischen Analyse von Erdbebenkatalogen weltweit. Dazu gehören beispielsweise Abschätzung der Nachbebengefährdung in Echtzeit, die Raum-Zeit-Kartierung von statistischen Erdbeben-Indikatoren sowie Vulkanseismologie und Erdbebenvorhersage.

Kontakt: Dr. Stefan Wiemer,
Tel. 01 633 38 57, Fax 01 633 10 65,
E-Mail: s.wiemer@sed.ethz.ch.

Literatur:

Hintergrundinformationen zur Keilis-Borok-Vorhersage:
http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/KB_prediction.html

Is the reliable prediction of individual earthquakes a realistic scientific goal?
Online-Debatte in «Nature»:
http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/quake_contents.html

Stefan Wiemer

Schweizerischer Erdbebendienst
ETH Zurich, s.wiemer@sed.ethz.ch

DAS GEHEIMNIS DES MAGMAS

MAX W. SCHMIDT UND PETER ULMER

Ereignisse wie vulkanische Eruptionen oder Erdbeben erinnern uns daran, dass auch das Innere unseres Planeten ein dynamisches, dem ständigen Wechsel unterworfenen System ist. Welches Geheimnis birgt das Magma?

Die uns direkt zugänglichen obersten Kilometer der Erde entsprechen nur 1,5% der Erdmasse, entstehen jedoch durch die Dynamik der darunter liegenden 98,5%. Die gegenwärtige, in der Erdgeschichte variable Einteilung der Oberfläche in 30% Landmasse (kontinentale Kruste) und 70% Ozeane (ozeanische Kruste) ist das Resultat multipler magmatischer Zyklen, die sich im Erdmantel meist in Tiefen von 20 bis 200 km abspielen. Die Zeitspannen, denen solche Zyklen, unterworfen sind, reichen von hundert Jahren (Magmakammern) bis hunderte Millionen Jahre (Konvektion des Mantels und plattentektonische Zyklen). Nur wenn sich diese langfristigen Zyklen durch geologisch momentane Ereignisse (vulkanische Eruptionen, Erdbeben) manifestieren, werden wir daran erinnert, dass auch das Innere unseres Planeten ein dynamisches, dem ständigen Wechsel unterworfenen System ist.

Tiefe und Temperatur des Magmaozeans

Während der Akretion der Erde vor 4,6 Milliarden Jahren führte die Freisetzung der Gravitationsenergie der akkumulierenden Partikel zum Aufschmelzen des äusseren Bereichs der Proto-Erde. In diesem Magmaozean, der zwischen 300 und > 1000 km tief war, koexistierten eine Fe-Ni-reiche metallische und eine silikatische Schmelze. Das Inventar aller Elemente hat sich dann zwischen diesen beiden unmischbaren Schmelzen und eventuell bereits vorhandenen Silikatmineralien verteilt. Die Elemente, die in der metallischen Schmelze konzentriert waren (zum Beispiel Platinoiden, die in der Erdkruste sehr abgereichert sind), wurden dann mit dem Absinken der dichteren metallischen Schmelze während der Kernbildung ins Zentrum der Erde verfrachtet (Ab-

bildung 1). Die Verteilung der Elemente im Magmaozean, die von uns experimentell untersucht wird, gibt Aufschluss über die Tiefe und Temperatur des Ozeans, was wiederum eine Randbedingung des Akretionsprozesses definiert. Der Magmaozean wird mit experimentellen Apparaturen, welche entsprechende Drücke (10–40 GPa) und Temperaturen (bis 2500 °C) erzeugen, simuliert. Dabei ist zu beachten, dass der silikatische Erdmantel aufgrund seiner Mineralogie in zwei Tiefenbereiche unterteilt wird: den oberen Mantel bis 670 km Tiefe (23,5 GPa), der als wichtigstes Mineral Olivin (und seine Hochdruckmodifikationen) enthält, und den unteren Mantel, der zu mehr als 80% aus silikatischen Perovskiten besteht. Konventionelle Hochdruckapparaturen, die zur Druckübertragung Hartmetall (Wolframkarbid) verwenden, erreichen dabei «nur» 24 GPa, bei höheren Drücken müssen Druckstempel aus feinkörnigen, versinterten Diamanten eingesetzt werden. In der Ultrahochdruckforschung folgt aus dem physikalischen Grundgesetz $\text{Druck} = \text{Kraft}/\text{Fläche}$, dass hohe Drücke in Kombination mit «grossen» Volumina (mm^3) hohe Investitionen erfordern. Die grossen Volumina, das heisst eine Miniatur-Reaktionskammer, benötigen wir, um magmatisch-petrologische Prozesse adäquat zu untersuchen. In unserem Hochdrucklabor haben wir in den letzten 3 Jahren dazu eine so genannte «true spherical multi anvil» entwickelt, in der eine in unter Druck gesetztem Öl gelagerte Gummikugel ein mehrstufiges Stempelsystem enthält, in dessen innerstem Teil gesinterte Diamantwürfel auf unsere Reaktionskammer drücken (Abb.2). In dieser werden wiederum durch eine Widerstandsheizung Temperaturen bis 2700 °C erzielt. Erste Resultate zeigen, dass die leichten Elemente im Erdkern (S, C, O) das Verteilungsmuster der Spurenelemente im Erdkern stark beeinflussen und dass im

Magmaozean aller Wahrscheinlichkeit nach Perovskit kristallisierte und dieser gegen 800–1000 km tief war.

Wie werden Magmen gebildet?

Nach der gravitativen Segregation des Fe-Ni-reichen metallischen Erdkerns kühlte der Magmaozean ab, und Teilschmelzen des Mantels begannen, an diskreten Zonen basaltische Kruste an der Erdoberfläche zu bilden (nicht unähnlich der heutigen ozeanischen Kruste). Diese Kruste war wohl dünn und in viele kleine Platten unterteilt; sie ist nicht erhalten geblieben. Entscheidend für die Bildung stabiler kontinentaler Kruste (die älteste erhaltene Kruste ist 3,8 Milliarden Jahre alt) war dann die Etablierung eines tief reichenden $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ -Zyklus: Ozeane an der Erdoberfläche alterieren die basaltische Kruste und bilden Hydrat- und Karbonat-Mineralien, welche in den Erdmantel subduziert werden und dort durch metamorphe Reaktionen wieder Wasser und Kohlendioxid freisetzen. Diese superkritischen Hochdruck-Fluids steigen aus den Subduktionszonen in den Mantelkeil auf und führen dort durch Schmelzpunktniedrigung zur Bildung volatiler, oxidierter, so genannter primärer Magmen, die zu SiO_2 -reichen granitoiden Schmelzen fraktionieren, die als Intrusionen schlussendlich die kontinentale Kruste (auf der wir leben) aufbauen. Hochdruckexperimente und thermodynamische Modellierung aus unserer Gruppe haben wichtige Bausteine zur Quantifizierung der H_2O - und CO_2 -Zyklen (und anderer «lithophiler» Elemente) geliefert; wir konnten beispielsweise zeigen, dass das Verteilungsmuster der explosiven volatilreichen Vulkane in Subduktionszonen nicht auf den Reaktionen beruht, welche die Fluids freisetzen, sondern auf der thermischen Struktur des

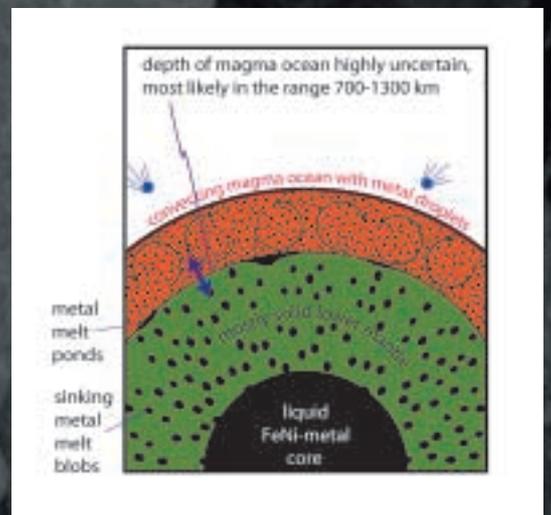


Abb. 1: Modell zur Segregation des metallischen Erdkerns.

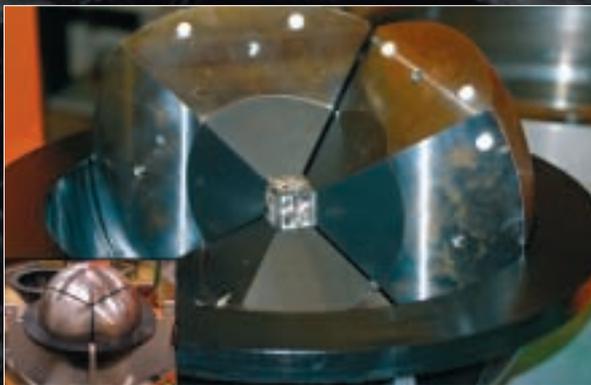


Abb. 2: Kugelförmige Hochdruckapparatur die bis 400 000 bar erzeugen kann. Die Gummischale enthält mehrere Stufen von Druckstempeln, im Zentrum sitzt ein Würfel, der aus 8 Würfeln (Kantenlänge 14 mm) aus gesintertem Diamant besteht, in dessen Mitte die Druckkammer liegt. Ein Öldruck von max. 700 bar, der auf die Gummischalen wirkt, erzeugt eine Kraft von 3000 Tonnen, die durch die Druckstempel im Inneren der Gummischale auf ein Volumen von einem Kubikzentimeter fokussiert wird.



Abb. 3: Rotationstisch der Zentrifuge (Durchmesser 1,4 m) mit 2 Aperturen, links die Presse, welche bis 20 000 bar erzeugt und in deren Zentrum die bis auf 1600 °C heizbare Probe sitzt, rechts das Gegengewicht mit ähnlicher Massenverteilung. Maximale Beschleunigung der Probe: 3000fache Erdbeschleunigung bei 2850 U/min; Geschwindigkeit des Aussenrandes bei 2850 U/min: 750 km/h.

Mantels unter den Vulkangürteln und dem dortigen Bildungsort der Magmen. Die experimentell bestimmte Zusammensetzung der Fluids ermöglicht uns, die Alterierung des Mantelkeils zu quantifizieren und dadurch die Bildungsmechanismen der verschiedenen, für Subduktionszonen charakteristischen Magmen nachzuvollziehen.

Eine weltweit einzigartige Zentrifuge ...

Die primären (aus dem Mantel stammenden) Magmen sind an der Oberfläche jedoch nur selten anzutreffen. Zwischen ihrem Entstehungsort und ihrer finalen Eruption oder Intrusion unterlaufen die Magmen einen komplexen Prozess, in dem Kristalle abgetrennt werden, verschieden hoch differenzierte Magmen sich gegenseitig kannibalisieren, und älteres krustales Material wieder aufschmelzen und assimilieren. Um diese Prozesse zu verstehen, schweissen wir Magmen in komplexe Arrangements von Edelmetallkapseln ein, in welchen die verschiedenen extensiven Parameter, welche relevant für die Magmenentwicklung sind, kontrolliert unter Hochdruck und -temperatur variiert werden.

Die Chemie der Magmen erlaubt uns, ihre Entstehung zu verstehen. Der Transport der Magmen zu oberflächennahen Niveaus sowie die finale Eruption oder Platznahme in der Kruste wird hingegen durch die physikalischen Eigenschaften, insbesondere Dichte und Viskosität (die wiederum stark vom SiO₂- und H₂O-Gehalt abhängt), bestimmt. Direkte Viskositätsbestimmungen an H₂O-haltigen Schmelzen bei magmatischen Temperaturen können nur unter zumindest moderaten Drücken ($\geq 0,3$ GPa) vorgenommen werden, da bei Atmosphärendruck das Wasser aus der Schmelze abdampft. Damit scheidet alle klassischen Methoden aus; unsere Gruppe hat deswegen eine weltweit einzigartige Zentrifuge entwickelt, in der eine komplette Hochdruckapparatur (ein so genannter «piston cylinder», Abbildung 3) und damit auch unsere Magmenkapsel beschleunigt wird. Homogene Schmelzen sind Newton'sche Flüssigkeiten; über die Wegstrecke einer durch das Magma hindurch beschleunigten Pt-Kugel bestimmen wir die Viskosität der potenziell explosiven Schmelzen.

