

# Erdwissenschaften in Zürich



# Inhaltsverzeichnis

Willkommen .....	2
Studium .....	4
erfa .....	7
Berufsbilder .....	8
<b>Geologisches Institut</b>	
Strukturgeologie und Tektonik.....	10
Klimageologie .....	12
Ingenieurgeologie .....	14
Erdoberflächendynamik .....	16
Paläontologie .....	18
Biogeowissenschaft .....	20
<b>Institut für Geochemie und Petrologie</b>	
Planetare Geochemie.....	22
Geochemie der Erdoberfläche .....	24
Mineralressourcen und Fluidprozesse .....	26
Magmatische Petrologie.....	28
Hochdruckgeologie .....	30
Experimentelle Mineralphysik .....	32
<b>Institut für Geophysik</b>	
Erd- und Planetenmagnetismus.....	34
Geophysikalische Fluidodynamik .....	36
Seismologie und Geodynamik .....	38
Seismologie und Wellenphysik .....	40
Explorations und Umweltgeophysik .....	42
Geothermische Energie und Geofluide .....	44
Schweizerischer Erdbebendienst .....	46
Fachgruppe Georessourcen Schweiz.....	49
Weiterbildung .....	50
<i>focusTerra</i> .....	51

# HERZLICH WILLKOMMEN

## Erdwissenschaften in Zürich

Herzlich willkommen in unserer Broschüre – sie beschreibt unsere Aktivitäten denen wir im wunderschön restaurierten Gebäude an der Sonneggstrasse im Herzen von Zürich nachgehen. Das Departement Erdwissenschaften D-ERDW an der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich strebt nach einem tieferen Verständnis aller Bereiche unseres Heimatplaneten – vom Inneren der Erde über die Kontinente, Ozeane und Biosphären bis hin zur Atmosphäre. Wir erforschen Erdmaterialien vom atomaren bis zum planetaren Massstab und versuchen, die Evolution des Planeten in der Vergangenheit ebenso zu verstehen wie die aktuellen und zukünftigen Prozesse. Dieses Verständnis ist von zunehmender Bedeutung für die Menschheit und hat immer mehr Einfluss auf das «System Erde» sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene. Die künftige Entwicklung der Erde was die Verfügbarkeit von geologischen Ressourcen wie Erdöl und frisches Wasser anbelangt aber auch die Lagerung von radioaktiven Abfällen oder Kohlendioxid sind Themen die nach Lösungen verlangen. Im Rahmen der sich verändernden Energiepolitik wurde am Departement ein neuer Lehrstuhl für Geothermie eingerichtet. Ausdruck dafür dass sich das D-ERDW und die ETH aktuellen Herausforderungen stellt und sich das D-ERDW innerhalb seiner Kompetenzen an der Gestaltung der Zukunft beteiligt.

Eine unserer wichtigsten Aufgaben ist es, die nächste Generation von Akteuren und Akteurinnen in der Wissenschaft, Technik, Politik und Administration auszubilden und auf die kommenden Herausforderungen der Zukunft vorzubereiten. Dies umfasst die natürlichen Ressourcen, den Schutz der Wasserversorgung, Naturgefahren, Energie Ressourcen, das Klima ebenso wie ökologische Herausforderungen, Altlasten und den Hoch- und Tiefbau vom Baugrund bis zum Tunnelbau. Unser Departement ist nach aussen gerichtet. Lehre und Forschung sind eng mit den Departementen Agrar, Umwelt, Bauingenieurwissenschaften sowie der Physik, Chemie und auch den Materialwissenschaften verbunden. Um den vielfältigen Herausforderungen der Zukunft gerecht zu werden bietet unser Studiengang den Studierenden einen praktischen und gleichzeitig grundlegenden naturwissenschaftlichen Unterricht. Das Studium wird durch den engen Kontakt mit der Forschung durch die Kooperation mit der Industrie sowie dank der Beziehung zu anderen Universitäten in der ganzen Welt bereichert.

Wir laden Sie ein, blättern Sie in der Broschüre und entdecken Sie mehr über die Arbeit unseres Departements.



Prof. Dr. Derek Vance, Departementsvorsteher

Welcome

# FORSCHUNG

Um unsere Ziele zu erreichen nutzen wir Laborexperimente umfangreiche Feldkampagnen Computersimulationen und Fernerkundungsmethoden zum Beispiel durch Satelliten Die Erde dient als Archiv, wir verwenden es, um globale Prozesse zu verstehen die oft schwierig zu entziffern sind Die Erkundung dieses Archivs das Felsen Tiefsee Sedimente und Eisplatten umfasst ist essentiell, um unsere aktuellen Probleme zu verstehen: «Die Vergangenheit ist der Schlüssel zur Zukunft»

Einige aktuelle und drängende Fragen, die die Erdwissenschaftler und Erdwissenschaftlerinnen der ETH Zürich zusammen mit den Forschenden an der Universität Zürich zu beantworten versuchen, sind:

- > Wie können die wesentlichen Bodenschätze tief unter der Erdoberfläche gefunden werden und wie lässt sich geothermische Energie in grossen Mengen gewinnen?
- > Warum sind Erdbeben in der Schweiz ein Thema, und warum ist es nicht möglich, den nächsten Steinschlag oder Bergsturz im Alpenraum vorherzusagen?
- > Wo können wir unseren Müll ablagern, und wie können wir neue Bauvorhaben und Verkehrswege realisieren, ohne Risiken für unser Grundwasser und für kommende Generationen zu schaffen?
- > Wie ist die Erde im Sonnensystem entstanden – und wie das Leben auf unserer Erde? Von der ersten DNA über Mikroben und Dinosaurier bis zu den ersten Menschen?
- > Was ist der Ursprung des Magnetfeldes der Erde, und wie können wir die Gefahr von Erdbeben und Vulkanausbrüchen einschätzen?
- > Was erzählen uns Meteoriten über die Entstehung von Planeten was ist die Geschichte des Mondes und der Erde?
- > Warum und wie entstanden die Alpen und andere Gebirge, und was bestimmt ihre Entwicklung und Topographie?
- > Wird der Golfstrom seine Intensität in tausend Jahren verlieren? Wird dies dazu führen dass Europa unter einer Eisdecke verschwindet oder wird sich die Atmosphäre aufwärmen und eine weltweite Überflutung verursachen? Was können wir angesichts dieser Situation tun?

Ziele



## Das Studium

### Warum Erd- und Klimawissenschaften studieren?

Das Studium vermittelt ein grundlegendes Verständnis aller Bereiche unseres Planeten auf akademischem Niveau. Hauptthemen sind die Entstehung und langfristige Veränderung des Systems Erde sowie die Wechselwirkungen zwischen festen Gesteinen, Ozeanen, Klima und Atmosphäre. Der Planet Erde dient dabei als Archiv. Gelehrt wird die Fähigkeit dieses zu erforschen und Prognosen für zukünftige Entwicklungen zu erstellen. Diese Arbeit wird immer bedeutender, da sie wesentlich dazu beiträgt, wie wir den grossen Herausforderungen rund um die Ressourcen, den Klimawandel und die radioaktiven Abfälle begegnen.

Das Studium der Erd- und Klimawissenschaften bietet eine praxisnahe und zugleich für die Schweiz einmalig breit abgestützte naturwissenschaftliche Hochschulausbildung.

### Voraussetzungen

Beste Voraussetzungen für das Studium sind ein breites Interesse an Naturwissenschaften sowie die Neugier, sich mit komplexen Fragen rund um das System Erde zu beschäftigen. Möchten Sie Erdmaterialien vom atomaren bis hin zum planetaren Massstab erforschen? Die Evolution des Planeten in der Vergangenheit ebenso wie die aktuellen und zukünftigen Prozesse verstehen lernen? Arbeiten Sie gerne mit Expertinnen und Experten aus anderen Bereichen zusammen und denken über die Grenzen der eigenen Disziplin hinaus? Dann sind Sie hier genau richtig.

ewegen Sie sich gerne im Feld, in der faszinierenden Natur? Interessieren Sie aber auch die technischen Möglichkeiten wie Computersimulationen? Die Erdwissenschaften bieten noch viel mehr: topmodern ausgerüstete Labors für Gesteinsdeformationen oder experimentelle Geochemie, aber auch die Möglichkeit, Grossbauten wie die Basistunnels in den Alpen, Brücken und Gebirgsbahnen mitzugestalten, Tiefbohrungen zu realisieren und die Tiefsee zu erkunden.

Grundlagen

# Auswahl

## Struktur des Studiums

### **Bachelorstudium**

Der Bachelor Studiengang in Erd- und Klimawissenschaften umfasst Theorie, Analytik und Methodik, Experimentieren sowie Praxis im Labor und Feld. In kleinen Gruppen erarbeiten die Studierenden mit Professorinnen und Professoren erdwissenschaftliche Fragestellungen und Zusammenhänge. In den sich über drei Semester erstreckenden Kursen «Integrierte Erdsysteme I – III» werden spezifische Themenkomplexe aus den Erdwissenschaften aufgegriffen und interdisziplinär bearbeitet. Mit verschiedenen erdwissenschaftlichen Methoden und praktischen Arbeiten wird das Verständnis ausgewählter Themen vertieft.

Im dritten Studienjahr werden den Studierenden zwei Vertiefungen zur individuellen Auswahl angeboten.

**Geologie und Geophysik:** Die Wahlvertiefung Geologie und Geophysik vermittelt ein grundlegendes Verständnis des Aufbaus, der Zusammensetzung und Struktur der Erde und anderer Planeten, sowie der Prozesse, die sie formten und auch heute noch formen. Diese Wahlvertiefung bietet einen idealen Einstieg für die Majors Geologie, Mineralogie und Geochemie, Ingenieurgeologie und Geophysik des Master- Studiengangs in Erdwissenschaften.

**Klima und Wasser:** Die Wahlvertiefung Klima und Wasser vermittelt ein vertieftes Wissen über die Wechselwirkungen zwischen Klima, Kryosphäre, Hydrosphäre und Wetter. Primäres Ziel der Klimatologie ist das Verständnis der Prozesse, die zum Klima und seinen Variationen führen. Die Hydrologie befasst sich mit praktischen Fragestellungen der Wasserwirtschaft und vermittelt Grundkenntnisse über den Wasserkreislauf und seine Beziehungen zu Klima, Vegetation, Boden und Gestein. Diese Wahlvertiefung bietet einen idealen Einstieg für den spezialisierten Master-Studiengang in Atmosphäre und Klima.

### **Masterstudium**

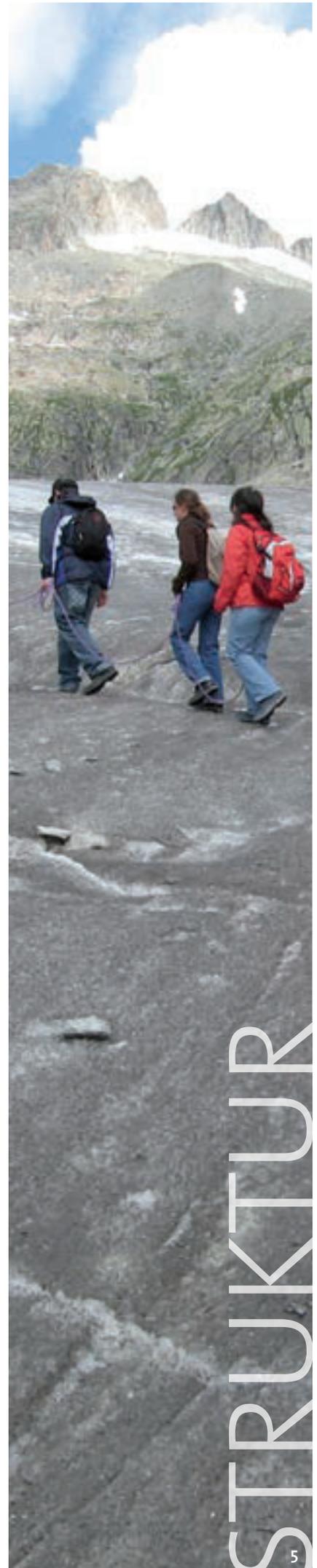
Das in der Regel zweijährige Masterstudium besteht zu je etwa einem Drittel aus Wahlpflichtfächern, frei wählbaren Fächern und der Masterarbeit. Angeboten werden drei verschiedene Master Abschlüsse:

- Master in Erdwissenschaften
- Joint Master in Applied Geophysics
- Master in Atmospheric and Climate Sciences

› Der **Master in Erdwissenschaften** ist eine breit gefächerte modulare Ausbildung, die auf die vielfältigen Aufgaben in der Wissenschaft oder Praxis auf hohem Niveau vorbereitet. Dabei können sich die Studierenden wahlweise in Majors genannten Vertiefungen auf Geologie, Mineralogie und Geochemie, Geophysik oder Ingenieurgeologie spezialisieren.

*Geologie:* Der Major in Geologie widmet sich der Geschichte unseres Planeten, seinem aktuellen Zustand und seiner Entwicklung in der Zukunft. Fokussierte Studien umfassen die Tektonik, Sedimentologie, Geomorphologie, Stoffkreisläufe und die Erdgeschichte einschliesslich der Evolution des Lebens und des Klimas der Erde.

*Geophysik:* Der Major in Geophysik widmet sich der Erforschung der Prozesse und Strukturen im Erdinneren, verbindenden Beobachtungen an der Oberfläche und der Modellierung der physikalischen Prozesse und Materialeigenschaften innerhalb unseres Planeten. Geophysiker suchen Antworten auf Fragen wie: Was treibt die Plattentektonik an? Wie ist das Magnetfeld der Erde entstanden? Wie, wo und wann entstehen Erdbeben, und wie können die Risiken vermindert werden?