Wie entstehen Eruptionen?

Natürliche Magmen sind wesentlich komplexer, da sie nicht nur aus Schmelze bestehen, sondern eine Kristall-Fracht und eventuell Gasblasen mit sich führen. Die Kristalle bilden sich durch Abkühlung und Druckentlastung in dynamischen Magmakammern; dabei reichert sich zum einen die Schmelze (mit steigendem Kristallanteil) an volatilen Komponenten bis zur Sättigung an, zum anderen nimmt die Viskosität des Magmas exponentiell zu. Das kann dazu führen, dass der «Auspuff» der Magmakammer (das heisst der Förderschlot) verstopft wird. Das aus dem Magma während der Kristallisation freigesetzte Gas baut dann Überdruck auf, so lange, bis die mechanische Festigkeitsgrenze des Stopfens erreicht wird. Wenn dieser bricht, kommt es dann zu einer der gefürchteten explosiven Eruptionen. Viskositätsbestimmungen an solchen Kristall- und Gasblasen-führenden nicht Newton'schen Flüssigkeiten unter magmatischen Temperaturen (700–1200 °C) und Drücken sind eine bis jetzt ungelöste technische Herausforderung; es ist eines der Forschungsziele unserer Gruppe, ein solches experimentelles Setup zu entwickeln.

Verständnis und Voraussage von explosiven Eruptionen

Die Dynamik des Inneren unseres Planeten wird sehr stark durch magmatische Prozesse bestimmt. Die experimentellen Apparaturen unserer Hochdrucklabors erlauben uns, Bedingungen der äussersten 1100 km unseres Planeten zu simulieren. Dabei reicht unser Interesse von den Anfängen der Erde (und anderer Planeten) und Magmen bei Drücken des unteren Erdmantels, über plattentektonische Zyklen an destruktiven Kontinentalrändern bis zu heute aktiven Magmakammern in wenigen Kilometern Tiefe und dem Verständnis und der Voraussage von explosiven Eruptionen (mit den damit verbundenen Konsequenzen).

Forschungsinformationen

Max W. Schmidt

- Segregation des Kerns und früherer Magmazoan, Prozesse im unteren Erdmantel
- H₂O- und CO₂-haltige Mineralien in Subduktionszonen
- Zentrifugieren unter hohem Druck und Temperatur, unmischbare Schmelzen, Rheologie und Extraktion von Magmen

Peter Ulmer

- Bildung und Entwicklung von Magmen in Subduktionszonen
- Viskosität und Eruptionsdynamik nicht Newton'scher Magmen
- Globale Zyklen lithophiler Elemente

Kontakt:

Institut für Mineralogie und Petrographie
Departement Erdwissenschaften
CH-8092 ETH Zürich
max.schmidt@erdw.ethz.ch
01 632 79 88
peter.ulmer@erdw.ethz.ch
01 632 39 55
Fax 01 632 10 88
www.imp.ethz.ch

Prof. Max Schmid und Prof. Peter Ulmer
Institut für Mineralogie und Petrographie
ETH Zürich

DIE REISE UNTER DEN MEERESBODEN

FLAVIO S. ANSELMETTI UND JUDITH A. MCKENZIE

Wie reist man in die Erde? Was einst bloss Science Fiction à la Jules Verne war, machen die internationalen Ozeanbohrprogramme heute möglich: Dank raffinierter Bohrtechnik öffnet sich uns der Untergrund der Weltmeere. Wie tief kommen wir in der Zukunft?



In seinem Science-Fiction-Roman liess Jules Verne seinen Professor Otto Lidenbrock mühsam in einen Vulkan absteigen. Von dort aus begannen er und seine zwei Kameraden die «Reise zum Mittelpunkt der Erde» zu Fuss. Dieses kilometertiefe Vorstossen unter die Erdoberfläche, wie es bei Jules Verne nur mit fiktiven Gedankenspielen oder wie es in der computerisierten Welt auch mittels virtuellen Methoden machbar ist, ermöglichen in Realität seit 1968 die internationalen Ozeanbohrprogramme: Mittels raffinierter Bohrtechnik kann die Reise in den ozeanischen Untergrund auch durch kilometerlange Bohrproben durchgeführt werden. Somit ist ein direkter Einblick in den Untergrund der Weltmeere erhältlich.

Ozeanbohrprogramme: Schweizer von Anfang an dabei

Auch ohne direkten Meeranstoss oder gar marine Hoheitsgebiete war die Schweiz von Anfang an beim «Deep Sea Drilling Program» (DSDP; 1968–1983) und beim Nachfolgeprojekt, dem «Ocean Drilling Program» (ODP; 1985–2003), aktiv dabei, womit den Forschenden an Schweizer Hochschulen der Zugang zum grössten internationalen akademischen Forschungsprogramm der Erdwissenschaften ermöglicht wurde. Davon haben Dutzende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den vergangenen Jahrzehnten profitiert und haben an Bord der RV «Glomar Challenger» (DSDP) und der RV «Joides Resolution» (ODP) zahlreiche Bohrkampagnen begleitet. Mehr noch, zahlreiche dieser Bohrkampagnen sind auf Initiative von Schweizer Forschergruppen entstanden und markierten so die Präsenz des Forschungsstandortes Schweiz auch im Bereich der marinen Geologie und Paläoozeanographie.

Die neuen Bohrschiffe: bis zu 8 km tief

Das äusserst erfolgreiche ODP ist im Oktober letzten Jahres, wie seit längerem geplant, zu Ende gegangen, was jedoch nicht das Ende der internationalen Ozeanbohrprojekte bedeutet. Im Gegenteil: Während ODP und DSDP jeweils auf ein Bohrschiff beschränkt waren, ist seit diesem Jahr ein neues Bohrprogramm lanciert, welches die beiden bisherigen Programme in Grösse bei weitem überragt: Das Integrated Ocean Drilling Program (IODP), das sich schwerpunktmässig mit den Themen «Erde, Oze-

ane und Leben» beschäftigt, wird in Zukunft von mehreren Bohrschiffen aus die Ozeane erbohren. Der damit verbundene Technologiesprung wird Reisen in die Ozeanböden ermöglichen, die bisher technisch nicht durchführbar waren. Die Schweiz, als Mitglied einer erstarkten europäischen Initiative, wird auch in diesem Programm eine aktive Rolle spielen können. Damit bisher noch nicht entdeckte Bereiche erbohrt und die damit verbundenen wissenschaftlichen und auch für die Gesellschaft relevanten Fragen beantwortet werden können, wird das IODP mit mehreren Schiffen und Bohrplattformen operieren. Ein neues, unter japanischer Federführung entwickeltes Bohrschiff von bisher unerreichten Ausmassen (210 m lang, 150 Personen an Bord) wird bis zu 8 km tief in den Ozeanboden bohren können, und dies in Wassertiefen von über 4 km. Dieses Schiff, nach dem japanischen Wort für Erde «Chikyu» getauft, ist bereits vom Stapel gelaufen und wird im Jahre 2006 für das IODP zur Verfügung stehen. Die USA haben die RV «Joides Resolution», das bisherige ODP-Bohrschiff, modernisiert, sodass es am 28. Juni dieses Jahres in Oregon für die erste von weiteren zukünftigen Bohrfahrten in See stechen konnte, um den Juan-de-Fuca-Rücken vor der Küste von British Columbia zu erbohren. Während diese beiden Bohrschiffe die meisten Bereiche der tiefen Ozeane erbohren können, bleiben trotzdem einige wichtige Zonen der Weltmeere für diese Bohrtechnik nicht zugänglich. Deshalb haben sich die europäischen Mitgliedsländer zusammengeschlossen, um mit einer dritten Initiative innerhalb des IODP genau solche Operationen zu ermöglichen, die nur mit so genannten «mission-specific platforms» erbohrt werden können. Dabei wird spezifisch für jedes Bohrprojekt die ideale Technik zusammengestellt, die es dann ermöglicht, auch in seichtem Wasser, auf Kontinentalrändern, um Atolle oder im gefrorenen arktischen Ozean den Meeresboden zu erbohren.

Entstehung der Erdbeben untersuchen

Mit «Earth, Oceans and Life» umschreibt das IODP die neuen wissenschaftlichen Ziele, die nun mit dem neuen Bohrprogramm erreicht werden können. Zum ersten Mal wird es möglich sein, mit der «Chikyu» in Ozeanböden zu bohren, wo bisher Erdöl, Gas oder andere fluide Phasen aus Sicherheitsgründen keine Operationen erlaubten oder die entscheidenden Gesteine

schlichtweg zu tief im Untergrund lagen. Eines der gesteckten Hauptziele sind neue Erkenntnisse im Bereich der geodynamischen Prozesse der Erde. Eine bessere Kenntnis dieser Prozesse, die zum Beispiel die Plattentektonik kontrollieren, sind auch von grosser gesellschaftlicher Bedeutung, da zahlreiche geodynamische Vorgänge wie Erdbeben oder Vulkanausbrüche dramatische Naturgefahren darstellen. Die meisten Erdbeben entstehen in der so genannten seismogenen Zone, wo die subduzierte, das heisst abtauchende Lithosphärenplatte an der darüber liegenden Platte entlanggleitet und sich Spannungen aufbauen, die dann in Form von Erdbeben abgebaut werden. Das neue japanische Bohrschiff wird es nun zum ersten Mal ermöglichen, eine solche seismogene Zone, also die Erdbeben verursachende Gleitfläche, direkt zu durchbohren, was einen spektakulären Einstand der «Chikyu» bedeutet. Im Bohrloch werden Messsonden installiert, die anschliessend physikalische und chemische Messungen durchführen, um Hinweise über Prozesse vor, während und nach dem Beben zu erlangen. Von grossem Interesse sind die fluiden Phasen, die entlang der Gleitfläche zirkulieren, da sie einerseits direkt den Erdbebenvorgang beeinflussen und andererseits mit ihren messbaren zeitlichen Veränderungen ein drohendes Erdbeben potenziell ankündigen können. Zusammen mit weiteren Bohrlochern und einem begleitenden regionalen Messprogramm wird es somit die «Seismogenic Zone»-Initiative des IODP ermöglichen, die Entstehung der Erdbeben in solch gefährdeten Gebieten in bisher unerreichter Masse zu untersuchen.

Die tiefe Biosphäre: Leben unter dem Ozeanboden

In Jules Vernes Abenteuerroman «Reise zum Mittelpunkt der Erde» (1864) entdeckten seine Protagonisten während des Abstiegs ins Erdinnere einen riesigen Ozean, grösser als das Mittelmeer und voll von prähistorischem Leben. In der Tat hat Vernes wissenschaftliche Phantasie in den letzten 15 Jahren im Rahmen des ODP eine neue Bedeutung erlangt, da eines der wichtigsten Ergebnisse der Meeresbohrungen die Entdeckung eines Ozeans in den Gesteinen unter dem Meeresboden war. Dieser immense «sub-seafloor ocean» stellt ein riesiges Fluid-System dar, das mit den darüber liegenden Meeren ein Kontinuum bildet. In etwa einer Million Jahren wird durch dieses System das gesamte Ozeanvolumen



Abb. 1: Das neue 210 m lange und 38 m breite Flaggschiff des IODP: Die «Chikyu» wird fähig sein, in Wassertiefen von über 4 km bis zu 8 km unter den Meeresboden zu bohren. Der Bohrturm erhebt sich 120 m über der Wasserlinie. Das Schiff wird 150 Personen an Bord haben, davon 50 Wissenschaftler. Die Helikopterplattform überragt die Brücke am Bug des Schiffes (Foto: Ian Jarvis, Kingston University).



Abb. 2: Unidentifizierte Prokaryoten (Bakterien) aus 50 m Sedimenttiefe am Kontinentalschelf von Peru (ODP Site 1229). Ein Organismus hat gerade die Zellteilung vollzogen, was eindeutiges Wachstum anzeigt. Diese Organismen werden im Geomikrobiologielabor der ETH kultiviert. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, zirka 10 000fache Vergrößerung (Foto: Patrick Meister und Rolf Warthmann, ETHZ).

rezykliert und somit die chemische Zusammensetzung der Weltmeere stark beeinflusst.

Ebenfalls in Analogie zu Vernes Beschreibungen ist dieses subozeanische System voll von mikrobiellen Lebensformen, die in einem grossen Bereich von Temperaturen und Drücken bis in einer Tiefe von mindestens 750 m unter dem Meeresboden vorkommen. Diese «deep biosphere» könnte bis zu einem Drittel der gesamten Biomasse auf der Erde ausmachen. Die Präsenz dieses weit reichenden Ozeans unter dem Meeresboden, voll von mikrobiellem Leben, wirft neue Fragen über die Entstehung, die Entwicklung und die Verteilung des Lebens und des damit assoziierten Kohlenstoffkreislaufes auf. Es ist bisher nicht bekannt, wie diese riesige Biomasse mit relativ wenig Ressourcen überleben kann – ein Mechanismus, der grundlegende Fragen an die Biochemie, die mikrobiologische Physiologie und die Ökologie stellt. Dieser «sub-seafloor ocean» bildet zusammen mit dem darin enthaltenen mikrobiellen Leben ein wichtiges Element, das die Geosphäre mit der Biosphäre koppelt. Das Beprobieren und Beschreiben dieser Lebensformen, welche unter diesen extremen Bedingungen überleben können, stellt auch eine einmalige Gelegenheit dar, neue Materialien und biotechnologische Anwendungen, wie Wasserbewirtschaftung und verbesserte Ölfördereffizienz, zu entwickeln. Das zukünftige Erbohren dieser ozeanischen Tiefen mit den nun zur Verfügung stehenden Mitteln und der Technologie des IODP wird zweifelsohne neue Entdeckungen dieses untermeerischen Ozeans erbringen, die Jules Vernes kühnste Träume bei weitem übertreffen.

Der arktische Ozean: Klimageschichte der Erde entschlüsseln

Das erste Bohrprojekt, welches im Rahmen des «mission-specific platforms»-Programmes des IODP durch die europäischen Mitgliedstaaten organisiert wird, soll zum ersten Mal in den Untergund des arktischen Ozeans bohren, der wegen seiner Unzugänglichkeit, der permanenten Eisbedeckung und den schwierigen ozeanographischen und meteorologischen Bedingungen als einziger Ozean bisher noch nie erbohrt wurde. Die Wissenschaftler erhoffen sich von den bis zu 500 m langen Sedimentkernen des Lomonosov-Rückens nahe des Nordpols (88 Grad N) entscheidende Rückschlüsse auf die Klimageschichte der Erde in den vergangenen 50 Millionen Jahren, für die der arktische Ozean eine ent-

scheidende Rolle gespielt haben dürfte. Der Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean sowie die Kontrolle der Meeresströmungen werden stark durch Prozesse in diesem Meer kontrolliert. Die Vereisung, wie wir sie heute kennen, setzte erst vor wenigen Millionen Jahren ein. Es wird postuliert, dass die Eisbildung entweder in direktem Zusammenhang mit den Änderungen der globalen Meeresströmungen steht, die durch die Schliessung der Meerenge von Panama vor zirka 4 Mio. Jahren grundlegend verändert wurden, oder aber, dass die Hebung des tibetischen Plateaus vor zirka 10 Mio. Jahren die Klimazonen derart veränderte, dass eine erhöhte Frischwasserzufuhr in den arktischen Ozean die Eisbildung ermöglichte. Solche und weitere Schwankungen im regionalen und globalen Klimasystem wurden in den Sedimenten am Boden des arktischen Ozeans an entscheidender Stelle aufgezeichnet. Drei Eisbrecher werden am 10. August dieses Jahres in der Nähe von Spitzbergen diese logistisch schwierige Operation beginnen und Richtung Nordpol fahren. Während ein Eisbrecher als Bohrschiff ausgebaut wurde, sind die beiden anderen dazu ausersehen, das Bohrschiff während der stationären Bohrarbeiten ständig vom Treibeis freizuhalten. Das IODP wird dann sowohl in wissenschaftlicher als auch in technischer Hinsicht in neue, bisher unerforschte Bereiche vordringen.

Schweizer auch zukünftig mit dabei

Der Schweizerische Nationalfonds wird auch in Zukunft den Erdwissenschaftlern an den Schweizer Hochschulen die aktive Teilnahme am IODP ermöglichen, sei es durch Teilnahme an Forschungsaktivitäten auf dem Bohrschiff oder mit Bohrproben im Labor als auch durch Mitgliedschaft in den verschiedenen Gremien, die das IODP planen und beraten. Diese Schweizer Mitgliedschaft findet im Rahmen des European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD) statt, welches aus 13 Mitgliedstaaten besteht (Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Grossbritannien, Holland, Island, Italien, Norwegen, Portugal, Spanien, Schweden, Schweiz) und somit einen der drei grossen Partner des IODP neben Japan und den USA bildet. Sieben Forschungsanstalten der europäischen Partner, der Schweizerische Nationalfonds eingeschlossen, werden durch die EU für eine ERA-NET-Koordination finanziell unterstützt, um dadurch ECORD in der Vision für eine europaweite Strategie, Finanzierung und Forschung im Rahmen der Ozeanboh-

rungen zu unterstützen. Zusätzlich wurde die ETH Zürich zum aktiven Mitglied des IODP Managements International Inc. ernannt, also des internationalen Gremiums, das die Verteilung der wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Dienstleistungen aller Bohrplattformen innerhalb des IODP steuert. Durch all diese Entwicklungen wird es folglich auch in Zukunft für die Forschenden aus der Schweiz möglich sein, in den Fussstapfen von Vernes Professor Lindenbrock den Untergrund der Ozeane aktiv zu erforschen.

Forschungsinformationen

Die Forschungsgruppen von Flavio Anselmetti und Judith McKenzie befassen sich mit verschiedenen Sedimentarchiven in Meeren und Seen, um damit eine breite Palette von vergangenen Umweltveränderungen zu untersuchen. Dazu gehören Klimaveränderungen, Meeresspiegelschwankungen, geomikrobielle Entwicklungen, wie das Entstehen der frühen Lebensformen, sowie auch die Häufigkeit von Naturkatastrophen wie Flutereignisse und Erdbeben. Beide waren mehrfach während verschiedener Bohrkampagnen des Ocean Drilling Programs als Wissenschaftler und wissenschaftliche Leiter an Bord der RV «Joides Resolution» tätig. Anselmetti und McKenzie waren ebenfalls aktive Mitglieder in beratenden Gremien der internationalen Bohrprogramme. Im Moment ist Judith McKenzie innerhalb der wissenschaftlichen Planungsstruktur des IODP die Schweizer Vertreterin bei ECORD als auch die ECORD-Vertreterin im IODP Executive Committee.

Weiterführende Links:

IODP Earth Oceans and Life:
<http://www.iodp.org>
OD21 – Ocean Drilling in the 21st century: <http://www.jamstec.go.jp>
European Consortium for Ocean Drilling (ECORD): <http://www.ecord.org>
Swiss IODP:
<http://www.swissiodp.ethz.ch>

Prof. Flavio S. Anselmetti
und Prof. Judith A. McKenzie
Geologisches Institut
ETH Zürich

INTERN

SCIENCE CITY AUF DEM HÖNGGERBERG

HOCHSCHULE FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT

Zweckmässig, aber etwas abweisend: die ETH Höggerberg hat jahrzehntelang diese herbe Aura bewahrt. Jetzt soll sich das grundlegend ändern. Mit Science City entsteht mehr als ein High-Tech-Campus: ein neues Stadtzürcher Quartier nimmt Formen an, wo bald einmal 10 000 Personen arbeiten und wohnen.

Ende 2003 hat die Shanghai Jiao Tong University ein internationales Hochschulranking durchgeführt. Resultat: Unter 2000 ausgewerteten Institutionen belegt die ETH Zürich Rang 25. In Europa belegt sie hinter vier englischen Universitäten Platz 5. Auf dem Kontinent als führend betrachtet zu werden, ist bereits ein grosser Leistungsausweis. Darauf will man sich aber nicht ausruhen. «Wir sind fest entschlossen, noch besser zu werden», erklärt ETH-Präsident Olaf Kübler. «Die ETH soll mittelfristig zu den Top Ten der Welt zählen.»

Immer wichtiger – die weichen Faktoren

An der Vision Science City lässt sich ablesen, welche Pflöcke die ETH bei ihrer Strukturentwicklung einschlagen will, um das zu erreichen. – Worum geht es? Um eine «nachhaltige Aufwertung des Campus für den Wissens- und Denkkulturplatz Zürich und die Schweiz», sagt Gerhard Schmitt, ETH-Vizepräsident für Planung und Logistik und Motor der Vision. Im Mittelpunkt der Überlegungen stehe «der lernende, forschende und Dienstleistungen erbringende Mensch», so Schmitt. Hinzu kommt, dass heute fast 60% der Professoren und bereits über 50% der Doktorierenden aus dem Ausland stammen. Vor allem für sie ist die ETH sehr oft mehr als der Arbeitsplatz: Sie wird vermehrt zur Basis der sozialen Kontakte und «Startrampe» für Freizeitaktivitäten. Im globalen Wettbewerb um Top-Forschende spielen die «soft factors» eine immer wichtigere Rolle.



Abb. 1: Science City ist mehr als ein High-Tech-Campus: Ein neues Stadtquartier nimmt Formen an.

Stadtquartier für Denkkultur

Auch generell gilt, dass Lehren, Lernen und Forschen in einer Vielzahl von Einbettungen stattfinden kann, aber sicher nicht im luftleeren Raum. Ausgehend davon soll Science City den Kern eines neuartigen, offenen Zürcher Stadtquartiers für Denkkultur darstellen, wo den Studierenden und Forschenden, der Quartierbevölkerung und den High-Tech-Firmen Anreize zur Kontaktaufnahme und für den Ideenaustausch geboten werden. Diese Nähe verschiedener Erfahrungswelten, so hoffen die Science-City-Visionäre, soll der Forschung in Form von überraschenden, innovativen und gesellschaftlich adäquaten Lösungen wieder zugute kommen.

Denkbar wäre etwa, dass Unternehmen in Science City ihre kleinen «Embassies» unterhalten, wo in Kooperation mit ETH-Forschenden ohne Reibungsverlust an

markttauglichen High-Tech-Lösungen gearbeitet wird. Oder ein Talent Center, das ETH-Angehörige in ihrer Karriereplanung unterstützt. Andere Anknüpfungspunkte bieten sich Menschen ohne akademischen Fokus: Sie werden sich für Ausstellungen interessieren, wo Wissenschaft der Bevölkerung näher gebracht wird, oder das im Vergleich zu heute wesentlich grössere Angebot an kulturellen und kulinarischen Genüssen zu schätzen wissen. Und Parties und Events wie das heute schon erfolgreiche Open-Air-Kino machen den Campus zum lebendigen Ausgehbezirk.

Der «Science»-Teil der Vision will den Höggerberg zur hoch vernetzten, mit modernster Infrastruktur versorgten Forschungsstadt für Natur-, Material- und Bauwissenschaften machen. Den Auftakt dazu bildete schon das fünfgliedrige Life-Science-Gebäude von Mario Campi (1997–2004). Es beherbergt das First-Lab sowie ab 2005 ein

neues Imaging Center. Zudem genügen die Labors höchsten technischen Ansprüchen.