*Mineralogie und Geochemie:* Der Major in Mineralogie und Geochemie vermittelt den Studierenden profunde Kenntnisse über Struktur und Eigenschaften der Materialien der Erde wie Steine, Mineralien und Flüssigkeiten. Dabei lernt man zu bestimmen welche Eigenschaften die geologischen Prozesse wie Magmatismus, Gebirgsbildung ildung von Energie und o-denschätzen beeinflussen.

*Ingenieurgeologie:* Der Major in Ingenieurgeologie befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen Mensch baulichen Anlagen und Geologie Die Studierenden lernen die Geologie vor Ort in Form eines umfassenden geotechnischen oder hydrogeologischen Modells zu charakterisieren und eine gezielte Standortuntersuchung durchzuführen.

- > Der **Joint Master in Applied Geophysics** ist ein hochschulübergreifender Studiengang zwischen der ETH Zürich der TU Delft und der RWTH Aachen Die Studierenden besuchen Lehrveranstaltungen an allen drei Hochschulen. Die Ausbildung umfasst die Exploration und Gewinnung von Rohstoffen, die Geothermalenergie und die Umwelt und Ingenieurgeophysik
- > Der **Master in Atmospheric and Climate Science** wird gemeinsam mit den Umweltnaturwissenschaften angeboten Die Unterrichtsmodule sind: Wettersysteme und atmosphärische Dynamik, Klimaprozesse und klimatische Wechselwirkungen, atmosphärische Zusammensetzung und Kreisläufe, Klimageschichte und Paläoklimatologie, Hydrologie und Wasserkreislauf

#### **Doktorat**

Das Doktorat besteht aus einer weitgehend selbständigen Forschungsarbeit an der Front globaler erdwissenschaftlicher Erkenntnisse. Sie ist die Voraussetzung für eine akademische Karriere – viele Absolvierende wählen nach Abschluss des Doktorats aber auch eine Laufbahn in der Industrie der öffentlichen Verwaltung oder in Planungs oder eraturungsbüros Für die Doktorarbeit und der damit zusammenfallenden Doktoratsausbildung erhalten die Doktorierenden in der Regel eine auf drei bis vier Jahr beschränkte Anstellung als Assistent oder Assistentin in ihrer Forschungsgruppe.

Das Studium der Erdwissenschaften, insbesondere der Masterstudiengang und das Doktorat lassen sich kombinieren mit einer wissenschaftlichen Ausbildung an anderen Universitäten wie der Universität Zürich oder den Mitgliedern der europäischen IDEA League – RWTH Aachen, TU Delft Imperial College London und Technische Universität Paris Ferner besteht ein intensiver Austausch in Forschung und Lehre zwischen dem Departement Erdwissenschaften und führenden Forschungsuniversitäten in Nordamerika wie dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston und anderen Ivy League Institutionen wie dem TIT in Tokio und Singapur

#### **Berufsfelder**

Ein paar der vielfältigen Berufsmöglichkeiten sind auf den Seite 8 und 9 aufgeführt

Aussichten



## Erdwissenschaftlicher Fachverein – erfa



Der Erdwissenschaftliche Fachverein kurz erfa bildet innerhalb des Departements Erdwissenschaften die Vertretung der Studierenden. Er ist also das Bindeglied zwischen der Departementsleitung und den Studierenden. Der erfa pflegt gute Kontakte mit den Fachvereinen anderer Departemente sowie mit dem Dachverband der Fachvereine (VSETH) selber. Dies ermöglicht der Vereinigung, nicht nur immer auf dem Laufenden zu sein, sondern bietet auch die Chance mitzureden, wenn es um die Zukunft der ETH und des Departements Erdwissenschaften geht. Bei Problemen und Unklarheiten von Seiten der Studierenden ist der erfa die erste Anlaufstelle. Er bietet allgemeine, aber auch individuelle Unterstützung an oder leitet die Studierenden an die entsprechenden richtigen Stellen weiter.

Damit sich die Studierenden innerhalb des Studienganges besser kennenlernen und den Kopf vom stressigen Studienalltag lüften können, veranstaltet der erfa jede Menge Anlässe. Die Palette reicht von mehrtägigen geologischen Exkursionen über gesellschaftliche Events an der ETH bis zu Anlässen für Gaststudenten und Erstsemestrige, um diese im Gemenge der Erdwissenschaften integrieren zu können.



Ein Beispiel dazu ist die erfa Trophy welche immer Anfang Herbstsemester stattfindet. Bei dieser Veranstaltung absolviert man in Gruppen sportliche, geologische sowie künstlerische Aufgaben mit dem Ziel, am Ende mit einer möglichst hohen Punktzahl einen Platz auf dem Podest zu erkämpfen. Zudem lädt der erfa jedes Jahr Vertreter und Vertreterinnen aus verschiedenen erdwissenschaftlichen Berufsfeldern ein, um ausführlich über ihre Tätigkeit zu berichten. Dies ermöglicht den Studierenden schon früh spezifische Informationen über mögliche Laufbahnen nach Abschluss des Studiums zu unterhalten.

Der erfa dient ausserdem als Vermittlungsstelle für ausgeschriebene Praktika und Doktoratsstellen und informiert seine Mitglieder über diverse Nebenjobs mit Verdienstmöglichkeiten.





**Sarah Signorelli**  
Dr. sc. ETH Zürich  
Projektleiterin bei  
Geowatt AG

## Berufsbilder

### Warum ich Erdwissenschaften studiert habe

Ich wollte schon immer wissen wie die Erde funktioniert. Ein Lehrer hat mich auf das Studium Erdwissenschaften an der ETH aufmerksam gemacht. An einem Maturandentag habe ich mir dann das Departement angeschaut. Mich überzeugte die breite Grundausbildung die Einblick in die verschiedenen Sparten der Erdwissenschaft gibt.

### Was ich heute mache

Ich plane Geothermieanlagen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden, wie beim Campus Science City der ETH. Ich bin das Bindeglied zwischen Untergrund und Haustechnik. Ich simuliere die Anordnung und Tiefe der benötigten Erdwärmesonden und gebe die nachhaltige thermische Bewirtschaftung vor. Ich organisiere und überwache alle Gewerke von den Bohrungen bis zum Eintritt in die Heizzentrale.

### Wie meine Zukunftspläne aussehen

Seit ich Kinder habe, arbeite ich Teilzeit. Trotzdem ist es mir möglich, weiterhin Grossprojekte zu betreuen da wir im Team arbeiten. Eine Karriere im klassischen Sinne ist in einer kleinen Firma mit sehr flacher Hierarchie, wie wir es sind, beschränkt möglich. Dies ist mir aber auch nicht wichtig. Ich hoffe viel mehr dass ich auch in Zukunft so interessante Projekte betreuen und zusammen mit meinen Kollegen gute Lösungen für die nachhaltige Nutzung der Erde erarbeiten kann.



Zu Sarah Signorellis Aufgaben gehört auch die Bauüberwachung vor Ort.



Der Bleigehalt in einer Bodenprobe wird mit einem mobilen Röntgen Fluoreszenz Gerät gemessen

### Warum ich Erdwissenschaften studiert habe

An Weihnachten 1999 habe ich den Orkan Lothar miterlebt und am Ufer des Zürichsees zugeschaut wie die Gischt in die Luft gewirbelt wurde. Ich war fasziniert und wollte mehr erfahren, wie die Natur funktioniert. Ich wollte einmal einen Job haben, der mich drinnen und draussen arbeiten lässt und genug Abwechslung im Arbeitsalltag bietet. Die Aussichten auf eine solche Arbeit schienen mir mit einem Erdwissenschaftsstudium gegeben.

### Was ich heute mache

Ich bin Geologe bei der Dr. Heinrich Jäckli AG, einem Geologiebüro in Zürich. Meine Arbeit reicht von Untersuchungen im Bereich Altlasten über Grundabklärungen oder der Erstellung von geologischen Spezialkarten bis zu der Einleitung von Massnahmen für den Trinkwasserschutz. Dazu trifft man mich auf Baustellen über und unter Tage, draussen im Feld, im Büro oder an Besprechungen zwischen Ämtern und Auftraggebern, wo wir oft die Rolle des Vermittlers übernehmen. Der Arbeitsalltag ist äusserst vielseitig und abwechslungsreich.

### Wie meine Zukunftspläne aussehen

Mein Ziel in naher Zukunft ist es so viele unterschiedliche Projekte bearbeiten zu können wie möglich. Die Vielfalt ist riesig. Insbesondere die Themen Geothermie oder Naturgefahren möchte ich nun an konkreten Aufträgen besser kennenlernen. Dies wird mir in Zukunft ermöglichen auch grössere, themenübergreifende Projekte leiten zu können.



**Christian Frei**  
Geologe beim Geologiebüro Dr. Heinrich Jäckli AG, Zürich

# Interview

## Warum ich Ingenieurgeologie studiert habe

Als Ingenieurgeologe hat man sowohl eine breit gefächerte Grundausbildung als auch ein sehr fachspezifisches Studium im Bereich der angewandten Geologie. Am meisten fasziniert am Studium hat mich die sehr praxisbezogene Ausbildung. An zahlreichen Exkursionen und in Feldkursen wurde das während der Vorlesungen gelernte direkt in der Praxis angewendet, so dass man für den späteren Berufsalltag bestens vorbereitet wird.

## Was ich heute mache

Nach dem Studium zog es mich zurück ins Wallis wo ich heute bei der Odilo Schmid & Partner AG als Ingenieurgeologe tätig bin. Als Sachbearbeiter oder Projektleiter befasse ich mich mit der Erstellung von geologisch geotechnischen Ausgangsgutachten verschiedenen Mandaten im Bereich Strassen und Dammbau, der Erarbeitung von Gefahrenkarten oder der Ausscheidung von Quellschutzzonen. Des Weiteren gehören die Durchführung von Feldversuchen sowie das Zeichnen mit GIS- oder CAD-Software zu meinem Tätigkeitsbereich.

## Wie meine Zukunftspläne aussehen

Nach einem Jahr bei der Odilo Schmid & Partner AG erhielt ich die Gelegenheit zur Beteiligung in der Aktiengesellschaft. Dieser Entscheid war sicherlich wegweisend für die Planung meiner Zukunft in einem dreiköpfigen Geologenteam.



Sicherheit für komplexe Grabungen – mit einer Stützmauer aus Spritzbeton



Kontrolle am Trenntisch für die Dichtentrennung der metallischen Fraktion.

## Warum ich Erdwissenschaften studiert habe

Die physikalischen Phänomene, welche die Natur beeinflussen, haben mich schon immer interessiert. Der Zufall wollte es, dass ich eines Tages einer Lektion in Vulkanologie folgte, wo unter anderem erklärt wurde, wie eine vulkanische Explosion zustandekommt. Ich erinnere mich, als wäre es gestern gewesen, an das Bild in einem Buch. Dargestellt wurden die physikalischen und rheologischen Eigenschaften der Materialien, die den Ursprung eines spektakulären Vulkanausbruches bilden. Durch das Studium der Erdwissenschaften habe ich Antworten auf viele meiner Fragen gefunden – und vor allem habe ich eine Welt von faszinierender Schönheit entdeckt – die unsere.

## Was ich an meiner Arbeit am meisten mag

Mein aktueller Job ist sehr interessant und ermöglicht es mir, ja zwingt mich, die einzelnen Probleme aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten. Die Erdwissenschaften erfordern eine multidisziplinäre Sicht, aufmerksam und mit offenen Augen durchs Leben zu gehen und bereit zu sein, jede noch so kleine Nuance aufzufangen. So bietet mir jeder Tag neue Herausforderungen.

## Wie meine Zukunftspläne aussehen

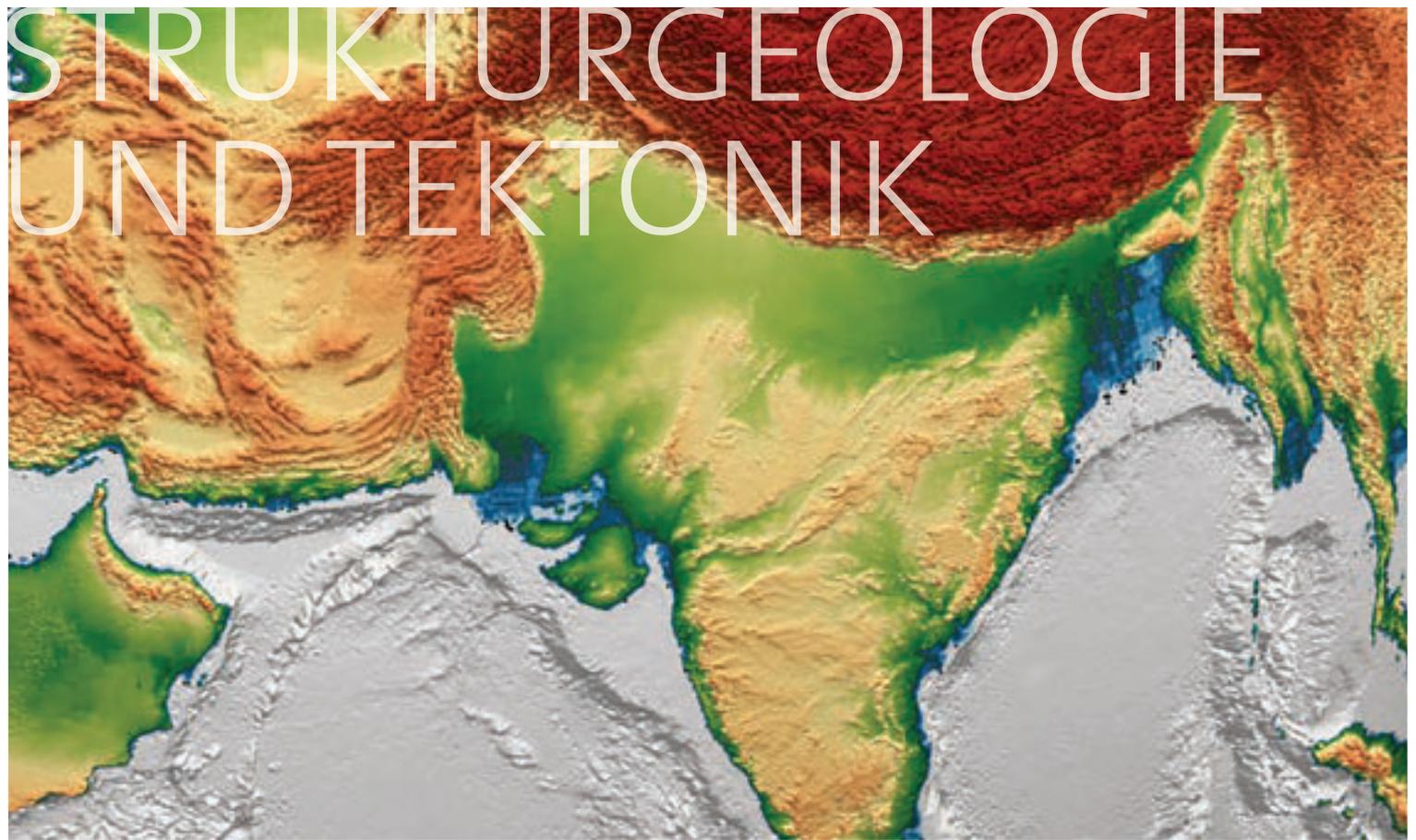
Die tägliche Arbeit erlaubt es mir, unzählige Fähigkeiten zu erlernen und mit Leuten aus der Industrie, der Wissenschaft und von den Behörden zusammenzuarbeiten. Für die Zukunft plane ich weiter an aktuellen Themen im Bereich der Energie und dem Einsatz nachhaltiger Materialien zu arbeiten.



**Michael Ruppen**  
MSc Ingenieurgeologie  
ETH Zürich  
Ingenieurgeologe  
bei der Firma OSPAG  
– Odilo Schmid &  
Partner AG



**Paola Ardia**  
Dr. sc. ETH Zürich  
Projektleiterin  
Mineralische Rohstoffe  
beim Zentrum für  
nachhaltige Abfall-  
und Ressourcennutzung  
ZAR, Hinwil



Alpine Himalayan mountain belt colored by topographic relief

## Strukturgeologie und Tektonik

# Kräfte

Die Forschung in der Gruppe Strukturgeologie und Tektonik unter der Leitung von Prof. Whitney konzentriert sich auf die sich schnell verformenden Zonen, die die tektonischen Plattengrenzen der Erde definieren und viele der geologischen Naturgefahren des Planeten erzeugen. Uns interessieren die Raten und Richtungen, in denen sich Brüche und Scherzonen bewegen, ihre Geometrien, Breiten und mechanischen Verhaltensweisen in der Tiefe sowie die Prozesse, die sie im Laufe der geologischen Zeit prägen.

Unsere Forschung hat weitreichende Auswirkungen:

- Über menschliche Zeitskalen hinweg ist beispielsweise die Quantifizierung der Rutschraten von Brüchen in aktiven tektonischen Umgebungen entscheidend für die Beurteilung des seismischen Risikos für Menschen und Eigentum.
- Beobachtungen des tiefen Ursprungs von Brüchen geben Hinweise darauf, wie sie von unten belastet werden und wie sie während zehn bis tausendjähriger seismischer Zyklen miteinander interagieren können.
- Das Verständnis der mechanischen Eigenschaften und Geometrien von Scherzonen, über Millionen von Jahren hinweg, hilft uns, die Kräfte zu begrenzen, die die prominente Topographie der Erde bestimmen: z. B. ihre Gebirge, kontinentale und ozeanische Grabenzonen sowie ozeanische Becken und Gräben.

Für die Erforschung dieser Themen verwenden wir eine Reihe von Werkzeugen und Techniken wie Feldbeobachtungen, analytische Messungen, Laborexperimente und numerische Modelle. Wir gehen Forschungs-Zusammenarbeiten ein und verbinden fachübergreifende Datensätze u. a. aus der Strukturgeologie, Petrologie und Geochemie, experimenteller Gesteinsmechanik, Oberflächenprozessen, Seismologie und Geodynamik.

Einige spezifische Themen der laufenden Forschung der SGT Gruppe sind:

*Aktive Tektonik und der Erdbebenzyklus.* Eine Frage, die für das Verständnis der Erdbebengefahr von grundlegender Bedeutung



Studenten untersuchen gefaltetes Gestein aus einer Scherzone auf der Insel Syros in Griechenland

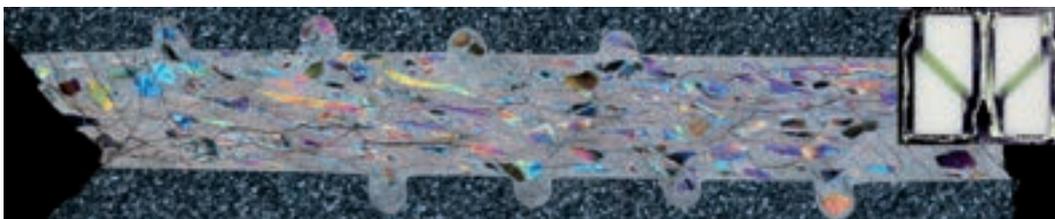
ist ist die Frage, ob sich Verwerfungen stetig oder im Laufe der Zeit in «Sprüngen» bewegen. Die Antwort auf diese Frage ist wichtig, denn sie sagt uns, ob die Erdbebenaktivität an einzelnen Verwerfungen empfindlich auf lokale Störungen reagiert, wie z. B. Aktivität bei benachbarten Verwerfungen, klimatisch bedingte Änderungen der Belastung einer Verwerfung oder Wechselwirkungen mit Krusten- oder Mantelverformungen am Ursprung der Verwerfung. Um diese Frage zu beantworten, messen wir sowohl den Offset als auch das Alter der versetzten geomorphen Merkmale, die entlang der krustalen Verwerfungszonen erhalten bleiben.

*Lokalisierung der Dehnung in der duktilen Lithosphäre.* Ein weiterer kritischer Aspekt des Verständnisses von Verwerfungen ist, zu bestimmen, was sie in der Tiefe unterhalb der seismogenen Schicht der oberen Kruste werden. Zum Beispiel, ob sie ihre Ausprägung als lokalisierte Zonen den ganzen Weg durch die Lithosphäre hindurch beibehalten, oder ob sie stattdessen in einer bestimmten Tiefe innerhalb der Lithosphäre zu einer verteilten duktilen Verformung werden. Eine der Möglichkeiten, wie wir dieses Problem betrachten können, ist die Untersuchung von Krusten- und Mantelgesteinen, die durch vulkanische oder tektonische Prozesse an die Oberfläche gebracht werden. Wir können dieses Problem auch durch Gesteinsdeformationsexperimente untersuchen, indem wir die Bedingungen für hohen Druck, hohe Temperatur und hohe Dehnung der Erdlithosphäre im Labor reproduzieren.



Versetzte geomorphe Merkmale entlang der San-Andreas-Verwerfung in Südkalifornien

*Die Rolle von Heterogenitäten in Verwerfungszonen.* Eine Vielzahl neuer Instrumentierungen und Überwachungen aktiver Verwerfungszonen zeigt, dass das seismische Verhalten von Verwerfungen sehr vielfältig ist – Verwerfungen können bei schnellen Erdbeben, langsamen Erdbeben, in winzigen Ausbrüchen, die als «tektonisches Zittern» bezeichnet werden, oder aseptisch auftreten. Erklärungen für dieses Spektrum des Scherverhaltens erfordern eine signifikante Heterogenität der Gesteinsarten entlang der Störzonen. Die SGT Gruppe verwendet eine Vielzahl von Feld-, mikrostrukturellen und experimentellen Beobachtungen, um die Arten von Heterogenitäten zu identifizieren, die das unterschiedliche seismische Verhalten an Verwerfungen charakterisieren.



Beispiel eines Gesteinsverformungs-Experiments, welches mit dem Mantelmineral Olivin durchgeführt wurde

*Unterirdische Felslabore.* Die Gruppe Strukturgeologie und Tektonik beteiligt sich an Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien, die in den Schweizer Untertagelabors (z. B. Bedretto Lab) durchgeführt werden. Die Forschungsschwerpunkte liegen auf Fluid-Gestein gekoppelten Prozessen unterschiedlicher Grössenordnung, die für Tiefenlagerstätten relevant sind. Durch experimentelle Forschung und Feldstudien charakterisiert die SGT-Gruppe das potenzielle Zielvolumen für die Geothermieproduktion. Die SGT Gruppe ist auch im Bereich des Klimawandels und der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen tätig mit Hilfe von Untersuchungen an Deckgesteinen und Speicherformationen, die für eine sichere Kohlenstoffspeicherung günstig sind.



Whitney Behr



# Klimageologie

Klimageologen untersuchen wie das Klimasystem der Erde auf die unterschiedlichen Klimafaktoren in der Vergangenheit reagiert hat. Informationen dazu erhalten wir aus den Archiven der Erde wie Stalagmiten oder Fossilien in See- und Meeresablagerungen. Diese Archive erklären wie das Klimasystem der Erde funktioniert und helfen, Voraussagen für das anthropogen veränderte Klima der Zukunft zu machen.



## Wie schwierig ist es die Eisdecke von Grönland zu schmelzen?

Vor 125000 Jahren ist die Eisdecke Grönlands auf die Hälfte der heutigen Ausdehnung zusammengeschmolzen und der Meeresspiegel um mindestens 5 m angestiegen.

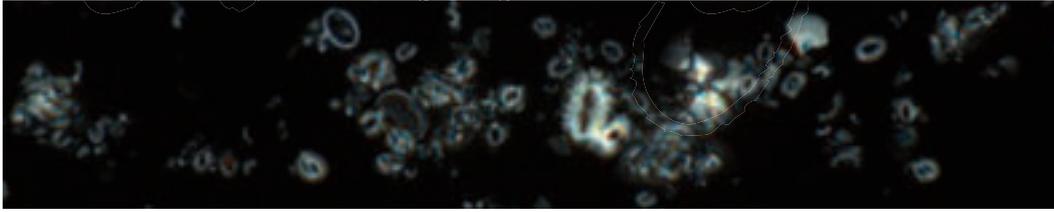
Wir versuchen herauszufinden, wie Veränderungen in Sonnenenergie, Treibhausgaskonzentrationen und Meeresströmungen dazu beigetragen haben.

Dabei helfen uns Stalagmiten, die in Höhlen im Nordwesten Spaniens während der letzten vielen hunderttausend Jahren wuchsen. Jedes Jahr lagern Stalagmiten eine neue dünne Mineralschicht an. Jede dieser datierbaren Schichten hat eine eigene Zusammensetzung an Isotopen und Elementen. Daraus können wir Ausdehnung der grossen Eisdecken, Temperatur und Niederschlagsmenge während der Ablagerung jeder Schicht ablesen. In Kombination mit der berechneten Sonnenenergie, welche sich aufgrund der Umlaufbahn der Erde um die Sonne verändert, erhalten wir Hinweise auf das damals herrschende Klima.

Wir können auch untersuchen, wie sich das Abschmelzen der Eisschilde auf die Meeresströmungen im Nordatlantik auswirkt, welche wiederum das Klima beeinflussen. Da die grönländische Eisdecke anfällig für anthropogene Klimaerwärmung sein könnte, würden diese Ergebnisse helfen, das zukünftige Klima und die Höhe des Meeresspiegels vorauszusagen.



# Veränderung



Heather Stoll

## Wie sensibel reagiert das Erdklima auf Veränderungen im atmosphärischen CO<sub>2</sub>?

Baumpollen in der Antarktis und Hinweise, dass die Temperatur des Ozeans um Neuseeland 26°C betragen hat, legen nahe, dass die Erde vor 50 Millionen Jahren viel wärmer war als heute. Dann, vor etwa 33 Millionen Jahren, begann die antarktische Eisdecke zu wachsen, vermutlich durch die Abnahme im atmosphärischen CO<sub>2</sub> Gehalt. Um dies zu bestätigen, suchen wir nach verbesserten Möglichkeiten um den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Vergangenheit zu bestimmen.

Fossile Meeresalgen, welche CO<sub>2</sub> für die Photosynthese benötigten, widerspiegeln in ihrer chemischen Zusammensetzung die damals herrschenden CO<sub>2</sub>-Bedingungen der Atmosphäre. Mit Hilfe ihrer mikroskopisch kleinen Fossilien, welche wir aus Sedimentkernen gewonnen haben, ist es uns gelungen, einen bis dato unbekanntes CO<sub>2</sub> Rückgang zu entdecken, der für eine starke Abkühlung zwischen 10 und 6 Millionen Jahren verantwortlich war.

Auch Grösse und Form der Fossilien zeigen Anpassungen an die herrschende CO<sub>2</sub>-Konzentration. Mit hochauflösenden Mikroskopen und Digitalkameras vermessen wir die Grösse und Dicke der Kalkschalen, welche die Algen einst umhüllten. Mit Hilfe neuer Methoden versuchen wir die globalen Ozeantemperaturen für Zeitperioden mit hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu rekonstruieren.