Erste Diskussionsbasis

Im Jahr 2003 hat ETH-Architekturprofessor Andrea Deplazes mit einer Entwicklungsstudie für den Hönggerberg eine erste Diskussionsbasis für Science City vorgelegt. Ihr Zweck ist, planerische Schnitten zu schlagen und nicht etwa, endgültige Formen oder Inhalte zu präsentieren. Diese kristallisieren sich übrigens auch über ein Beteiligungskonzept heraus, das die Wünsche aller Stakeholders einzubeziehen versucht. Sicher ist, dass Wohnhäuser für 1000 Studierende und Dozierende entstehen sollen. Eine Science-City-Studierenden-Umfrage des Verbandes der ETH-Studierenden hat ergeben, dass für diese das günstige Wohnen auf dem Campus besonders wichtig ist. Und das heisst natürlich, dass auf dem Campus auch der tägliche Einkauf möglich sein muss. Deplazes begegnet dieser Herausforderung mit einem das Gelände umgebenden Ring von sechsgeschossigen, wie Moleküle anmutenden Wohnhäusern, die den State of the Art im nachhaltigen und energieeffizienten Bauen berücksichtigen sollen. Je nach benötigtem Bauvolumen können einzelne Grundelemente ohne viel Planungsaufwand zu dichteren «Molekülketten» verbunden werden.

Bibliothek ohne Bücher

Ein weiteres, dank seiner Kuppel besonders prägnantes Element der Deplazes-Skizze ist das grosse Learning and Congress Center, das Tor der Science City zur Stadt Zürich sozusagen. Es ist ein Tagungs- und Veranstaltungsort für Wissenschaft und Bevölkerung,

ebenerdig begeh- und befahrbar, und wirkt wie eine luftige, offene Markthalle. Der Bau enthält gleichzeitig die «Bibliothek der Zukunft» mit unterirdischem Bücherspeicher. Dereinst soll hier ganz auf die (physischen) Bücher verzichtet werden können. Ebenfalls geplant sind ein Gästehaus und ein grösseres Sportzentrum. Der Architekturwettbewerb fürs Sportzentrum ist abgeschlossen.

Vier Vorschläge in Testplanung mit der Stadt Zürich

Neben dem Vorschlag Deplazes werden derzeit in gemeinsamen Workshops mit der Stadt Zürich weitere Planungsvarianten erarbeitet. Vier Planungsteams unter der Leitung von Prof. Andrea Deplazes, Prof. Vittorio M. Lampugnani, Prof. Kees Christiaanse und Wiel Arets (NL) präsentierten bisher unterschiedliche Vorschläge. Gemeinsam war die Betonung der Wolfgang-Pauli-Strasse als Hauptachse mit den öffentlichen Funktionen wie Läden, Restaurants, Gästehaus u.a.m. im Kernbereich des Areal. Drei der vier Entwürfe möchten das studentische Wohnen innerhalb des bestehenden Arealperimeters durch verdichtetes Bauen realisieren. Weitgehend einig war man sich auch, dass die Landschaft im Südteil möglichst für die Naherholung, für die landwirtschaftliche Nutzung und als Vernetzung des Naturraumes belassen werden sollte. Derzeit werden die Vorschläge weiter ausgearbeitet und nochmals mit der Stadt diskutiert. Ab September soll dann der endgültige Masterplan entstehen.

Neue Wege der Finanzierung

Der Zeitplan für Science City ist ehrgeizig. Bereits im Herbst 2004 soll ein Masterplan

vorliegen. Gerhard Schmitt hofft, dass Science City 2010 Realität ist. Viel dürfte von der Finanzierung abhängen. Denn der Bund wird das Projekt, alles in allem stolze 400 Millionen Franken teuer, bei weitem nicht allein berappen können – und auch nicht wollen. So werden vor allem für den «City»-Teil (Wohnen, Gastronomie) nicht-staatliche Quellen erschlossen werden müssen. Und das ist neu für die ETH.

Ein solches privates Engagement sorgt dafür, dass ein bedeutender Schritt zur Wissensstadt von morgen schon im kommenden Jahr Tatsache wird: die Rede ist vom Spatenstich für das neue Gebäude für Informations-Wissenschaften. Von diesem jungen Forschungsbereich erhofft man sich zum Beispiel die Weiterentwicklung von Simulationen, um teure und risikoreiche Versuche zu ersetzen. Das von Baumschlager Eberle entworfene, flexibel nutzbare Gebäude wird Science City gegen Norden abschliessen und den Namen «Branco Weiss Information Science Lab» erhalten. Der ETH-Alumnus und Mäzen Branco Weiss hat seine alma mater mit 23 Millionen Franken beschenkt und trägt damit die Hälfte der Kosten für den Rohbau. Science City ist ein folgerichtiger Entwicklungsschritt der ETH Zürich, qualitativ aber beispiellos – ein eigentliches «Transformationsprojekt» für die Hochschule, wie Gerhard Schmitt es ausdrückt. Die neue Wissensstadt soll gebauter Ausdruck des Selbstverständnisses der ETH werden: ein offener, ganzheitlich orientierter und Sinn gebender Wissensorganismus.

Norbert Staub

Informationen zu Science City sind im Internet zu finden unter: www.sciencecity.ethz.ch



Abb. 2: Science City findet auch international Beachtung. Eröffnung der Ausstellung zu «Science City» in der renommierten Galerie Aedes East, Berlin.

IN EIGENER SACHE

NEUES FORSCHUNGSNETZWERK FÜR SYSTEMBIOLOGIE

GRÜNES LICHT FÜR SYSTEMSX

Seit Ende Juni dieses Jahres ist es klar: Das Projekt SystemsX, ein gemeinsames Forschungsnetzwerk für Systembiologie, getragen von der ETH Zürich und den Universitäten Basel und Zürich, wird bald die ersten Konturen annehmen können. Die Schweizerische Universitätskonferenz (SUK) sicherte eine finanzielle Spritze in Höhe von insgesamt 10 Mio Franken zu. Die Finanzierung nach 2007 bleibt jedoch ungewiss. Erstklassige Forscher für das Netzwerk müssen noch rekrutiert und die Forschungsfelder festgelegt werden. Ein Konzept sollte bis im Herbst dieses Jahres präsentiert werden.

(vac) Die Idee wurde Ende 2002 an einem Kick-off-Meeting in Basel in Gegenwart von Vertretern des Bundes und des Kantons Basel sowie der ETH Zürich und der Universität Basel lanciert: Im Bereich Life Sciences soll eine neue Institution geschaffen werden. Eine hochkarätige internationale Experten-Gruppe unter der Leitung von Prof. Sir George Radda, Oxford-Biologe und CEO des Medical Research Council (MRC) in London, stellte fast ein Jahr später an einem Hearing in Basel unisono fest, mit der neuen Institution in Basel würde die Schweiz europaweit eine Pionierrolle einnehmen können.

Netzwerk auf der Achse Zürich–Basel

Im Rahmen des SystemsX wird in Basel ein neues Forschungszentrum für Biosysteme geschaffen (C-BSE). Die Kosten für Aufbau und Betrieb bis 2007 belaufen sich auf 33 Mio Franken. Der Kuchen wird wie folgt aufgeteilt: Die beiden Kantone Basel-Stadt und Baselland bezahlen zusammen 20 Mio. Franken, die SUK investiert 5 Mio. Franken, und die restlichen 8 Mio. Franken steuert die ETH Zürich bei, die gleichzeitig auch die Leitung des Zentrums inne hat.

Zudem wird in Zürich ein Verbund für Biosysteme angesiedelt (Cluster of Biosystems Science). Professuren und Institute der beiden Zürcher Hochschulen werden zu Arbeitsgemeinschaften zusammengeschlossen. Ebenfalls ist eine enge Zusammenarbeit des Verbundes und des Zentrums auf der Achse Zürich–Basel vorgesehen.

Anspruchsvoll, aber zuversichtlich

In Bezug auf die weitere Entwicklung des schweizerischen Netzwerks für Systembiologie zeigt sich Prof. Ulrich Suter, Vizepräsident Forschung der ETH Zürich, zuversichtlich: «Das Projekt SystemsX der ETH Zürich, in welchem wir gemeinsam mit den Universitäten Basel und Zürich die Voraussetzungen für den systemischen Ansatz in der Biologie auf nationaler Ebene schaffen wollen, ist auf Kurs. Die Terminpläne sind sehr anspruchsvoll, aber das Projekt wird mit Kraft und grossem Enthusiasmus vorangetrieben; wir sind guter Hoffnung, unsere Ziele erreichen zu können.»



Prof. Dr. Konrad Osterwalder
Rektor der ETH Zürich

Das Projekt eines ETH-Instituts in Basel wird zu einer intensiven Forschungszusammenarbeit der drei beteiligten Hochschulen in Fragestellungen aus der Systembiologie führen. Da universitäre Forschung wo immer möglich auch eng mit der Lehre verknüpft sein sollte, drängt es sich auf, in dem Bereich auch über gemeinsame Master- und Doktorsprogramme nachzudenken. Beim ersten Hinsehen scheint es ein einfaches Projekt zu sein; bisherige Erfahrungen zeigen jedoch, dass in den Details viele Teufel sitzen. Das Vorhaben von Universität Zürich und der ETH, gemeinsam ein Studienprogramm in Biologie anzubieten, das es den Studierenden erlauben würde, von den durchaus verschiedenen Stärken der beiden Institutionen gleichzeitig zu profitieren, droht immer wieder an scheinbar fast belanglosen Inkompatibilitäten zu scheitern: Verschiedene Unterrichtsmethoden, Prüfungsmodalitäten, -termine, und Ähnliches sind nicht so einfach auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Noch komplexer ist das Vorhaben eines Masterprogramms in Erdwissenschaften, das gemeinsam mit der RWTH Aachen und der TU Delft angeboten werden soll. Hier stellen sich nun die Unterschiede in den akademischen Kalendern und in den generellen Reglementierungen der Hochschulstudien klar als Hürden in den Weg einer, akademisch gesehen, äusserst sinnvollen und auch leicht zu konzipierenden Zusammenarbeit. Auch die Logistik der Unterbringung der Studierenden wird nicht einfach sein. Die Probleme sind lösbar, aber sie erfordern einen grossen Einsatz der Verantwortlichen und die feste Überzeugung, dass am Schluss etwas resultiert, was echt besser ist als alles, was bisher angeboten wurde. Die ETH räumt diesen Projekten höchste Priorität ein und gewährt den Beteiligten jedwede Unterstützung.

TRANSFER

NOVOGEL

DAMIT BONBONS NICHT MEHR KLEBEN...

Neuartige Gele dank neuer Technologie: Federico Innerebner und Rolf Müller, beides Werkstoffingenieure der ETH, haben 2002 die Firma NovoGEL gegründet, bei der Gele auf Stärkebasis und ihre Anwendungen im Vordergrund stehen.

Herr Innerebner, Sie befassen sich mit Gelen. Das sind doch diese wabbelnden Massen, wie das Haargel?

Ja, üblicherweise versteht man unter Gelen so was. Für uns sind Gele jedoch dreidimensionale Netze grosserer Moleküle. Zum Beispiel ist Pneugummi ein elastisches Gel, aber Araldit ein sehr hartes.

Mit der neuen Technologie können die Verknüpfungen und damit die Eigenschaften eines Gels gezielt eingestellt werden. Wie funktioniert das?

Ich kann hier nur das Grundprinzip verraten. Die grossen Moleküle, welche die Bausteine der Netzwerke sind, können in verschiedenen Formen vorliegen – so auch die Stärke. Um nun ein Gel mit ganz bestimmten Eigenschaften zu erhalten, mischen wir zwei verschiedene Stärken. Die eine Stärke wird Basis-Stärke genannt, die andere ist eine netzwerkfähige Stärke.

Je nachdem, wie wir die netzwerkfähige Stärke vor dem Mischen behandeln – nicht chemisch, sondern physikalisch durch eine bestimmte Kombination von Druck, Temperatur und Zeit –, entstehen verschiedene netzwerkfähige Stärken. Nach dem Mischen mit der Basis-Stärke entstehen Gele mit voraussagbaren Eigenschaften.

Warum gerade Stärke-Gele?

Stärke ist billig und eine zu 100% natürliche Ressource, die nachwächst. Zudem ist sie biologisch abbaubar.

Was für Anwendungen gibt es für die neuen Stärke-Gele?

Zum Beispiel bioabbaubare Kunststoffe: Seit den 80er-Jahren wird mit solchen Kunststoffen auf Stärkebasis experimentiert. Doch die mechanischen Eigenschaf-

ten waren bescheiden. Schlimmer noch: sie waren wasserlöslich. Um diese Mängel zu beheben, wurden sie mit synthetischen, bioabbaubaren Kunststoffen gemischt. Stärke-Kunststoffe, die mit der von uns entwickelten Technologie hergestellt werden, brauchen diese Zusätze nicht. Sie sind von sich aus wasserunlöslich und weisen ein massiv verbessertes Eigenschaftsprofil auf.

Werden ihre Gele auch in der Lebensmitteltechnik eingesetzt?

Stärke macht in der westlichen Welt etwa 50% der täglichen Kalorienzufuhr aus. Bei industriell hergestellten Lebensmitteln ist die Stärke so aufbereitet, dass sie sehr leicht verdaulich ist. Weissbrot, Corn Flakes oder Instant-Kartoffelstock verhalten sich bezüglich des Blutzuckerspiegels fast gleich wie purer Zucker. Dies ist vor allem für Diabetiker und stark Übergewichtige ein Problem. Durch die neue Technologie wird auch industriell aufbereitete Stärke wieder langsamer verdaulich, recht ähnlich ihrer natürlichen Form. Zudem wirkt die behandelte Stärke zum Teil prebiotisch – das heisst ähnlich wie natürliche Ballaststoffe.

Die neuen Gele bieten zudem eine Alternative zur tierischen Gelatine, zum Beispiel in Gummi-Bonbons. Es gibt heute zwar Gummi-Bonbons auf Pektin- oder Stärkebasis. Pektin-Bonbons sind aber eher geleeartig. Wird Stärke eingesetzt, kleben sie – auch an den Zähnen. Mit den neuen Stärke-Gele verhalten sie sich im Mund wie herkömmliche Gelatine-Bonbons.

Übrigens: Auch der Pharma-Bereich ist interessiert an Alternativen zu Gelatine-Medikamentenkapseln auf Stärkebasis.



Gründer der Firma NovoGEL: Rolf Müller und Federico Innerebner.

Funktioniert das neue Verfahren nur bei Stärke?

Grundsätzlich funktioniert es bei allen Makromolekülen. Für uns ist vor allem Polyvinylalkohol (PVA) wichtig, der auch in der Medizinaltechnik eine Rolle spielt, zum Beispiel beim Ersatz von Bandscheiben. Bisherige PVA-Gele waren zu weich, ähnlich wie eine zu weiche Sprungfeder. Mit der neuen Technologie können die Eigenschaften von PVA-Gele deutlich verbessert werden, sodass Anwendungen im Bereich der Medizinaltechnik möglich werden.

Und wie geht es nun weiter?

Wir verhandeln mit verschiedenen Firmen, um unser Know-how auf den Markt zu bringen.

Interview: Gabriele Aebli

FORSCHUNG

ECOINVENT-DATENBANK

LICHT IM ÖKOLAND

Wie reist man klimafreundlicher: mit dem Flugzeug oder mit dem Auto? Grundlagen zur Beantwortung solcher und ähnlicher Fragen findet man in der ecoinvent-Datenbank, an deren Entstehung auch die ETH Zürich beteiligt war: Mit Hilfe von Lebenszyklusanalysen, auch Ökobilanzen genannt, kann ein präzises Umweltprofil eines Produktes erstellt werden. Dabei werden wichtige Wirtschaftsbereiche abgedeckt. Der Datenbestand ist seit September 2003 verfügbar. Dr. Stefanie Hellweg war zeitweise Mitglied der Trägerschaft seitens des Instituts für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich und von Anfang an mit dabei. Ein Gespräch.

Frau Hellweg, was ist die Aufgabe des Schweizer Zentrums für Ökoinventare?

Das Schweizer Zentrum für Ökoinventare ist eine Initiative des ETH-Bereichs und schweizerischer Bundesämter, die gemeinsam eine Datenbank mit Ökoinventardaten erstellt und sich dazu verpflichtet haben, diesen Datenbestand kontinuierlich zu aktualisieren und zu pflegen. Ökoinventardaten sind Daten über Emissionen und Ressourcenverbräuche (inkl. energetischer Ressourcen) von technischen Prozessen und Produkten sowie Verknüpfungen von technischen Prozessen untereinander. Solche Inventardaten bilden die Grundlage einer Ökobilanz. In einer Ökobilanz quantifiziert und bewertet man alle Emissionen und Ressourcenverbräuche eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, den Gebrauch und die Entsorgung. Ein vereinfachtes Beispiel: Für die Herstellung einer Brille braucht man u. a. Plastik oder Metalle für das Gestell sowie Glas für die Linsen. Für die Produktion dieser Materialien benötigt man wiederum Energie in Form von Elektrizität und Wärme sowie Rohstoffe wie Erdöl, Metall und Sand. Es entstehen hierbei Emissionen, z. B. CO₂ und NO_x, die an die Luft abgegeben werden. Die Schadstoffemissionen und Ressourcenentnahmen werden anschliessend aufgrund ihrer Umweltwirkungen bewertet. Die so erhaltenen Ergebnisse einer Ökobilanz können als Entscheidungsgrundlage dienen für spezifische ökologische Fragestellungen, z. B. ob Plastik oder Metall als Material für das Brillengestell Umweltvorteile hat.

Unter Leitung der EMPA haben sich verschiedene Institute und Abteilungen der ETHZ, der EPFL, des PSI, der EMPA, der EAWAG und der Agroscope FAL Reckenholz zusammengeschlossen, um mit dem Projekt ecoinvent 2000 ihre Ökoinventardaten in einer gemeinsamen Datenbank zusammenzuführen. Wie kam man auf diese Idee?

Die Idee wurde 1998 geboren, als die Schweiz zwar bereits international führend bei der Erhebung von Ökoinventardaten war. Jedes Institut hatte jedoch eine eigene Datenbank mit einem eigenen Datenformat und eigenen Qualitätsrichtlinien. Die Daten waren dementsprechend unterschiedlich und nicht kompatibel zueinander. Einige von diesen Daten waren zudem geheim und wurden lediglich für die eigene Forschung genutzt. Zu diesem Zeitpunkt initiierte Prof. Konrad Hungerbühler von der ETHZ ein erstes gemeinsames Projekttreffen mit allen Instituten, und man einigte sich, alle Kräfte zu vereinen. Die Vision war damals, eine harmonisierte Datenbank zu schaffen, die alle Kerngebiete der Institute abdecken würde (Energie, Transport, Entsorgung, Bauwesen, Metalle, Holz, Chemikalien, Waschmittelinhaltsstoffe, Papiere und Landwirtschaft). Man war überzeugt, dass eine solche breit angelegte und einheitliche Datenbank bahnbrechenden Erfolg haben würde. Nach Abschluss des Vorprojekts übernahm die EMPA den Vorsitz der ecoinvent-Trägerschaft. Die Trägerschaft lancierte das Hauptprojekt, welches die eigentliche Er-



ETH-Bioingenieurwissenschaftlerin Dr. Stefanie Hellweg war bei der Entwicklung der ecoinvent-Datenbank von Anfang an mit dabei.

stellung der harmonisierten Datenbank zum Gegenstand hatte. Die operative Leitung wurde an Dr. Rolf Frischknecht, Lehrbeauftragter der ETHZ und Inhaber des Umweltberatungsbüros ESU-Services, übergeben.

Auf welchen methodischen Grundlagen basiert die ecoinvent-Datenbank?

Ein wichtiges Grundprinzip, welches ecoinvent von anderen Datenbanken von Ökoinventaren unterscheidet, ist, dass alle (nicht vertraulichen) Daten auf der Ebene von «Einheitsprozessen» erhoben wurden. Dies bedeutet, dass nicht nur die aggregierten Lebenszyklusdaten bereitgestellt werden (also die über Rohstoffgewinnung, Herstellung, Verbrauch und Entsorgung aufsummierten Emissionen an CO₂, SO_x usw.), son-

dern auch die Daten pro Prozess. Dieses Vorgehen gewährleistet die Transparenz der Daten und ermöglicht eine zusätzliche Qualitätskontrolle durch die Nutzer. Denn obwohl alle Daten von ecoinvent intern geprüft wurden, sind Fehler bei einer Datenbank von der Grösse von ecoinvent (mehr als 2500 Prozesse, ca. 1000 Schadstoffe und Ressourcen) nicht auszuschliessen. Ausserdem ermöglicht dieses Vorgehen tiefergehende ökologische Analysen. Im obigen Beispiel der Herstellung einer Brille wäre es nicht nur möglich, die ökologisch relevanten Emissionen und Ressourcenverbräuche zu identifizieren, sondern man kann auch feststellen, durch welche Prozesse diese verursacht werden. Solche Analysen können gezielte Optimierungen initiieren.

Seit September 2003 stehen für die Bereiche Energie, Transport, Entsorgung, Bauwesen, Metalle, Holz, Chemikalien, Waschmittelinhaltsstoffe, Papiere und Landwirtschaft harmonisierte Ökoinventardaten von hoher Qualität zur Verfügung. Wer kann alles von dieser Dienstleistung profitieren?

Eine ganze Bandbreite von Nutzern. Firmen können die Daten nutzen, um herauszufinden, ob ihre Produkte und Prozesse ökologisch konkurrenzfähig sind und wo es Optimierungsbedarf gibt. Umweltberatungsbüros können sie bei dieser Tätigkeit unterstützen.

Forschungsinstitute können ecoinvent nutzen, um spezifische ökologische Fragestellungen zu untersuchen. Behörden können die Daten bei der Abgabe von Empfehlungen (z. B. an den Konsumenten oder an die Baubranche) und bei der Gesetzgebung berücksichtigen. Dies sind nur einige Beispiele unter vielen, wie die Daten verwendet werden können.

Was ist der Beitrag der ETHZ zum Ganzen? Welche Institute der ETHZ sind daran beteiligt?

Heute sind an der ETHZ vor allem zwei Institute an ecoinvent beteiligt: Das Institut für Umweltnatur- und Umweltsozialwis-

senschaften erstellt Daten für Transportsysteme, und unsere Gruppe, Sicherheits- und Umwelttechnologie am ICB, inventarisiert Chemikalien. Beide Institute sowie das Institut für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik waren zudem Mitglieder der Trägerschaft.

Gibt es schon erste Erfolge seit der Umsetzung?

Führende Ökobilanz-Software-Hersteller haben die ecoinvent-Daten in ihr Angebot aufgenommen. Dadurch erreicht ecoinvent eine grosse Verbreitung und hat bereits ein Jahr nach der Einführung in Fachkreisen einen hohen Bekanntheitsgrad erreicht. Das Feedback von Seiten der Lizenznehmer, was mir zu Ohren gekommen ist, war sehr positiv. Vor allem werden der grosse Umfang und die Konsistenz der Daten, die transparente Dokumentationsweise und der Wille zur Offenheit der beteiligten Institute gelobt. Diese Zusammenarbeit setzt international ein Beispiel: Erst jetzt fangen andere Länder wie Deutschland an, ähnliche Netzwerke zu etablieren.

Ihre Zukunftsvision?

Ökologische Analysen wie die Ökobilanz mit Datenbanken wie ecoinvent so einfach machen, dass man sie im täglichen Leben problemlos anwenden kann. Solch qualifizierte und umfassende Umweltinformationen könnten einen grossen Beitrag zur Ökologisierung der Gesellschaft leisten. Hierzu ist allerdings noch viel Arbeit notwendig. Obwohl ecoinvent die Erstellung einer Ökobilanz erheblich vereinfacht, ist die Lebenszyklusanalyse zurzeit immer noch ein zeitaufwendiges Umweltanalyseinstrument für Experten.