Um besser zu verstehen wie Meeresalgen CO<sub>2</sub>-Bedingungen aufzeichnen und sie sich an wechselnde CO<sub>2</sub> Konzentrationen anpassen, züchten wir Meeresalgen in einer experimentellen Wachstumskammer unter verschiedenen CO<sub>2</sub>-, Licht- und Nährstoffbedingungen.



## Wie heiss war es vor 50 Millionen Jahren auf dem Festland von Amerika?

Die Rekonstruktion der Temperaturen auf dem Festland in der Vergangenheit ist eines der grössten Probleme der Paläoklimaforschung. Archive der terrestrischen Sedimente sind selten zu finden und schwierig zu interpretieren. Wir arbeiten daran, ein neues «Paläothermometer» zu entwickeln, welches verlässlichere Temperaturrekonstruktionen ermöglicht.

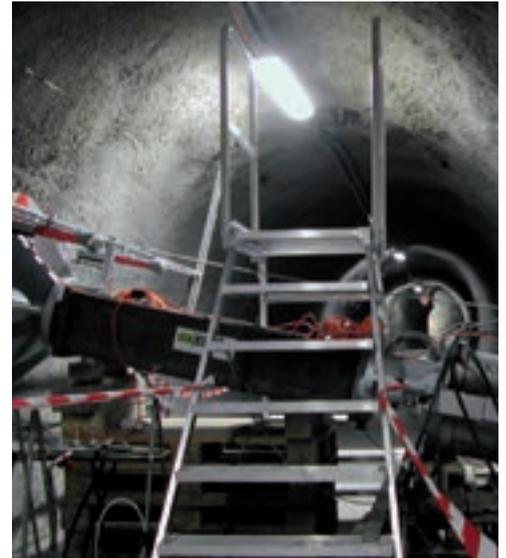


# Ingenieurgeologie

Die Ingenieurgeologie ist ein Zweig der Angewandten Geologie und der Geotechnik, also in- deglied zwischen den Geowissenschaften und dem Ingenieurwesen. Sie befasst sich mit dem oberflächennahen Verhalten von Locker- und Festgesteinen, ihren geologischen Strukturen und ihren mechanischen und hydraulischen Prozessen und Eigenschaften. Die Ingenieurgeologie dient letztlich der Nutzung und auch dem Schutz der oberen Bereiche der Erdkruste und liefert eiträge zur Erstellung von Bauwerken (Tunnels Brücken, Gebäude, Talsperren Deponien) zur Nutzung von oberflächennahen Rohstoffen (Grundwasser Geothermie und mineralische Roh- stoffe) sowie zum Schutz vor Naturgefahren wie Felsstürzen, Rutschungen und Murgängen



Durch Rutschung zerstörte Strasse in Edmonton.



Plattendruckversuch im Felslabor Mont Terri.

Für diese Aufgaben braucht es nicht nur fachspezifisches erdwissenschaftliches Know-how sondern auch Kenntnisse aus verschiedenen Ingenieurdisziplinen: Die Fels- und Bodenmechanik gehören ebenso zu den Grundlagen der Ingenieurgeologie wie die Grundwasserhydraulik, Fern erkundung und Geodäsie. Geologische Feldarbeit und spezialisierte in situ Untersuchungen stellen bei den meisten Projekten die ersten wichtigen Schritte der Datenerfassung dar welche anschliessend durch Laborversuche ergänzt und durch prozess- und problemgerechte Modell- rechnungen interpretiert werden.



Bohrloch-Logging in Aquifer in Mallorca.



Bohrloch-Logging in Felsrutschung in Norwegen.

< Installation von Steinschlagnetzen oberhalb der A13.

# Industried

Im Zentrum der Forschungsarbeiten von Simon Löw stehen geomechanische und geohydraulische Prozesse in geklüfteten Festgesteinen. Löw untersucht mit seiner Gruppe das progressive Bruch- und Verformungs-Verhalten solcher Gesteinsmassen in tiefen Untertagebauwerken wie Tunnels, Bergwerken und geologischen Tiefenlagern sowie in instabilen Talflanken. Seine Gruppe widmet sich auch der Identifizierung und dem Fluss von Grundwasser und Wärme in Gebirgen und in grösseren Siedlungsräumen sowie der Nutzung von tiefer geothermischer Energie.



Simon Löw

Aktuelle Beispiele von Forschungsprojekten der Gruppe umfassen hydro-mechanisch gekoppelte Prozesse um Untertagebauwerke (Setzungen über den tief liegenden Basistunnels am Gotthard und Lötschberg, Bruchbildung und Deformation in Auflockerungszonen um geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle), natürliche hydro-mechanisch und thermo-mechanisch gekoppelte Prozesse der progressiven Gebirgsentfestigung in Talflanken (langfristige Entwicklung und Auslösung von grossen Hanginstabilitäten), Prozesse und Methoden zur Nutzung geothermischer Energie (Stimulation von EGS Systemen, anthropogene Wärmeinseln) und zur geologischen Entsorgung von CO<sub>2</sub>. Obwohl diese Themen ein weites Feld praxisrelevanter Fragen abdecken, lassen sie sich mit einem methodisch klar fokussierten Katalog von Prozesskenntnissen und Methoden untersuchen. Dieser Katalog umfasst wiederum die geomechanischen und geohydraulischen Prozesse geklüfteter Festgesteine und die entsprechenden Untersuchungsmethoden im Feld, Labor und Modell. Die Projekte haben einen Schwerpunkt in den Alpen der Schweiz. Es werden aber auch detaillierte Prozessstudien in anderen Regionen der Welt durchgeführt wie dem Jabal Akhdar Gebirge in Oman, dem Skandinavischen Gebirge in Norwegen und den Anden in Chile.



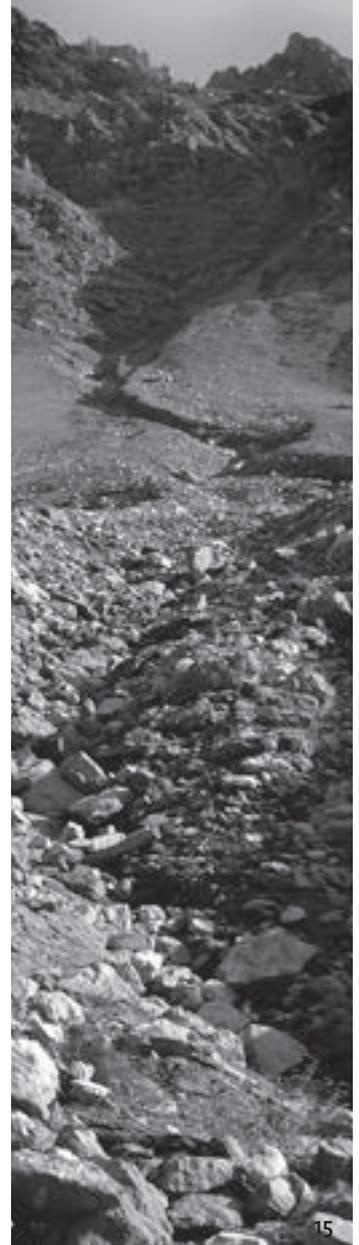
Exkursion auf einer Baustelle des Gotthard-Basistunnels.



Der Baustellengeologe von Sedrun in Diskussion mit den Ingenieuren.

Die Gruppe von Simon Löw verfügt über ein umfassendes Instrumentarium von entsprechenden Feldgeräten und entwickelt zusammen mit Spezialisten eigene höchstpräzise Monitoringsysteme. Die Gruppe verfügt über eigene Teststandorte (Randa, Mels, Furka) und nutzt zusammen mit Partnern das Felslabor Mont Terri in St. Ursanne für grosse Forschungsvorhaben.

Simon Löw ist in den oben beschriebenen Bereichen zudem als wissenschaftlicher Berater tätig. So wirkt er seit bald 20 Jahren als Experte für die Basistunnels am Gotthard und Lötschberg. Seit 2008 präsidiert er die nationale Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT (früher KNE), die als unabhängige Kommission die Aufgabe hat, die Bundesbehörden in geologischen und sicherheitstechnischen Fragen der nuklearen Entsorgung zu unterstützen.



# ERDOBERFLÄCHEN- DYNAMIK



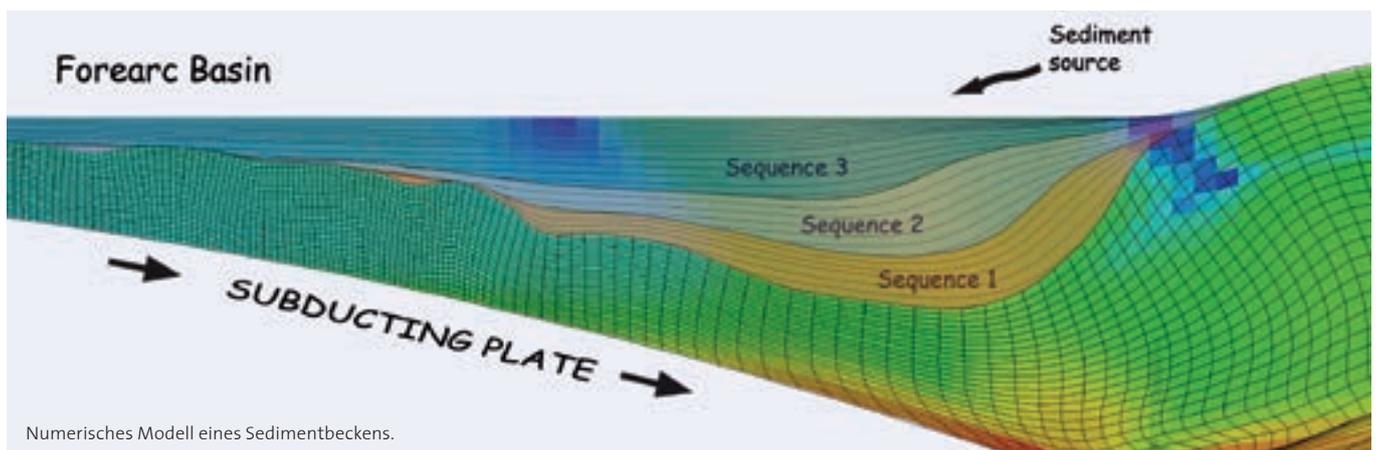
Marmorschlucht in Taiwan.

## Erdoberflächendynamik

Sean Willett und die Gruppe Erdoberflächendynamik (Earth Surface Dynamics, ESD) erforschen die verschiedenen Prozesse, die gemeinsam für die Form, Landschaftsentwicklung und Geologie der Erdoberfläche verantwortlich sind. Der Schwerpunkt der Gruppe liegt dabei auf dem Studium oberflächennaher Prozesse sowie den Einflüssen von Tektonik und Klima, welche die Schichten der Erde deformieren oder Erosionsprozesse, durch die die Landschaft geformt werden. Gebirge sind das beste Beispiel für dieses System: Sie entstehen, wo Kontinente kollidieren. Hohe Gebirge sind durch die raue Witterung starker Erosion und Abtragung ausgesetzt. Der Abtragungsschutt wird in den sie umrandenden Becken abgelagert. So entsteht ein Geschichtsarchiv des Gebirges. Die ESD Gruppe beschäftigt sich mit all diesen

Prozessen der kontinentalen Kollision, der tektonischen Gebirgsbildung der Erosion, der Sedimentproduktion ebenso wie mit dem Transport dieser Sedimente.

Die Wissenschaftler wenden eine Vielzahl von Techniken an, um diese Systeme zu studieren. Dazu gehören u. a. die numerische Modellierung, Feldarbeit und geochemische Analysen. Die Computer-Modellierung von tektonischen und geomorphologischen Prozessen spielt eine besonders wichtige Rolle. Durch die Darstellung der tektonischen Prozesse, welche die Topographie schaffen und der Erosionsprozesse, die sie zerstören können, die Forschenden analysieren, wie die Landschaft entstanden ist. Komplexe Computer Codes ermöglichen es, den Einfluss von der



Numerisches Modell eines Sedimentbeckens.

Verformung der Lithosphäre, von Erosionsprozessen oder von verschiedenen klimatischen und tektonischen Steuerfaktoren auf die Landschaft im Detail nachzubilden und zu testen. Feldarbeit ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der ESD-Forschung. Durch das Studium von Geomorphologie und Landschaft werden Fluss, Wind und Gletscherprozesse betrachtet und quantifiziert, die die Landschaft formen. Die abgelagerten Sedimente rund um die Berge sagen viel darüber aus, wie sich ein Relief durch Erosion gebildet hat und auch einiges darüber, wie die Becken entstanden sind, in denen die Sedimente liegen. Die Sedimentanalyse verlangt nach einer Reihe von analytischen Verfahren. Vor allem die Altersdatierung von Phasen, in denen sich die Erde abgekühlt hat, ist wichtig, um zu bestimmen, wann und wo die Sedimente während der Erosion entstanden sind. Diese Messungen werden mit verschiedenen geochemischen Methoden vorgenommen.