Interview: Vanja Lichtensteiger-Cucak

NEWS

Neues Mineral im Erdmantel

(CC/vac) Die so genannte D-Schicht, der unterste Bereich des Erdmantels, ist ein altes Sorgenkind der Geophysiker. Mittels quantenmechanischer Berechnungen und Hochdruck-Experimenten haben Artem R. Oganov vom Laboratorium für Kristallographie der ETH Zürich und sein japanischer Kollege Shigeaki Ono von der Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, herausgefunden, dass die D-Schicht aus einem unbekanntem Mineral besteht: Dieses weist überraschenderweise eine geschichtete Kristallstruktur auf, mit der sich auch die ungewöhnliche Topographie der D-Schicht erklären lässt. Das Resultat wirft ein neues Licht auf die Vorgänge tief im Erdinneren.

Räumliche Koordination bei der Zellteilung geklärt

Wissenschaftler des Instituts für Biochemie der ETH Zürich konnten einige Fragen bezüglich der räumlichen Koordination bei der Zellteilung beantworten: Die Cytokinese oder Zellteilung ist eine komplexe Kaskade von Ereignissen, bei denen Tochterzellen irreversibel voneinander getrennt werden. Bislang war wenig bekannt, wie diese Ereignisse räumlich miteinander koordiniert sind.

Reisezeit von Asteroidentrümmern

Die neuesten Messungen der Forscher am Edelgaslabor der ETH Zürich zeigen: Die Asteroidentrümmer, die bei Kollisionen im Weltall entstehen, treffen unseren Planeten viel früher als bisher angenommen; schon nach einigen hunderttausend Jahren kann es nämlich zu einer Kollision mit der Erde kommen und nicht erst nach mehreren Millionen Jahren, wie die Forscher bisher vermuteten.

GALERIE

Manfred Schedlowski ist seit April 2004 ordentlicher Professor für Psychologie und Verhaltensimmunbiologie an der ETH Zürich.



Geboren 1957 in Hannover, studierte er Psychologie an den Universitäten in Bielefeld und Braunschweig. Nach seiner Promotion 1989 an der Abteilung für Medizinische Psychologie an der Medizinischen Hochschule Hannover und einem Forschungsaufenthalt an der University of Newcastle und am Brain-Behaviour Research Institute der La Trobe University in Melbourne, Australien, war er in den Abteilungen für Klinische Immunologie und Klinische Psychiatrie an der Medizinischen Hochschule Hannover wissenschaftlich tätig. 1993 habilitierte er sich für das Fach Medizinische Psychologie. Von Oktober 1997 bis März 2004 war Professor Schedlowski Direktor des Institutes für Medizinische Psychologie am Universitätsklinikum Essen.

Der Schwerpunkt seiner Forschung liegt auf der Analyse der funktionellen Verbindungen zwischen dem Nervensystem, dem Hormonsystem und dem Immunsystem. Dabei untersucht er, inwieweit sich Verhalten auf Funktionen des Immunsystems auswirken, welche psychologischen und biochemischen Mechanismen diese Effekte auf das körpereigene Abwehrsystem vermitteln, und analysiert die biologische Bedeutung dieser Verhaltenseffekte für die Aufrechterhaltung der Gesundheit sowie die Entstehung und den Verlauf von Erkrankungen.

Ulrich Weidmann ist seit 1. Juni 2004 ordentlicher Professor für Verkehrssysteme am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), Departement Bau, Umwelt und Geomatik.



Weidmann wurde 1963 als Bürger von Einsiedeln/Schwyz geboren. Nach seinem Bauingenieur-Studium an der ETH Zürich war er ab 1988 Assistent am IVT. In dieser Zeit entstand bei Professor Brändli seine produktionstechnische Dissertation, welche mit dem Lehner-Preis des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmungen ausgezeichnet wurde. 1994 bis 2000 erarbeitete er bei den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) langfristige Angebotsstrategien und war für den netzweiten Ausbau des S-Bahn- und Regionalverkehrs im liberalisierten Umfeld verantwortlich. 2001 bis 2004 führte er den Geschäftsbereich Engineering der Division Infrastruktur SBB (Innovationsmanagement, Bahntechnik, Architektur, Umwelt, Messtechnik, Normen). Zudem leitete er das Projekt Führerstands-signalisierung der Lötschberg-Basislinie. Im Fokus der Professur stehen die Systeme des öffentlichen Personen- und Güterverkehrs (Bahn, Bus, Luftfahrt, Schifffahrt), mit den drei Elementen Netz- und Angebotsentwicklung, Anlagenplanung und -realisierung sowie Netzbetrieb und -erhaltung. Begleitende Gebiete sind der Mensch im Verkehrssystem, der Ordnungsrahmen und die Nachhaltigkeit. Weidmanns Forschungsschwerpunkte sind die Optimierung des Systemaufbaus, die Investitionsstrategien von Netzbetreibern sowie die Methoden des Erhaltungsmanagements. Er ist Mitglied des Kuratoriums des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Universität Stuttgart.

Akademische Ehrungen

Prof. Dr. Markus Äbi, Professor der ETH Zürich für Mykologie, ist als Mitglied eines internationalen Forschungsteams zur Erforschung des Eiweiss-Stoffwechsels der Körber-Preis für die Europäischen Wissenschaften 2004 für Medizin und Biologie verliehen worden.

Prof. Dr. Thomas Bernauer, Professor der ETH Zürich für Internationale Beziehungen, ist vom Ausschuss des SNF-Stiftungsrates in den Forschungsrat Abteilung IV gewählt worden.

Prof. Dr. Markus Bläser, Professor der ETH Zürich für Informatik, ist der «Best Paper Award 2003» des Journals of Complexity verliehen worden.

Prof. Dr. Corneliu Constantinescu, Professor i.R. der ETH Zürich für Mathematik, ist für sein Wirken vom rumänischen Präsidenten Iliescu mit der nationalen «Steaua Romănici»-Medaille ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. François Diederich, Professor der ETH Zürich für Organische Chemie, hat den Vorsitz des Fachmagazins «Angewandte Chemie» übernommen.

Prof. Dr. Jürg Dual, Professor der ETH Zürich für Mechanik und experimentelle Dynamik, ist Fellow der American Society of Mechanical Engineers (ASME) ernannt worden.

Prof. Dr. Jack D. Dunitz, Professor i.R. der ETH Zürich für Chemische Kristallographie, ist zum Ehrenmitglied der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft ernannt worden.

Prof. Dr. Beno Eckmann, Professor i.R. der ETH Zürich für Mathematik, ist von der israelischen Ben-Gurion-Universität die Ehrendoktorwürde verliehen worden.

Prof. Dr. Paul Embrechts, Professor der ETH Zürich für Mathematik, ist von der Accademia Nazionale dei Lincei in Rom der INA-Preis 2004 für Mathematik und Versicherungstechnik verliehen worden.

Prof. Dr. Albert Eschenmoser, Professor i. R. der ETH Zürich für Organische Chemie, ist von der Royal Society of Chemistry die Sir Derek Barton Gold Medal verliehen worden.

Prof. Dr. Martin Fussenegger, Inhaber der SNF-Förderungsprofessur für Molekulare Biotechnologie, ist für eine hoch qualifizierte wissenschaftliche Veröffentlichung im Journal *Biotechnology & Bioengineering* der Gaden Award 2003 verliehen worden.

Prof. Dr. Rudolf Glockshuber, Professor der ETH Zürich für Molekularbiologie, ist zum Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina gewählt worden.

Prof. Dr. Alan G. Green, Professor der ETH Zürich für Angewandte Geophysik, ist zum Honorary Guest Professor der China University of Geosciences in Wuhan, China, gewählt worden.

Prof. Dr. Dieter Imboden, Professor der ETH Zürich für Umweltp Physik, ist auf den 1. Januar 2005 zum neuen Präsidenten des Nationalen Forschungsrats gewählt worden.

Prof. Dr. Ursula Keller, Professorin der ETH Zürich für Experimentalphysik, hat den ersten Preis im Wettbewerb um den Internationalen Berthold-Leibinger-Innovationspreis 2004 (internationaler Laser-Preis in Fertigung, Medizin und Biotechnologie) gewonnen.

Prof. Dr. Wolfgang Kröger, Professor der ETH Zürich für Sicherheitstechnik, ist zum Ehrenmitglied der Schweizerischen Gesellschaft der Kernfachleute gewählt worden.

Prof. Dr. Manfred Morari, Professor der ETH Zürich für Automatik, ist für die Auszeichnung mit dem IEEE Control Systems Award 2005, der höchsten Auszeichnung des Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), ausgewählt worden.

Prof. Dr. Ralf Müller, Inhaber der SNF-Förderungsprofessur für Bioengineering am Institut für Biomedizinische Technik, ist von der American Swiss Foundation zum Young Leader 2004 ernannt worden.

Prof. Dr. Bradley Nelson, Professor der ETH Zürich für Robotik und Intelligente Systeme, ist an der International Conference on Robotics and Automation mit dem Best Conference Paper Award 2004 ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Josef Nösberger, Professor i. R. der ETH Zürich für Pflanzenbau, ist die Ehrendoktorwürde der Lviv State University in der Ukraine verliehen worden.

Prof. Dr. Gabor Oplatka, Professor i. R. der ETH Zürich für Leichtbau und Seilbahntechnik, ist nach Ablauf seiner Präsidentschaft zum Ehrenmitglied der Organisation internationale pour l'Étude de L'Endurance des Câbles (OIPEEC) gewählt worden.

Prof. Dr. Michele Parrinello, Professor der ETH Zürich für Computational Sciences, ist von der World Association of Theoretically Oriented Chemists (WATOC) die Schrödinger Medal 2005 verliehen worden und ist damit zum WATOC Fellow gewählt worden.

Prof. Dr. Dimos Poulidakos, Professor der ETH Zürich für Thermodynamik, ist von der Purdue University, West Lafayette, als Hawkins Memorial Lecturer 2004 eingeladen worden.

Prof. Dr. Klaas P. Prüssmann, Professor der ETH Zürich für Magnetic Resonance Imaging Technology, ist im Rahmen der 9. Bi-Annual Conference on NMR and Intermolecular Contrast Agent Research mit dem European Magnetic Resonance Award ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Peter Rieder, Professor der ETH Zürich für Agrarwirtschaft, hat die King Albert I Memorial Foundation die «King Albert Memorial Medal of Merit» zugesprochen.

Prof. Dr. Renate Schubert, Professorin der ETH Zürich für Nationalökonomie, ist in das Outreach Advisory Board of the Center for the Study of Individual and Group Decision Making Under Climate Uncertainty an der Columbia University berufen worden.

Prof. Dr. Dieter Seebach, Professor i. R. der ETH Zürich für Chemie, ist zum Ehrenmitglied der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft gewählt worden.

Prof. Dr. Erich Josef Windhab, Professor der ETH Zürich für Lebensmittelverfahrentechnik, ist von der Europäischen Akademie der Wissenschaften (EAS) die Blaise-Pascal-Medaille 2004 verliehen worden.

Prof. Dr. Renato Zenobi, Professor der ETH Zürich für Analytische Chemie, ist vom Council of the Analytical Division der Royal Society of Chemistry zum Theophilus Redwood Lecturer 2005 gewählt worden.

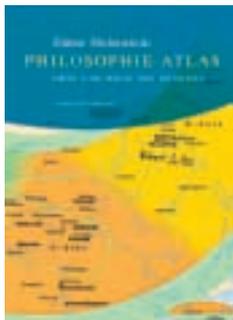
NEUE BÜCHER

Elmar Holenstein

Philosophie-Atlas

Orte und Wege des Denkens

306 Seiten, gebunden mit Schutzumschlag, mit 41 vierfarbigen Karten und Schaubildern, Begleittexten, Personen- und Geographischem Register, Fr. 79.90
Ammann Verlag, 2004



Dass Philosophie nichts Abstraktes ist, macht der neue Philosophie-Atlas von Elmar Holenstein sichtbar: Auf 41 Karten und Schaubildern zeichnet er die «Orte und Wege des Denkens» nach und veranschaulicht die Ideengeschichte der Menschheit. Verständnis der Philosophie und ihrer Vertreter ist nur eines der zentralen Anliegen des emeritierten ETH-Professors Elmar Holenstein. Das besondere Augenmerk liegt auf dem gedanklichen Austausch zwischen den Kulturen. Philosophische Lehren lassen sich nicht isoliert betrachten, sie entwickeln und verändern sich in Abhängigkeit von ihrem Umfeld. So führte der Weg der so genannten «europäischen Philosophie» nicht direkt von Hellas über Rom nach Paris, Oxford oder Königsberg, sondern erhielt gerade auf seinen «Umwegen» von Südwestasien und Nordafrika entscheidende Impulse. Die Karten und ihre Begleittexte fordern auf, die Geschichte des Denkens einmal aus einem anderen Blickwinkel zu sehen. Erdteile werden gleichrangig behandelt, eurozentrische Namen ausgespart, Fremdbezeichnungen durch Eigenbezeichnungen versetzt: So wird Vorderasien zu Südwestasien, Korea zu Han'guk. Begleitet wird die Reise zu den «Orten und Wegen des Denkens» von zwei umfangreichen Registern, einem Personen- und einem Geographischen Register. Alle Stätten der Philosophie, die Lebensstationen der grossen und kleinen Denkerinnen und Denker sind dort minutiös erfasst – fundierte Quellen für den Spezialisten, ergiebige Fundgruben für den Interessierten.

Jürgen Freund

Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger

Ein Lehrbuch

252 Seiten, broschiert, Fr. 44.–
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2004



Die Spezielle Relativitätstheorie ist nichts Schwieriges und Geheimnisvolles. Studienanfänger der Natur- und Technikwissenschaften können sie mit ihren Kenntnissen der Mathematik und der Physik in vollem Umfang und bis ins Detail verstehen, wenn sie sich die Mühe machen, sich durch dieses Lehrbuch durchzuarbeiten. Zahlreiche, zum Teil auch kompliziertere Problemstellungen, bis hin zum Energie-Impuls-Vierervektor und zum elektromagnetischen Feld, werden ausführlich behandelt und zeigen dem Anfänger, wie relativistische Rechnungen anzupacken sind. Auch die bekannten Paradoxa werden umfassend erklärt. Für den Wissenschaftler, der mit diesem Gebiet schon vertraut ist, ist dieses Lehrbuch wegen seiner umfangreichen Formelaufstellungen wertvoll.

Gotsch, N., Flury, C., Kreuzer, M., Rieder, P., Heinemann, H.R., Mayer, A.C., Wettstein, H.-R.
Land- und Forstwirtschaft im Alpenraum – Zukunft im Wandel.

Synthesebericht des Polyprojektes «PRIMALP – Nachhaltige Primärproduktion am Beispiel des Alpenraumes» der ETH Zürich. Schriftenreihe Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft im Alpenraum, Bd. 8, 305 Seiten, EUR 43.–
Wissenschaftsverlag VAUK, Kiel, 2004



Die Land- und Forstwirtschaft der Berggebiete gerät durch ihre Standortnachteile zunehmend in Bedrängnis. Der Verlust der ökonomischen Basis und damit verbundene soziale Probleme sowie eine nicht nachhaltige Land- und Raumnutzung sind zum Teil bereits eingetreten oder sind in Zukunft zu befürchten. Der wirtschaftliche Druck auf den Primärsektor hat vor allem in Agrarregionen weitreichende Folgen, weil die Land- und Forstwirtschaft dort wesentlich zur Beschäftigung und Besiedlung beiträgt. Die Agenda 21, das Schlussdokument des Erdgipfels von Rio, fordert für die Gebirge eine schonende Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen und die sozioökonomische Entwicklung von Bergregionen. Diese politischen Vorgaben bedürfen der wissenschaftlichen und politischen Präzisierung.

Vor diesem Hintergrund wurde von 1997 bis 2002 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich das Projekt «PRIMALP – nachhaltige Primärproduktion am Beispiel des Alpenraumes» durchgeführt. Die Leitidee dieses Projektes bestand in der Entwicklung von Nutzungsverfahren und Handlungsstrategien für eine ressourceneffiziente, gesellschafts- und umweltverträgliche sowie wirtschaftlich tragbare Raum- und Landnutzung durch die Land- und Forstwirtschaft im Alpenraum. Das vorliegende Buch ist der Schlussbericht und die Synthese dieses interdisziplinären Projektes.

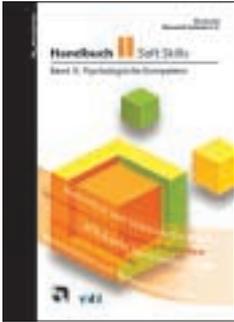
Deutscher Manager-Verband e.V. (Hrsg.)

Handbuch Soft Skills

Band II: Psychologische Kompetenz

vdv – Management, 352 Seiten, gebunden,
Fr. 67,50

vdv Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2004



In Zeiten wachsender Herausforderungen an Manager gelten neben der fachlichen Expertise vor allem Soft Skills als die kritischsten Faktoren für den Erfolg. Das Problem: Soft Skills werden in keiner Ausbildung systematisch vermittelt oder eingeübt. Die meisten Manager weisen hier ernsthafte Defizite auf und werden den zunehmenden Anforderungen nicht mehr gerecht.

Das Handbuch Soft Skills vermittelt in den drei Bänden umfangreiches und systematisches Wissen. Im Band «Psychologische Kompetenz» werden die Kompetenzfelder Motivation, Konzentration und Entspannung, Denktechniken und Denkgewohnheiten, Effiziente Lerntechniken sowie Lesetechniken praxisnah, anschaulich und nachvollziehbar aufgearbeitet. Das Ziel des Buches liegt nicht nur darin, den Leser über Soft Skills zu informieren, sondern ihn in seiner psychologischen Kompetenz auch tatsächlich fit zu machen. Methodisch orientiert sich das Buch daher an höchsten didaktischen Ansprüchen.

Mario Fontana und Andreas Tönnemann (Hrsg.)

«Luftschloss – Festarchitektur zwischen Imagination und Realität»

Mit Beiträgen von Martina Desax, Werner Oechslin, Philip Ursprung und Andreas Tönnemann

56 Seiten, 30 x 21,5 cm, gebunden,
85 Abbildungen, s/w und farbig, Fr. 22.–
gta Verlag, 2004



Die Festarchitektur erhob die Feiern des Barock zu unvergesslichen Spektakeln; die aktuellsten Ergebnisse aus Forschung und Wissenschaft, Mythologie, Sensation und ausgelassene Festkultur fanden hier zusammen. Der um 1800 spürbare Wandel spiegelt die gesellschaftlichen Entwicklungen: In den ephemeren Installationen nehmen nun die Sehnsucht nach einer sich neu ordnenden Gesellschaft und die Forderung nach dem Nutzen der Kunst für das öffentliche Wohl Gestalt an. Erst in neuester Zeit aber bindet die ephemere Kunst – sei sie vertreten an den Biennalen in Venedig oder beispielsweise an der Expo.02 – den Zuschauer als «Benutzer» restlos in das Kunstwerk ein.

Ein Stück Utopie, ein Stück Luftschloss, schwingt in der atmosphärischen Kunst – also einer Kunst, die auf Stimmung und Ambiente mehr als auf ewige Dauer setzt – stets mit. Das Potenzial dieser Utopie nicht zu verspielen, sie also nicht losgelöst von der gesellschaftlichen Wirklichkeit zu inszenieren, sondern sie auch konkret mit dieser zu verschränken, gehört zu den wichtigsten Aufgaben in nächster Zukunft. Dieses Ziel haben auch die 49 Teams junger Architekten, Bauingenieure, Künstlerinnen und Medienschaffenden verfolgt, die anlässlich des Wettbewerbes zur Feier des 150-jährigen Bestehens der ETH Zürich «Luftschlösser» entwarfen; mit Hilfe modernster Informationstechnologie sollen sie das Jubiläum als zukunftsorientierten Anlass auszeichnen.

Ein interaktiver Lehrgang über geologische Prozesse

Die Erde – der dynamische Planet

Ein interaktiver Lehrgang über geologische Prozesse

CD-ROM für Windows und Mac, Fr. 68.–
vdv Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2004



Wohin entwickelt sich die Erde? Woher kommt unser Planet? Wie können wir die Entwicklung der Erde über die menschliche Erfahrungsspanne von wenigen 1000 Jahren hinaus rekonstruieren oder vorher-sagen? Die geologische Wissenschaft mit ihren Teilbereichen Geologie, Geophysik, Mineralogie und Paläontologie versucht durch systematisches Studium der Erdgesteine, ihrer Geschichte, ihrer Nutzungspotenziale und Gefahren diese Fragen zu beantworten. Dieser Lehrgang zeigt Ihnen die Phänomene und Gesetzmässigkeiten des Systems Erde sowie die geologische Wissenschaft und ihre Methoden als Disziplin. Systemanforderungen:

Windows 98/Me/2000/NT/XP, Pentium 90 MHz, 32 MB RAM, Soundkarte; Macintosh OS 9, OS X; Internet Explorer ab Version 5.0; Netscape Navigator ab Version 6.0; Flash MX Plug-In.

IM GESPRÄCH

DIE TECHNISCHE MACHBARKEIT IST KEINE FRAGE MEHR

Felix Amberg gehört mit seiner Firma zu den führenden Tunnelbauern der Schweiz. Unter anderem ist er auch beim Bau des Gotthard-Basistunnels mit von der Partie. Den planmässigen Fortschritt bei den beiden NEAT-Bauwerken wertet er als Erfolg für seine Zunft. Dennoch sieht er mittelfristig schwierige Zeiten auf die Schweizer Tunnelbauer zukommen.

Herr Amberg, welches sind die wichtigsten Entwicklungen im Tunnelbau in den letzten Jahren?

Als erstes stellt man fest, dass immer grössere Tunnel gebaut werden. «Grösser» bezieht sich sowohl auf die Länge als auch auf den Querschnitt. Zum zweiten hat die technische Machbarkeit an Bedeutung verloren. Die Verkehrsplaner und Politiker sagen, wir brauchen eine Verbindung von A nach B; an den Ingenieuren ist es dann, das zu bewerkstelligen. Grundsätzlich lässt sich heute jeder Boden und jedes Gebirge durchqueren. Das führt dazu, dass Holland inzwischen ein regelrechtes Tunnelbauland ist. Man verfügt eben nun über Verfahren, um in tonreichen, weichen Böden Tunnel zu bauen. Das wäre vor zwanzig, dreissig Jahren nicht möglich gewesen.

Die dritte wichtige Entwicklung ist die zunehmende Mechanisierung und Automatisierung. Der deutlichste Ausdruck dafür sind die Tunnelbohrmaschinen. Der Trend zur Mechanisierung wird sich in den nächsten Jahren fortsetzen. Es gibt völlig fantastische Ideen, etwa dass in zehn, zwölf Jahren unter Umständen gar niemand mehr im Tunnel arbeiten wird, sondern dass alles ferngesteuert abläuft. Das ist sicher noch eine Utopie, aber es zeigt, in welche Richtung es geht.

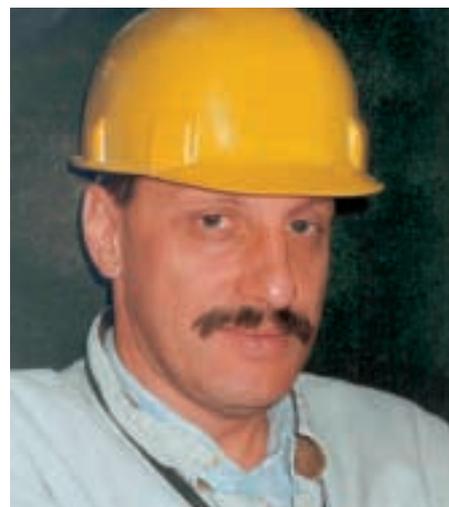
Wie muss man vor diesem Hintergrund die früheren Diskussionen um die Machbarkeit des Gotthard-Basistunnels einstufen?