Sean Willett



Junge Ablagerungen im Gebirge Taiwans

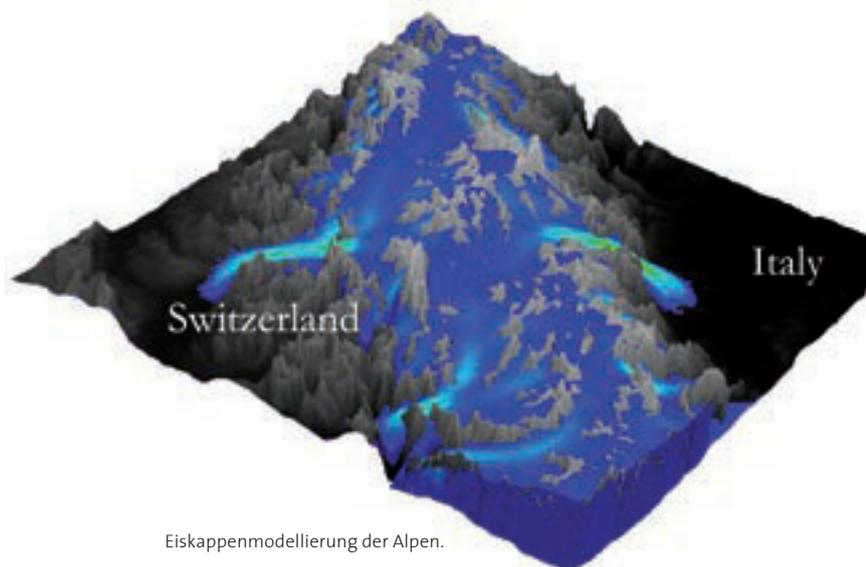


Studenten bei der Feldarbeit in Italien.

Mit der geochemischen Analyse der Minerale in Sedimenten lässt sich die Herkunft der Sedimente bestimmen. Mit Tieftemperaturmethoden wie der Spaltspurendatierung wird das Alter der Sedimente eruiert. Neue Methoden der Oberflächendatierung mit Isotopen, welche sich durch kosmische Strahlung gebildet haben, sind ebenfalls nützlich für die Untersuchung von geomorphologischen Oberflächen. Die Gruppe arbeitet auf diesem Gebiet mit den Physikern der ETH Zürich zusammen, um diese Methoden in ihrer Forschung anzuwenden.

Die jüngsten Feldprojekte haben sich auf junge Gebirgsgürtel konzentriert. Sean Willett und seine Kollegen haben viel auf der Insel Taiwan gearbeitet, wo eine der schnellsten Gebirgsbildungen der Erde zu beobachten ist. Dieser Ort ist auch deshalb interessant, weil die Prozesse der Erosion und des Sedimenttransports durch die häufigen Taifune, die die Region treffen, besonders aktiv sind. Zudem ist die Gegend seismisch sehr aktiv, was an der hohen Rate starker Erdbeben ersichtlich ist. Andere aktive oder in jüngerer Zeit aktive Gebirge, die die Gruppe erforscht hat, sind diejenigen in Neuseeland, im Himalaja in Alaska, im Iran, die Pyrenäen, der Apennin und natürlich die Alpen.

Zu den spezifischen Problemen der Forschung, in denen die ESD-Gruppe beteiligt ist, gehören seit Kurzem auch die Modellierung von Eiskappen und der Gletschererosion im alpinen Maßstab sowie die Rekonstruktion der Topographie der Alpen über die letzten zehn Millionen Jahre.



Eiskappenmodellierung der Alpen.



# Paläontologie

Paläontologie befasst sich mit der Evolution des Lebens auf unserem Planeten und bildet die Schnittstelle zwischen Erd- und Biowissenschaften. Diesem Gebiet widmen sich Hugo Bucher und Marcelo Sánchez.



Nachbildung der Fauna vom Nordwesten Venezuelas im späten Miozän.

Die Auswirkungen der globalen Umweltveränderungen auf die Biosphäre während der erdgeschichtlichen Phasen von Massenaussterben bilden den Kern der Forschung von Hugo Bucher. Mit dem Wissen über den Verlauf solcher Ereignisse und den jeweils nachfolgenden Erholungsphasen lassen sich die Mechanismen der aktuellen von Menschen verursachten Biodiversitätskrise besser verstehen. Klimatische und chemische Veränderungen von Meer und Atmosphäre, verbunden mit dem Ansteigen des Meeresspiegels, waren wichtige Faktoren in den vergangenen Biodiversitätskrisen. Vor allem über die grösste biotische Katastrophe der Erdgeschichte, das Massenaussterben am Ende des Perm vor ca. 250 Millionen Jahren werden sowohl im Feld wie im Labor neue, hoch aufgelöste und zuverlässige Daten aus den reichen Paläontologie und Paläoumwelt gesammelt. Damals verschwanden mindestens 90 Prozent aller Organismen von der Erdoberfläche.



Entnahme von grossen Sedimentstücken mit Fossilien aus Gestein aus dem Pliozän in Venezuela



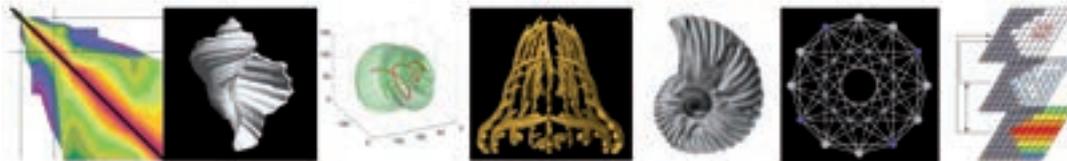
Ammonoiten aus dem frühen Trias in Südchina.

Die Feldforschung wird in verschiedenen Teilen der Welt durchgeführt. Dabei arbeiten Bucher und sein Team mit Expertinnen und Experten der Geochronologie und der Geochemie zusammen. Weiter setzen sie numerische Simulationen ein, um die Auswirkungen der abiotischen Faktoren auf die Biodiversität der Tiere und Pflanzen in Raum und Zeit zu testen.

Die Reaktionen von marinen Organismen auf abiotischen Druck wie Klimaveränderungen lassen sich besonders gut an den zu den Weichtieren gehörenden Muscheln und Ammoniten studieren. Experimente mit lebenden Muscheln und numerischer Modellierung geben Aufschluss über die Morphogenese, die Entstehung der Gestalt von Organismen. Nach stammesgeschichtlichen Informationen sucht Bucher an lebenden Formen und setzt dabei die Computertomographie ein.

# Evolution

Die evolutionäre Veränderung von Organismen basiert im Wesentlichen auf Änderungen der Entwicklungsmechanismen. Das Team von Marcelo Sánchez beschäftigt sich mit den sogenannten morphologischen Entwicklungen, also Struktur- und Formveränderungen bei Wirbeltieren vor allem bei Säugetieren, Reptilien und Amphibien. Die Forschenden konzentrieren sich dabei auf das Skelett weil es für die Anatomie der Landtiere von grundlegender Bedeutung ist – und es ist der Teil, der in Fossilien am häufigsten erhalten ist. Der Knochen ist ein dynamisches und lebendes Gewebe. Es unterstützt und schützt die Weichteile und es speichert wichtige Mineralien. Die Struktur des Knochens hängt von der Physiologie ab und verrät viel über die Evolutionsgeschichte. In Sánchez' Labor wird zum Beispiel



die Entwicklung der Mikrostruktur des Knochens sowie die Zeitspanne der Knochenentwicklung bei verschiedenen ausgestorbenen Gruppen untersucht und mit lebenden Gruppen verglichen. Ziel ist es, paläontologische und embryologische Kenntnisse zu integrieren

In den Studien werden alle Techniken genutzt die dazu beitragen, die anatomischen Eigenschaften zu dokumentieren und zu vergleichen. Die Forschenden sezieren, sie machen Computertomographien, sie wenden Techniken der Immunchemie und der Molekularbiologie an. Das Labor ist ausserdem bestens ausgerüstet für morphometrische Studien von kleinen Objekten wie fossile Zähne und Embryos



Hugo Bucher



Marcelo Sánchez



Katastrophenformen: Basaler mikrobischer Kalkstein aus dem frühen Trias in Südchina.



Basale Ophioceratid aus dem frühen Trias im Nordosten Grönlands.



Basislager im Nordosten Grönlands.



Probentransport im Nordosten Grönlands.

Feldforschung ist auch ein wesentlicher Teil der Studien. Nur so können ausgestorbene Exemplare aus vergangener biologischer Vielfalt entdeckt und beschrieben werden. Dies führt zu wichtigen evolutionsbiologischen Erkenntnissen.



## Biogeowissenschaft

Timothy Eglinton leitet die neu gebildete Gruppe Biogeowissenschaft. Im Zentrum ihrer Forschung steht der globale organische Kohlenstoffkreislauf. Die Gruppe untersucht, wie er funktioniert und wie Klima und anthropogene Aktivitäten ihn beeinflussen – und von ihm beeinflusst werden. Ein Schwerpunkt liegt auf den Prozessen, die zur Akkumulation von organischer Substanz in den marinen Sedimenten führen. Und man versucht, die Aufzeichnungen über die vergangenen Veränderungen von Erde und Ökosystem zu entschlüsseln, die in diesen Sedimenten archiviert sind.

In den Lebewesen der Erde kommen verschiedene Biomoleküle vor, von denen viele komplexe und sehr kunstvolle chemische Strukturen haben. Diese Strukturen haben diverse Funktionen – sie codieren und verbreiten genetische Informationen, sie regeln zelluläre Prozesse und sie erhalten die Struktur des Organismus. Die meisten Biomoleküle zerfallen nach dem Tod des Organismus, in dem sie stecken, schnell zu Kohlendioxid. Einige bleiben jedoch in der Umwelt bestehen. Eglinton und seine Kollegen nutzen diese «erb Moleküle» um den Weg der organischen Substanzen, welche durch terrestrische und aquatische Organismen entstehen, von ihrem Ursprung bis ins Sediment zu verfolgen. Dank den letzten Fortschritten in den Techniken, die zur Charakterisierung von molekularen Strukturen und der Zusammensetzung dieser Erbverbindungen verwendet werden, lassen sich nicht nur die biologischen Quellen bestimmen. Auch die Umweltbedingungen, unter denen die Vorläuferorganismen gelebt haben, können rekonstruiert werden.

Obwohl man schon viele Informationen aus diesen molekularen Signaturen gewonnen hat, ist dieses reichhaltige Archiv erst teilweise entschlüsselt. Zudem weiss man nur wenig über die Mechanismen und Zeitskalen, die beim Kreislauf organischer Materie in der Umwelt eine Rolle spielen. Darüber mehr zu erfahren ist das Hauptziel der Forschenden der Gruppe Biogeowissenschaft. Bei ihren Untersuchungen stützen sie sich auf eine Schlüsseleigenschaft der organischen Materie: das Radiokohlenstoffalter. Eglinton hat als erster Wissenschaftler Methoden für die

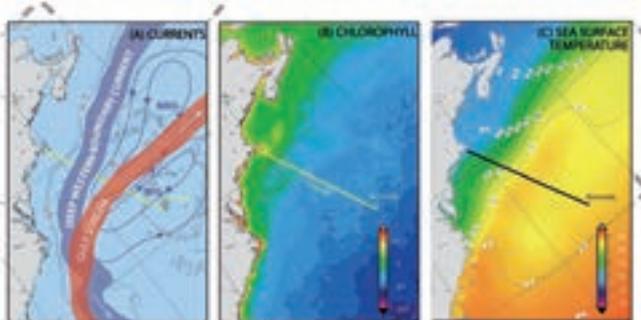
*Kreislauf*

Infrarot-Satellitenaufnahme vom Mackenzie Delta

Altersbestimmung von Radiokohlenstoff auf molekularer Ebene entwickelt. Er nutzt diese Informationen als «Uhr» um den Zeitraum zu erforschen, in dem sich bestimmte Anteile von Kohlenstoff innerhalb und zwischen verschiedenen Reservoirs auf der Erdoberfläche hin- und herbewegen. Diese Informationen werden verwendet, um den Kohlenstoffkreislauf von heute und vom späten Quartär zu erforschen.



Planktonblüte vor der Küste Neufundlands.



Schwankungen des Chlorophylls, der Oberflächentemperatur und der Tiefenströmungen im Nordwestatlantik.

Die Gruppe untersucht die Prozesse, die zur Mobilisierung zum Transport und zur Ablagerung von organischer Substanz über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen führen. Aktuelle Schwerpunkte sind der Kohlenstoffkreislauf in grossen Flusssystemen, an der Schnittstelle zwischen Land und Meer sowie der Transport und die Ablagerung von organischen Substanzen an Kontinentalrändern. Ein besonderer Fokus wird auf den Kohlenstoffkreislauf in der Arktis gelegt, wo es durch den Klimawandel bereits zu dramatischen Veränderungen gekommen ist. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprogramms mehrerer Institute untersucht die Gruppe beispielsweise den Transport und die Ablagerung von Kohlenstoff im Flusssystem des Mackenzie in den Northwest Territories von Kanada. Ebenfalls erforscht wird wie sich Veränderungen im Arktischen Ozean auf die sogenannte biologische Pumpe auswirken, dem Prozess mit dem Kohlenstoff von der Oberfläche in die Tiefsee transportiert wird: Durch Strömungen kommt organisch reiches Material aus der Tiefe des Ozeans an die Oberfläche, bindet dort Kohlenstoff und sinkt mit ihm wieder ab.



Probenentnahme vom See im Mackenzie-Delta.



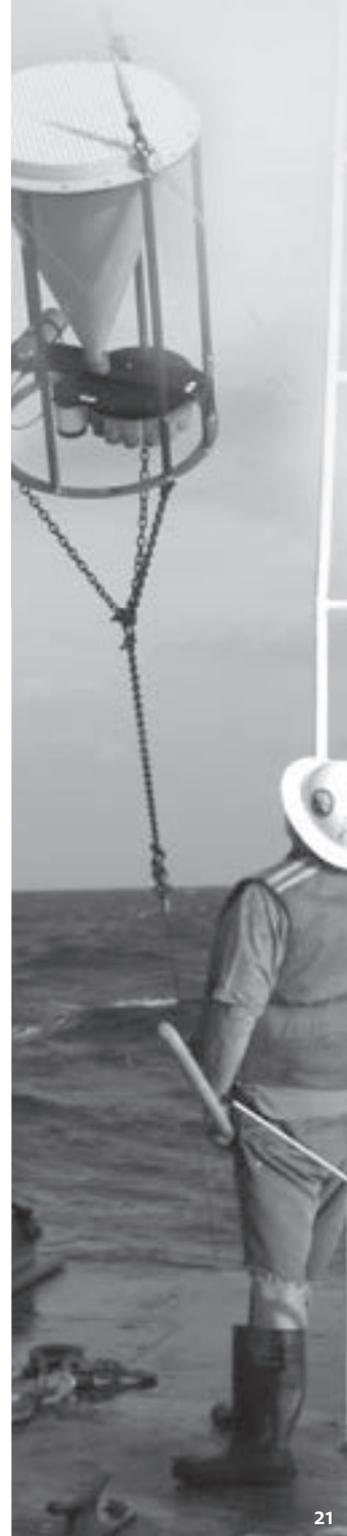
Der oberste Teil eines Sedimentkerns vom Schwarzen Meer.

Die Gruppe in der Geowissenschaft widmet sich zudem Untersuchungen spezifischer Umweltsysteme und macht Erhebungen zu Umweltveränderungen verschiedenster Auswirkung, Stärke oder Intensität sowie Langzeitbeobachtungen wichtiger Prozesse. In diesen Bereichen arbeitet man eng mit anderen Gruppen des Departements und mit anderen Departementen innerhalb der ETH zusammen sowie mit Institutionen, die ergänzendes Fachwissen und zusätzliche Perspektiven einbringen.

Eglinton und seine Kollegen arbeiten auf ein vermehrt quantitatives und mechanistisches Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs hin. Ziel ist es, sein Verhältnis zu physikalischen, biologischen und umweltbedingten Veränderungen zu definieren und herauszufinden, wie der Kreislauf in der geologischen Vergangenheit funktioniert hat.



Timothy Eglinton



# PLANETARE GEOCHEMIE



Vulkan Haleakala auf der Insel Maui, Hawaii. Proben von solchen Vulkanen geben Aufschluss über die Zusammensetzung des Erdinneren

## Planetare Geochemie

Die Gruppe von Maria Schönbächler befasst sich mit der Entstehung und Entwicklung des Sonnensystems und insbesondere unseres Planeten Erde. Dies umfasst Prozesse, die sich vor und während und nach der Bildung der Erde zugetragen haben, einschliesslich der frühesten Entwicklungsstufen der Erde wie zum Beispiel die Entstehung des Erdkerns, des Mondes oder der ersten Kontinente.

Diese Forschungsthemen werden hauptsächlich mit Hilfe der Isotopengeochemie studiert. Die Isotopengeochemie erforscht eine Vielzahl von geologischen Prozessen, indem sie die Häufigkeit von Isotopen in verschiedenen Proben miteinander vergleicht. Isotope sind Atome eines bestimmten Elements mit

einer unterschiedlichen Zahl Neutronen im Atomkern. Dadurch haben sie eine unterschiedliche Masse und die Häufigkeiten der Isotope können mittels Massenspektrometern bestimmt werden. Einige Isotope sind radioaktiv und zerfallen mit der Zeit in Isotope eines anderen Elements. Dieser Zerfall kann als Uhr benutzt werden, um zum Beispiel das Alter eines heutigen Gesteins zu bestimmen oder um geologische Prozesse wie die Erdkernbildung zu datieren. Neben dem Zerfall führen diverse andere chemische und physikalische Prozesse ebenfalls zu leichten Änderungen in der Häufigkeit der stabilen Isotope eines Elements und können helfen, die Entstehung und Geschichte der Erde besser zu verstehen.



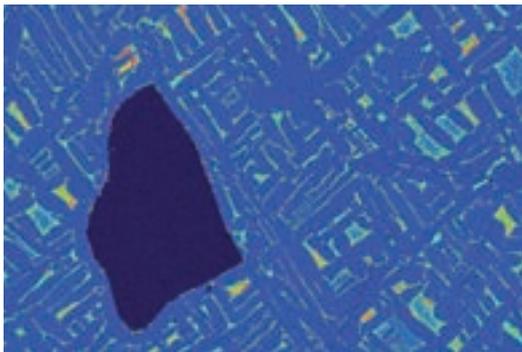
Die Erde geht über dem Mond auf. Dieses Bild wurde von einer Apollo-Mond-Mission aufgenommen. Proben vom Mond geben uns Auskunft über die Entstehung des Mondes und der frühen Geschichte der Erde (Bild: NASA)

Die Voraussetzung für diese Art der Forschung sind höchstempfindliche Massenspektrometer, die dem neusten Stand der Technik entsprechen, wie auch hochmoderne Reinraumlabor. Das Labor für Isotopengeochemie an der ETH Zürich ist eines der am besten ausgerüsteten Labore weltweit für Analysen von stabilen und radioaktiven Isotopen sowie von Edelgasen. Es wird zusammen mit der Gruppe Oberflächengeochemie betrieben. Neue Methoden für Isotopenanalysen und neue Gerätetypen werden hier ebenfalls entwickelt.

Auf Grund von Untersuchungen an Meteoriten, Erd- und Mondproben erforscht die Gruppe von Maria Schönbächler die Entstehung der Erde und des Sonnensystems aus dem sogenannten solaren Nebel, einer Scheibe aus Staub und Gas, welche die neugeborene Sonne umkreiste und aus welchem alles Material im Sonnensystem stammt.



Maria Schönbächler



Sulfideinschluss im Eisenmeteorite Cape York. Dunkle Farbe zeigt die tiefe Nickelkonzentration im Sulfid (ca. 3 cm lang) in Vergleich zum umgebenden Metall (hellblau/grün).



Der Meteorit St. Marguerite ist ein gewöhnlicher Chondrit. Auf der linken Seite sieht man die dunkle Schmelzkruste, die durch Aufheizung in der Atmosphäre während des Falls entstand.

Wichtige Forschungsschwerpunkte sind:

- Die Erforschung der Herkunft des Materials aus dem die Bausteine der Planeten aufgebaut wurden und somit das Ursprungsmaterial der Erde bilden. Die Gruppe verwendet zum Beispiel Hochpräzisionsmessungen von Zirkonium- und Titanisotopen, um zu zeigen, dass Meteorite die von Asteroiden stammen, nicht direkte Überbleibsel des Baumaterials der Erde darstellen.
- Die Verfeinerung der Chronologie der ersten Millionen Jahre unseres Sonnensystems mittels radioaktiver Isotope.
- Die physikalischen und chemischen Bedingungen zu verstehen, unter welchen sich die Erde und andere planetare Himmelskörper gebildet haben. Dies umfasst zum Beispiel die Bildung des Erdkerns sowie der Metallkerne von Asteroiden. Durch Analysen von Eisenmeteoriten, die von solchen Asteroiden stammen, konnte die Gruppe zum Beispiel zeigen, dass sich deren Metallkerne bereits innerhalb der ersten paar Millionen Jahre unseres Sonnensystems verfestigten.
- Den Ursprung volatiler Elemente in der Erde und ihre Geschichte im frühen Sonnensystem mit Hilfe von Edelgasen und kurzlebigen radioaktiven Isotopen zu erfassen. Die Arbeit der Gruppe zeigt zum Beispiel, dass die Erde zu Beginn sehr trocken war, und dass volatile Elemente in grösseren Mengen erst etwas später auf die Erde gebracht wurden, während jedoch die Erdkernbildung noch voll im Gange war.
- Die Bildung des Erdmondes und der ersten Kontinente der frühen Erde.
- Die Entwicklung von neusten isotopegeochemischen Methoden zur Lösung von geowissenschaftlichen Fragestellungen.



Im Reinraumlabor.



Arbeit am Massenspektrometer.





## Geochemie der Erdoberfläche

Die Gruppe Geochemie der Erdoberfläche von Derek Vance untersucht vergangene chemische Bedingungen auf der Erde, welche in Sedimenten und Gesteinen aufgezeichnet sind. Ziel ist es, die zeitliche Entwicklung der Bedingungen zu rekonstruieren. Erforscht werden zudem die wichtigsten Aspekte von chemischen Zyklen auf der modernen Erde, und zwar durch das Studium der Chemie von Wäldern, Flüssen, Seen und Ozeanen. Folgende Themen stehen dabei im Zentrum:

- Globale geochemische Zyklen an der Erdoberfläche wie diejenigen von Kohlenstoff und Sauerstoff.
- Die Ursachen von bedeutenden Veränderungen in der Chemie der Ozeane durch die Zeit – einschließlich von Variationen im gelöstem Sauerstoff.
- Die Wechselwirkungen zwischen diesen geochemischen Zyklen und dem Erdklima.
- Die Rückkoppelung zwischen der Oberflächenbedingung der Erde und deren Biosphäre.



Probenentnahme im Sedimentgestein in Gubbio, Italien: Die dunkle Schicht kennzeichnet eine Zeit, als die Ozeane gelösten Sauerstoff freisetzen.



Sedimententnahme im Dulce Golf, Costa Rica, wo die Sauerstoff-Schichten besonders tief liegen.

Geochemie beginnt im Feld und im Verlauf des letzten Jahrzehnts hat die Gruppe Wälder, Fluss- und Meerwasserproben aus der ganzen Welt gesammelt. Dabei wurden Bodenproben in der Schweiz, den USA und in Grossbritannien entnommen. Gearbeitet wurde an grossen Fluss-Systemen wie dem Amazonas in Brasilien, dem Ganges-Brahmaputra in Indien und Bangladesch, dem Yangtze in China, dem Nil im Sudan und in Ägypten sowie an abgelegenen arktischen Flüssen in Nordschweden. Die Gruppe beteiligt sich an grossen internationalen Ozeanexpeditionen auf denen Meerwasserproben aus entlegenen Teilen des Pazifik, vom Indischen Ozean, vom Atlantik sowie vom Südlichen Ozean rund um die Antarktis genommen werden. Vervollständigt wird die Feldarbeit mit Expeditionen an Land, um Sedimentgesteine zu untersuchen – in Italien, Libyen, Südafrika, Australien und den USA. Diese Gesteine sind unsere Archive vergangener chemischer Prozesse auf der Erde.



Probenentnahme aus dem Fluss Kalix auf dem Polarkreis in Nordschweden.



In Barberton, Südafrika, befinden sich einige der ältesten Gesteine der Erde. Sie enthalten Aufzeichnungen über die Ozeane und das Leben, das es in ihnen vielleicht einst gegeben hat.

# Zyklen

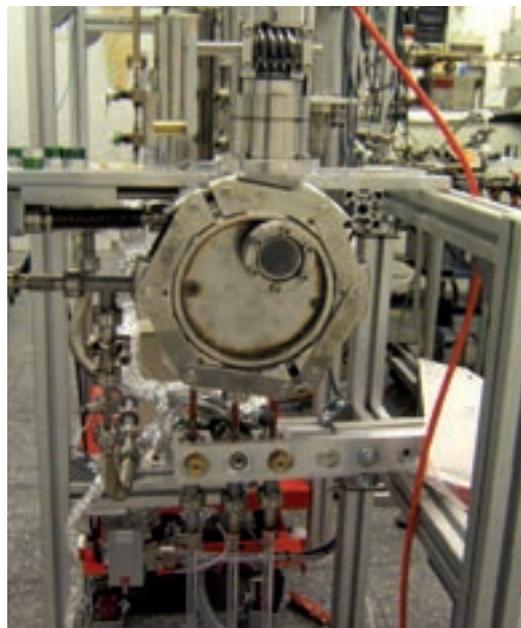
Eines der wichtigsten Werkzeuge der Gruppe ist die Isotopengeochemie. Kleine Abweichungen in den Häufigkeiten verschiedener Isotopen eines Elements werden verwendet um essentielle physikalisch chemische Prozesse in der Umwelt zu verstehen. Winzige Schwankungen in der Isotopenzusammensetzung von Spurenelementen im Meerwasser lassen zum Beispiel erkennen, wie das ozeanische Plankton diese Metalle aufnimmt und welche Rolle ein Element für die biologische Produktivität spielt. Diese Schwankungen sind zudem auch geeignete Indikatoren für Stoffflüsse rund um die Erde – in der Vergangenheit und in der Gegenwart. Anhand von Isotopen konnte die Gruppe zum Beispiel den Verlauf vergangener Flusssysteme in der Sahara verfolgen – Flüsse, die schon längst nicht mehr existieren aber die dem Menschen damals vielleicht die Migration aus Afrika ermöglichten.

Die Verwendung von Isotopengeochemie für diese Anwendungen erfordert hochwertige Laboratorien und Instrumente. Die ETH Zürich hat in dieser Hinsicht eine der weltweit besten Anlagen welche verschiedenste Forschende aus der ganzen Welt anzieht.

Neben den chemischen und isotopischen Analysen von Böden, Wasser und Gesteinen verwendet die Gruppe eine Vielzahl von experimentellen Ansätzen um die Messresultate zu verstehen. Ein Beispiel dafür ist die Kultivierung von Phytoplankton. Unter kontrollierten Bedingungen im Labor lässt sich untersuchen, wie das Plankton die Chemie seiner Umgebung beeinflusst. Mit anderen Experimenten, die weniger biologisch orientiert sind, wird untersucht wie verschiedene Mineralien in Bodenlösungen und Flüssen absorbiert, gelöst oder abgelagert werden. Diese Experimente im Mikromassstab und analog zur Natur helfen dabei, die chemischen und Isotopen Daten aus Feldstudien besser zu verstehen – dort sind die gegensätzlichen Prozesse oft weniger klar ersichtlich.