Die Machbarkeit war in zwei Bereichen fraglich: bei der Pioramulde mit dem zuckerkörnigen Dolomit und dem so genannten Tavetscher Zwischenmassiv. Beide Zonen hat man intensiv erkundet. Die Kenntnisse über das Gebirge wurden so weit verbessert, dass die entsprechenden Techniken bereitgestellt werden konnten. Heute steht die Machbarkeit ausser Frage. Ungewiss ist einzig, ob es etwas schneller oder langsamer geht.

Hat man denn inzwischen auch die Kosten besser im Griff?

Ein gewisses Risiko bleibt immer, daran ändert auch die modernste Technik nichts. Die spektakulären Kostenüberschreitungen der Vergangenheit sind aber nicht nur auf technische und geologische Probleme zurückzuführen. Beim Furka-Tunnel beispielsweise war der ursprüngliche Kostenvoranschlag einfach viel zu tief. Für diese Summe konnte man den Durchstich gar nicht bauen.

Bei der aktuellen Diskussion um die NEAT muss man klar sehen, dass es neben geologischen Problemen auch Projektänderungen gab. Man realisiert etwas anderes als ursprünglich geplant, und das kostet je nachdem auch mehr. Beim Ceneri-Tunnel



ETH-Bauingenieur Felix Amberg gehört zu den führenden Tunnelbauern der Schweiz.

etwa war zuerst eine zweispurige Röhre vorgesehen. Aus Sicherheitsgründen werden nun zwei einspurige Röhren gebaut, und das kostet einfach mehr.

Die Kosten sorgen also zu unrecht für heisse Köpfe?

Wenn man im Untertagebau tätig ist, dann weiss man, dass Diskussionen um die Kosten offenbar zum Spiel gehören. Ich nehme das relativ emotionslos entgegen. Es trifft mich nur etwas im Berufsstolz, dass die Dis-

kussion nicht sachlicher geführt wird und eine ganze Ingenieurrichtung einfach als unfähig bezeichnet wird. Viele Tunnel der Bahn 2000 oder der Vereina-Tunnel wurden billiger gebaut als geplant. Doch das scheint einfach «courant normal» zu sein. Die Medien berichten nur, wenn es irgendwo Kostenüberschreitungen gibt. Diese ungleiche Wahrnehmung stört mich schon etwas.

Welches war denn, abgesehen von der Geologie, bisher die grösste Herausforderung beim Bau der NEAT?

Die grösste Herausforderung ist sicherlich die Logistik. In Sedrun wird an sechs verschiedenen Vortrieben rund um die Uhr gearbeitet. Das gesamte Material muss über einen 800 Meter tiefen Schacht rechtzeitig hinunter- und hinaufgebracht werden. Auch bei den anderen Vortrieben ist die Ver- und Entsorgung der zentrale Punkt. Die Arbeiter an der Tunnelbrust sollten ja möglichst nie warten müssen.

Wie sind die mittelfristigen Aussichten für die Schweizer Tunnelbauer?

Man darf sich keine Illusionen machen: Wenn die NEAT fertig gebaut ist, gibt es einen drastischen Rückgang. Ob die hiesigen Planer und Bauunternehmer dann fit sind für den internationalen Markt, muss sich weisen. Wir selber versuchen jedenfalls, bereits jetzt im Ausland zu bestehen, und haben inzwischen auch verschiedene Niederlassungen gegründet. Aber wir Schweizer Planer und Unternehmer sind im internationalen Wettbewerb im besten Fall nur mittlere Player. Unsere Stärke ist der Tunnelbau im Gebirge. In anderen Gebieten, die heute mindestens so wichtig sind – etwa der städtische Untertagebau oder das Bauen in weichen Böden –, fehlt uns hingegen noch Know-how. Das müssen wir zuerst im Ausland erwerben.

Ihre Firma betreibt auch Forschung. In welchem Rahmen muss man sich das vorstellen?

Wir haben Kontakte zu verschiedenen Hochschulen. Einerseits geschieht dies über die Tätigkeit in unserem Versuchsstollen Hagenbach bei Sargans. Zum anderen

realisieren wir im Bereich Messtechnik verschiedene Projekte zusammen mit Hochschulen. Beispielsweise haben wir mit der ETH einen Spritzbeton-Roboter entwickelt. Auch mit der EPF Lausanne oder dem Geoforschungszentrum Potsdam haben wir schon Projekte durchgeführt.

Wie sehen Sie die Ingenieurausbildung an der ETH?

Wenn man bedenkt, welchen Stellenwert das Bauingenieurwesen früher hatte und wie viele Studierende dieses Fach heute an der ETH belegen, dann kommt schon eine gewisse Wehmut auf. Es wurde offenbar sogar diskutiert, ob es an der ETH überhaupt noch ein Bauingenieurwesen braucht. Ich mache mir daher keine Illusionen, in welche Richtung sich dieses Fach entwickeln wird. Im Vergleich zu anderen Ländern, wo es eine Bergbautradition gibt oder der Untertagebau grundsätzlich gefördert wird, sind wir Bauingenieure als kleine Unterabteilung der ETH in der Schweiz relativ schwach repräsentiert.

Ist das für die Schweizer Unternehmen mittelfristig ein Problem?

Wir haben uns kürzlich in Singapur um ein grösseres Projekt beworben, und wir mussten zur Kenntnis nehmen, dass z.B. unsere Konkurrenten aus Norwegen ganz anders auftreten. Diese waren nicht nur durch Ingenieurfirmen vertreten wie wir, sondern verfügten auch über politische Unterstützung und Support durch Hochschulen. Auch in Österreich gibt es solche Koalitionen. Dort versucht man, den «österreichischen Tunnelbau» sozusagen als Marke in die Welt hinauszutragen. Im Vergleich dazu sind wir Schweizer wirklich bieder. Die Situation an der ETH ist da sicher nicht sehr hilfreich.

Was müssten wir denn anders machen?

Nun, ich will nicht sagen, der Zug sei abgefahren. Aber wir haben schon eine grosse Chance verpasst. Wir hätten in den Neunzigerjahren einen Schulterchluss machen sollen. Bauunternehmer, Planer, Bauherren und Hochschulvertreter hätten zusammen eine Kampagne starten müssen, um den Schweizer Untertagebau weltweit klarer zu

positionieren. Inzwischen ist der Lötschberg bereits auf der Zielgeraden, die Ausgangslage für eine solche Kampagne also nicht mehr so günstig. Und bis das nächste «Jahrhundertvorhaben» in der Schweiz realisiert wird, vergehen wohl noch etliche Jahre.

Interview: Felix Würsten

Zur Person

Felix Amberg, Jahrgang 1957, hat an der ETH Bauingenieur studiert und 1981 mit dem Diplom abgeschlossen. Seit 1994 ist er Inhaber der Amberg Engineering AG und der Amberg Messtechnik AG. Er ist zudem Mitinhaber und Verwaltungsratspräsident des Versuchsstollens Hagenbach in Flums. Amberg ist Vizepräsident der Fachgruppe für Untertagebau des SIA.

Die Amberg-Gruppe

Die Amberg-Gruppe besteht aus drei eigenständigen Firmen: Amberg Engineering AG befasst sich mit der Projektierung und Bauleitung von unterirdischen Infrastrukturen, sowohl bei Neubauten als auch bei bestehenden Tunneln. Die Firma Amberg Messtechnik AG entwickelt und baut Messgeräte und -systeme für den Untertagebau. Die dritte Firma, die Versuchsstollen Hagenbach AG, ist einerseits ein Prüflabor für mineralische Baustoffe wie Beton oder Fels. Andererseits besitzt die Firma in der Nähe von Flums eine Stollenanlage für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Untersucht werden etwa neue Sprengstoffe und Spritzbetonmischungen, aber auch Sicherheitsfragen in Tunneln. Die Amberg-Gruppe beschäftigt rund 180 Mitarbeiter und weist einen Umsatz von über 25 Mio. Franken aus.

TREFFPUNKT

GRÜNDUNGSFEIER IN BERLIN

Obwohl in Deutschland die meisten ehemaligen Studierenden der ETH ausserhalb der Schweiz zu finden sind, wurde erst im Herbst 2003 die Gründung einer eigenen Alumni-Landesgruppe konkret ins Auge gefasst. Nach einem Kick-off-Meeting Anfang Jahr konnte nun im Mai 2004 die Landesgruppe Deutschland offiziell gegründet werden. Zweck des Vereins ist die Förderung von Wissenschaft und Forschung sowie Bildung und Erziehung. Die Landesgruppe will insbesondere den Erfahrungsaustausch unter den Ehemaligen sowie den Dialog der ETH mit der Öffentlichkeit unterstützen.

Als erstes grosses Event steht nun am 2. Oktober 2004 die offizielle Gründungsveranstaltung auf dem Programm. Die Alumni aus der Schweiz sind dazu herzlich eingeladen! Die Teilnehmer erwartet ein attraktives Programm, das unter anderem auch einen Empfang in der Schweizer Botschaft vorsieht. Nach einem ersten infor-

mellen Zusammentreffen am Freitagabend findet am Samstag ab 15 Uhr die Gründungsversammlung mit anschliessendem Fest statt. Der Sonntag schliesslich steht für ein «Berlinprogramm» nach Wahl zur Verfügung.

Für die Gäste der Gründungsfeier konnten im Swissôtel in Berlin günstige Sonderkonditionen vereinbart werden. Das detaillierte Programm findet sich unter: www.alumni.ethz.ch/events/study_trip



ETH Alumni aus der Schweiz sind Anfang Oktober herzlich nach Berlin eingeladen. (Bild: Berlin Tourismus Marketing GmbH)

BUSINESS DINNER

Business Dinner mit Dr. Henri B. Meier, HBM BioVentures AG, Baar
Ohne Risikokapital kein Wachstum – ohne Wachstum Verteilungskämpfe

Die Schweizer Wirtschaft krebst seit zwei Jahrzehnten der Entwicklung Europas und Amerikas hinterher und ist von der Spitzenposition vor 50 Jahren ins Mittelfeld abgerückt. Setzt sich der Trend fort, ist die Schweiz in 25 Jahren Schlusslicht Europas. Ursachen und Lösungen werden aufgezeigt.

Henri B. Meier, Dr. oec. der Universität St. Gallen, begann seine Karriere in Venezuela. Nach einem neunjährigen Engagement für die Weltbank und die International Finance Corporation in Washington übernahm er in der Schweiz leitende Funktionen bei Motor Columbus und bei der Handelsbank National Westminster, Zürich. Von 1986 bis 2000 war er Mitglied der Roche-Konzernleitung.

Heute ist er Präsident des Verwaltungsrates der Givaudan SA und der HBM BioVentures AG.

ETH Alumni Business Dinner,
 Dienstag, 28. September 2004, 18.00–21.00 Uhr, ETH Zentrum, Dozentenfoyer

Business Dinner mit Johann N. Schneider-Ammann, Ammann Gruppe, Langenthal
Die Exportindustrie als volkswirtschaftliche Lokomotive?!

Johann N. Schneider-Ammann spricht über die Bedeutung der Industrie, die internen und externen Chancen und Risiken, welche die Lokomotive fahren oder eben nicht fahren lassen. Die Herausforderungen sind gross, es muss jetzt gehandelt werden!
 Schneider, dipl. El. Ing. ETH und MBA INSEAD, sammelte erste Berufserfahrungen

bei Oerlikon Bührle. 1981 trat er in die Ammann Unternehmungen ein. Nach fünfjähriger Leitung der U. Ammann Maschinenfabrik AG wurde er 1988 zum Vorsitzenden der Ammann-Gruppenleitung und zwei Jahre später zum Präsidenten und Delegierten des Verwaltungsrates berufen. Er ist Präsident der Swissmem und sitzt seit 1999 für die FDP des Kantons Bern im Nationalrat.

ETH Alumni Business Dinner,
 Montag, 25. Oktober 2004, 18.00–21.00 Uhr, ETH Zentrum, Dozentenfoyer

ETH Alumni

Vereinigung der Absolventinnen und Absolventen der ETH Zürich, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Tel. 01/632 51 00, Fax 01/632 13 29, info@alumni.ethz.ch, www.alumni.ethz.ch