Kultur von Cyanobakterien, im Labor gezüchtet

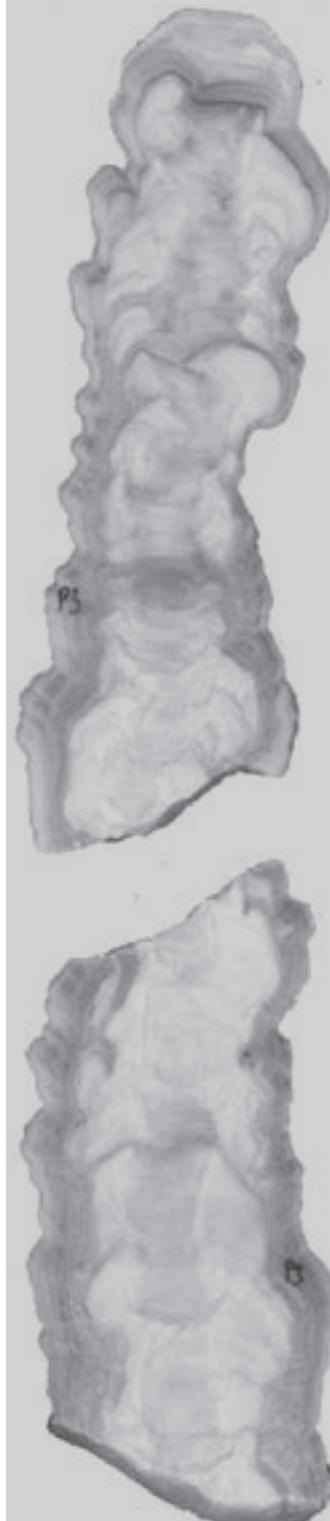


Eine selber entwickelte Mahl- und Siebmaschine, mit der die ursprüngliche Höhlentemperatur bestimmt werden kann: Sie misst die Konzentration von Edelgas im Wasser von Einschlüssen in den Stalagmiten.

Die Felddaten sowie die Erkenntnisse aus Experimenten werden verwendet um quantitative Modelle der Erdoberfläche zu entwickeln. So können Derek Vance und sein Team zum Beispiel bestimmen wie der Transport von Materie von den Kontinenten über Flusssysteme in die Ozeane, also die chemische Verwitterung der Kontinente die Chemie der Ozeane beeinflusst und in der Vergangenheit beeinflusst hat: Die Konzentrationen von Spuremetallen und Nährstoffen im Meerwasser weisen zeitliche und geographische Schwankungen auf. Die Gruppe simuliert den Grad, zu welchem die Meeresbiologie diese Schwankungen bestimmt.



Derek Vance



# MINERALISCHE RESSOURCEN



Kupfer Gold Mine Bulgarien

## Mineralische Ressourcen

### Woher kommen die Metalle, die wir verwenden?

Was nicht angebaut wird, wird aus geologischen Ablagerungen gewonnen. Gebäude, Infrastruktur ja die Mehrheit der Objekte, die wir in unserem täglichen Leben verwenden bestehen aus Materialien die aus Tausenden von Bergwerken und Steinbrüchen rund um den Planeten gewonnen werden. Während ein einfacher Löffel zum Beispiel aus Eisen, Chrom und Nickel besteht benötigen Mobiltelefone und Elektroautos bis zu siebzig verschiedene Elemente für ihre Herstellung. Im Laufe seines Lebens wird jeder Europäer etwa 50 Tonnen Metalle und 500 Tonnen Bau- und Industriemineralien (z. B. Sand, Kalkstein, Gips, Kaolin, Salz, Phosphat usw.) verbrauchen. Diese Zahlen verdeutlichen die geologischen, ökologischen, industriellen und gesellschaftlichen Herausforderungen, die sich im Zusammenhang mit der Gewinnung und Versorgung mit mineralischen Ressourcen auf der ganzen Welt stellen.

### Bodenschätze in Zeiten des Klimawandels

Die dringende Entwicklung hin zu einer emissionsarmen Energieproduktion und Wirtschaft wird eine beispiellose Nachfrage nach Metallen und Baustoffen auslösen. Allein der Bau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien (z.B. Sonne und Wind) erfordert etwa zehnmal mehr Rohstoffe als Kohlenwasserstoff- und Kernkraftwerke, die die gleiche Energiemenge liefern. Auch die Nutzung und Speicherung dieser grünen Energie erfordert metallhungrige Technologien wie Batterien und Elektroautos. Während die Verbesserung der Recyclingeffizienz einen Teil dieser Last tragen kann, muss der Großteil der Nachfrage durch die primäre Gewinnung aus Mineralvorkommen erfüllt werden. Diese Herausforderung wird Fachwissen und Kreativität von allen Seiten der Gesellschaft erfordern. Unter diesen spielen die Erdwissenschaftler eine große Rolle.



Hydrothermisch verändertes Gestein mit Kupfer- und Goldmineralisierung

## Wie entstehen Mineralienlagerstätten?

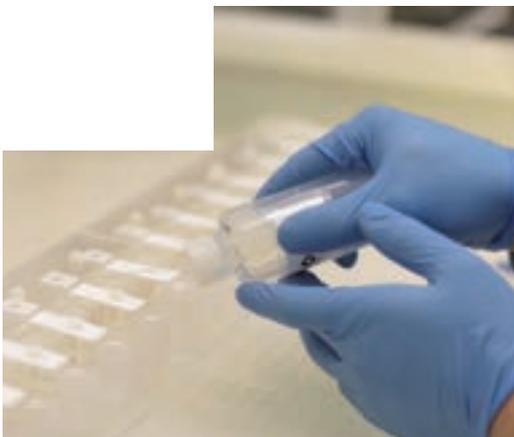
Dies ist die Hauptfrage mit der sich die Gruppe der Mineralressourcen unter der Leitung von Prof. Cyril Chelle Michou befasst. Die Untersuchung von Mineralressourcen bedingt einen interdisziplinären Ansatz, bei dem Daten und Konzepte, die ein breites Spektrum von Bereichen umfassen, zusammengeführt werden müssen, um die Prozesse zu entschlüsseln, die unseren Planeten geformt und die natürlichen Ressourcen gebildet haben, auf die sich unsere Gesellschaft stützt. Diese systemorientierte Forschung befindet sich am Schnittpunkt vieler erdwissenschaftlicher Disziplinen darunter Feldgeologie, Lagerstättengeologie, Geochemie, Geochronologie, magmatische und experimentelle Petrologie, Tektonik, geothermische Forschung und numerische Modellierung.



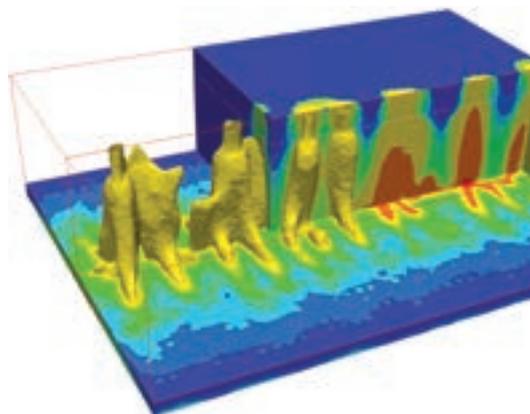
Geologische Feldkartierung in einem mineralisierten magmatisch hydrothermalen System in den USA (li) und Griechenland (re).

Die meisten Bodenschätze, die wir heute in der Nähe der Oberfläche finden, bildeten sich vor Millionen von Jahren tief in der Erdkruste. Diese Bodenschätze sind Ablagerungen von Metallen die durch Fluide und Magmen transportiert wurden. Die Gruppe untersucht gut exponierte Mineralsysteme in Europa, Nordamerika und den Anden Südamerikas. Dort kartieren Wissenschaftler und Studenten die Geologie und sammeln Gesteinsproben, die wertvolle Informationen über die Prozesse, die die Mineralienlagerstätten gebildet haben, bewahren. Diese Informationen werden anschliessend in den hochmodernen Labors der ETH Zürich entschlüsselt und die entsprechenden Prozesse mit Hilfe von Computersimulationen modelliert.

Diese Forschung wird in Zusammenarbeit mit Bergbauunternehmen durchgeführt wobei tiefe Explorationsbohrungen und aktive Minen verwendet werden, die hervorragende dreidimensionale Archive von Mineralisierungssystemen bieten. Im Gegenzug hilft das Aufdecken der Prozesse, die die Bildung und Größe von Mineralvorkommen kontrollieren, der Industrie bei der Suche nach neuen Vorkommen, die unsere metallbedürftige Gesellschaft versorgen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Verringerung wirtschaftlicher Risiken durch die Lokalisierung tiefer gelegener Ressourcen - diese sind schwieriger zu finden, aber im Allgemeinen umweltfreundlicher abzubauen.



Die hochpräzise U-Pb Datierung ist ein wesentliches Instrument um den Zeitpunkt und die Geschwindigkeit der geologischen Prozesse bei der Bildung von Mineralienlagerstätten einzuschränken. U und Pb werden nach ihrem Wirtmineral (zum Beispiel einem Zirkon; siehe eingefügtes Elektronenmikroskop Kathodolumineszenz Bild) im Reinraum Labor abgetrennt und mittels Massenspektrometrie analysiert.



Numerische Simulation von heißer Flüssigkeit, die durch gebrochenes Gestein an Mittelozean Kämmen aufsteigt (1x3x4 km großes Modell). Die heißen Flüssigkeiten entweichen als «schwarze Raucher», können aber auch große Mineralvorkommen direkt unter dem Meeresboden bilden. Eine solche Simulation hilft enorm, die komplexen thermodynamischen und mechanischen Rückkopplungen zu verstehen, die während des Fluidflusses auftreten.



Cyril Chelle-Michou



Thomas Driesner



Jörn-Frederik Wotzlaw



## Magmatische Petrologie

Die Magmatische Petrologie widmet sich dem Magma von der Quelle bis an die Oberfläche der Erde. Sie untersucht vulkanische Systeme, die Entstehung der verschiedenen Gesteinsschichten sowie die Entwicklung der Erdkruste. Ziel ist es, die Bewegungen des Magmas wie die vulkanische Aktivität besser zu verstehen. Denn in unserer zunehmend überbevölkerten Welt können Vulkanausbrüche zu einem beispiellosen Ausmass von Verwüstung führen. Das Magma birgt aber auch Gutes wie die hydrothermale Energie und Bodenschätze. Geleitet wird die Gruppe Magmatische Petrologie von Olivier Bachmann.

Die Forschenden untersuchen magmatisches Gestein aus verschiedensten Regionen auf der ganzen Welt. Dabei nutzen sie mehrere Techniken aus der Feldgeologie, der mineralischen Chemie und der Isotopengeochemie. Ausserdem arbeitet die Gruppe mit der Geochronologie sowie der physikalischen Modellierung; alles Techniken die in den Erdwissenschaften ansonsten nur selten kombiniert werden. Dieser multidisziplinäre Ansatz ist sehr anspruchsvoll, aber notwendig, um den komplexen Fragen gerecht zu werden.

Olivier Bachmann hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Dynamik der Magmaströme in der Erdkruste und deren Differenzierung zu verstehen. Dazu vergleicht er vulkanisches mit sogenannt plutonischem, d. h. Tiefengestein. Die rund um den Globus gesammelten Proben enthalten Informationen aus verschiedensten Speichern und Epochen. Um ein kohärentes Bild zeichnen zu können, verwendet die Gruppe so viele Werkzeuge wie möglich.

Zurzeit konzentrieren sich die Forschenden darauf die Verbindung zwischen vulkanischem und plutonischem Gestein besser definieren zu können. Dazu suchen sie nach geochemischen Gemeinsamkeiten sowie nach Feldbeispielen für Verbindungen zwischen den beiden Gesteinsarten. Darüber hinaus entwickelt das Team physikalische Modelle, wie die Schmelze von grossen magmatischen Lagerstätten in der Erdkruste nach oben entweicht und testet diese Modelle im Feld an Standorten auf der ganzen Welt.

*Magma*

Darüber hinaus widmet sich die Gruppe der Erforschung der sogenannten eruptiven Dynamik also den Vorgängen beim Ausbruch von Vulkanen, insbesondere dem Übergang vom fließenden Lavastrom zum explosiven Auswerfen von Magma. Die Erkenntnisse daraus werden es ermöglichen, die Naturgefahr durch aktive Vulkane besser einzuschätzen und den gesellschaftlichen Umgang mit den Vulkanrisiken zu optimieren: Ein Lavastrom ist zwar ein beeindruckendes aber nur für die unmittelbare Umgebung am Vulkankegel gefährliches Phänomen. Der explosive Ausbruch eines Vulkans dagegen kann über Tausende von Kilometern Auswirkungen haben und sogar das Klima und die Weltwirtschaft beeinflussen. Zusammen mit Forschenden rund um die Welt arbeiten Olivier Bachmann und sein Team zudem in weiteren Bereichen wie der Abbildung der Kanalsysteme des Magmas bei aktiven Vulkanen oder am besseren Verständnis des Entgasungsprozesses.



Olivier Bachmann



Gretchen Bernasconi-Green



Pferde fliehen vor der Aschewolke des Vulkans Eyjafjallajökull, Island, am 17. April 2010 (Foto: National Geographic)



Eruption des Ätna auf Sizilien, Italien, 2006. (Foto: M. Fulle)



Zentralkegel des Aso Caldera, einem der aktivsten Supervulkane Japans. (Foto: Olivier Bachmann)



Vom Wind abgelenkte Vulkanwolke des Vulkans Puyehue, 2011. (Foto: NASA)



Die «weissen Türme» von Lost City im Jahr 2000 im Atlantik entdeckt.

Zur Gruppe Magmatische Petrologie gehört auch Gretchen Bernasconi-Green, auch bekannt als Gretchen Früh-Green. Sie engagiert sich in der Erforschung der ozeanischen Lithosphäre am Meeresgrund und an Land. Ziel ist es, die hydrothermischen Systeme auf dem Meeresboden und die Bedingungen unter denen sie entstehen und sich entwickeln, besser zu verstehen. Ein wichtiger Schwerpunkt ist das Mitwirken an internationalen Ozeanbohr-Programmen, so etwa am International Ocean Discovery Program (IODP). Die grösste Entdeckung unter Mitwirkung der ETH-Forscherin ist bislang Lost City im Atlantik, ein bis dahin unbekannter Typ von hydrothermischen Systemen und die grösste bislang bekannte Gesteinsformation am Meeresgrund: Eine Ansammlung von bis zu 60 Meter hohen Türmen und Spitzen aus schneeweissem Kalkstein, die sich stark von den bis dahin bekannten Black Smokers (den Unterwasserquellen in der Nähe von Vulkanen), unterscheiden.



# HOCHDRUCK- GEOLOGIE



Schmelzinfiltrationszonen in Mantelgesteinen, Kohistan

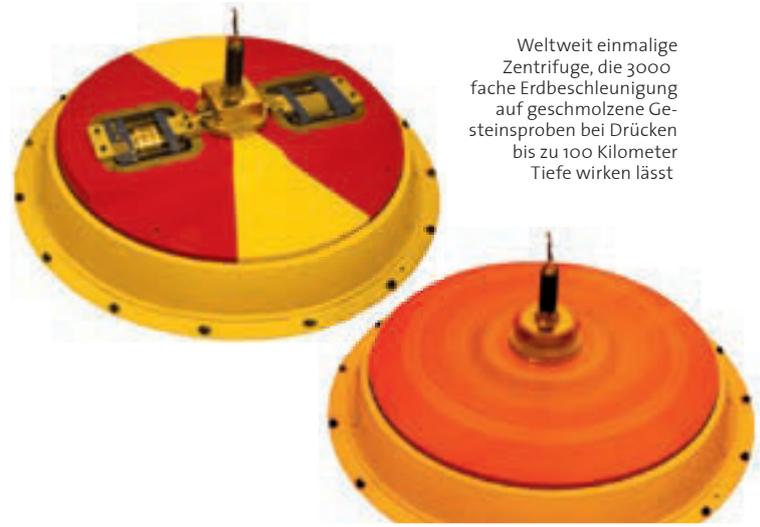
## Hochdruckgeologie

In der Hochdruckgeologie werden physikalische und chemische Bedingungen im Innern der Erde des Mondes und der Planeten simuliert. Ziel ist es, deren Entstehung und Entwicklung zu verstehen. Mit Experimenten, theoretischen Modellen und Felduntersuchungen erforscht die Gruppe um Max Schmidt, James Connolly und Peter Ulmer alle Tiefenbereiche, von der Bildung des Erdkerns bis zum Vulkanismus an der Erdoberfläche. Dem Forschungsteam stehen extrem leistungsfähige Hochdruckapparaturen zur Verfügung, deren Kapazität bis 1200 Kilometer Tiefe und 2500 °C reichen und die oft für spezielle Problemstellungen in den eigenen Werkstätten entwickelt und gebaut werden.

Mit einer an der ETH entwickelten Spezial-Hochdruckzentrifuge wird z. B. die Geschwindigkeit der Abtrennung von Metall- und Silikat Schmelzen während der Akkretion der Erde bestimmt. Die Verteilung der Elemente zwischen Schmelzen und Kristallen gibt dabei Aufschluss über die Tiefe und Temperatur und damit über die Entstehungsbedingungen des Erdkerns und des Erdmantels. Nur gerade 15 Prozent der Erdmasse sind uns direkt zugänglich. Die restlichen 98,5 Prozent sind ausser Reichweite, jedoch für die Dynamik und das Aussehen des Planeten verantwortlich: Der Anteil an Landmasse und Ozean auf der Erde wird durch Prozesse im Erdmantel bestimmt, die zu sogenannten magmatischen Zyklen führen, die meist in einer Tiefe von 20 bis 200 Kilometern und über Zeitspannen von Hunderten bis Millionen von Jahren ablaufen.

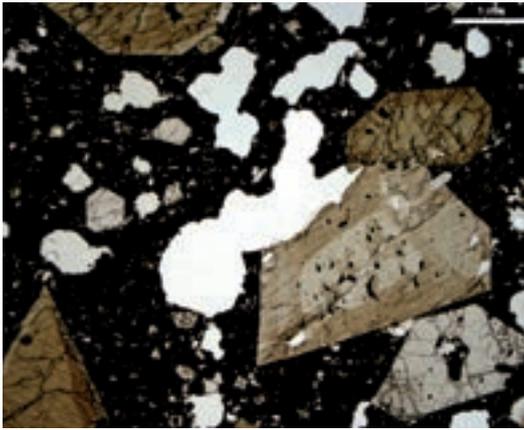
Über dem Mantel liegt die untere Erdkruste (15 bis 40 Kilometer Tiefe), in der die chemische Entwicklung der Magmen und das Wachstum der Kruste selbst, die über Milliarden von Jahren erfolgte, erforscht werden. In der Oberkruste (3 bis 15 Kilometer Tiefe) wird die Platznahme von Magmen, deren chemische und thermische Interaktion mit der Umgebung sowie deren Entwicklung mit der Zeit betrachtet. Diese Forschung wird experimentell und im Feld durchgeführt, letzteres zum Beispiel in der Adameo-Gruppe in Oberitalien, in Pakistan oder in der Mongolei.

Die Bildung der Kontinente auf denen wir leben erfolgt an denjenigen Stellen, an denen Erdplatten aufeinanderstossen und sich untereinander schieben – sogenannte Subduktionszonen. Durch das Absinken der Platten werden H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> von der Oberfläche in die Tiefe verfrachtet, wo sie zur Aufschmelzung des Erd-



Weltweit einmalige Zentrifuge, die 3000-fache Erdbeschleunigung auf geschmolzene Gesteinsproben bei Drücken bis zu 100 Kilometer Tiefe wirken lässt

mantels in Tiefen von 40 bis 660 Kilometer führen. Diese Magmen steigen dann an die Oberfläche auf und schliessen so den tiefen Erdkreislauf. Mit Hochdruckexperimenten sowie mit thermodynamischen Modellierungen quantifiziert die Gruppe Bausteine der  $H_2O$ - und  $CO_2$  Kreisläufe im Erdinneren.



Mikroskopieaufnahme einer Lava, die Kristalle, Gasblasen und Glas (schwarz) enthält



Karakorum Exkursion, Nordpakistan

Mathematische Computermodelle zur Mechanik von schmelzhaltigen Gesteinen erlaubt die Extraktion von Schmelzen unter mittelozeanischen Rücken zu verstehen (so ist die Schmelze die heute austritt zur Zeit der Pharaonen entstanden) oder die Aufstiegspfade und -geschwindigkeiten der Fluide und Magmen in Subduktionszonen zu bestimmen. Ein weiterer Forschungsbereich ist die Analyse von Mineralstabilitäten. Diese werden einerseits durch theoretische thermodynamische Modelle berechnet und hervorgesagt, andererseits werden die Daten für diese Modelle durch Experimente bei bekanntem Druck und bekannter Temperatur bestimmt.



Augenfällige Gesteinsschichten des Faltengebirges

Neben der Entstehung der Magmen werden auch das Fließverhalten und die physikalischen Parameter die zu Vulkanismus führen, experimentell untersucht. Natürliche Magmen sind komplexe Gemische von Schmelze, Kristallen und Gas(blas)en, die je nach ihrer Aufstiegs- und Abkühlungsgeschichte langsam aus dem Vulkan ausfließen oder ihn explosiv auseinanderreißen. Im ostafrikanischen Grabensystem oder auf den Kapverden kommen Karbonatschmelzen an die Oberfläche, deren Entstehung sowohl durch direkte Eruption der flüssigen Laven durch experimentelle Simulation der Magmenkammer als auch durch das direkte Aufschmelzen karbonathaltiger Sedimente in 100 bis 700 Kilometer Tiefe im Labor erforscht werden.

Um die natürlichen und experimentell erzeugten Gesteine mineralogisch und chemisch zu charakterisieren, unterhält die Gruppe einen umfangreichen Pool an analytischen Geräten, welche auch häufig für angewandte Fragestellungen aus Industrie und Praxis eingesetzt werden. Glas, Zement und Keramik sind letztendlich das synthetische Äquivalent von natürlichen Schmelzen und Hochdruckgesteinen.



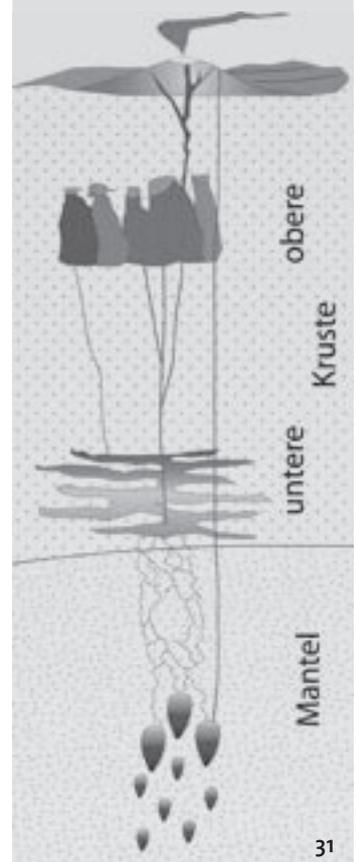
Max Schmidt



Peter Ulmer



James Connolly



# Experimentelle Mineralphysik

Be

## Woraus besteht das Innere der Erde?

Moderne Teleskope können Signale tief aus dem Weltall aus bis zu 10 Milliarden Lichtjahren Entfernung empfangen. Doch wie es tief in der Erde aussieht – weniger als 10000 km entfernt – ist uns bis heute weitgehend verborgen geblieben.

Man geht davon aus, dass sich das Erdinnere in mehrere dicke Lagen gliedert, die vorwiegend aus zwei Materialien bestehen – zum einen aus mineralischen und zum anderen aus metallischen Phasen. Bisher ist aber weitgehend unbekannt, wie diese konkret zusammengesetzt sind. Von der Erdoberfläche bis zum Erdmittelpunkt sind es etwa 6400 Kilometer. Entlang dieses Pfades steigen Temperatur und Druck gewaltig an und erreichen tausende von Grad und hunderte von Gigapascal (ein Gigapascal entspricht dem 10000 Fachen des Atmosphärendrucks). Diese extremen Bedingungen machen es schwer die wahre Natur der Materialien im Innersten der Erde zu bestimmen. Denn sie verhindern den direkten Zugang und viel weiter als 10 Kilometer kann man auch mit modernen Verfahren nicht ins Erdinnere vordringen.



Die Erde von Apollo 17 aus gesehen (Foto: NASA)

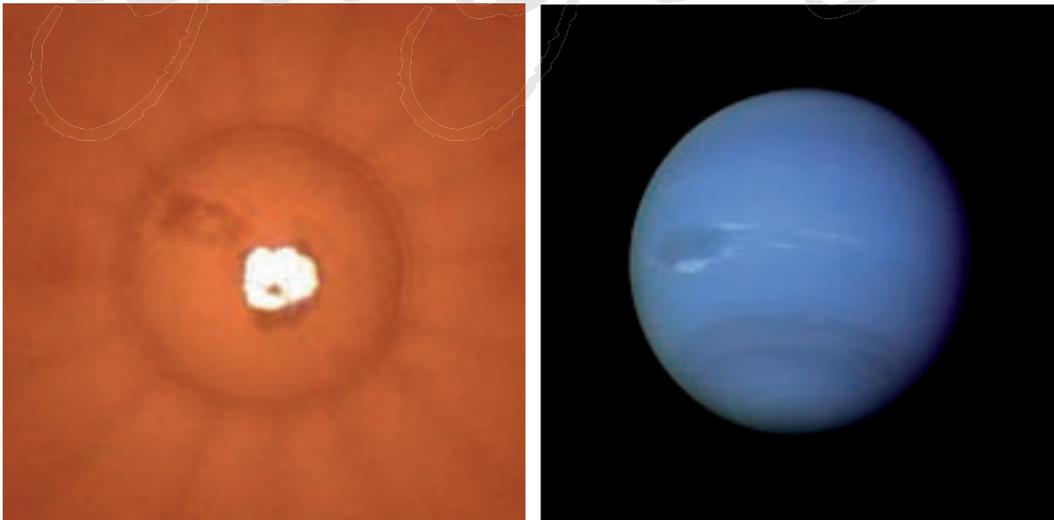
Um diese Hürde zu umgehen führt unsere Gruppe Experimente durch, in denen wir die Druck und Temperaturbedingungen des Erdinneren nachstellen. Dazu nutzen wir vorwiegend laserbeheizte Diamantstempelzellen. Diamant ist eines der härtesten Materialien und für Licht verschiedenster Wellenlängen durchsichtig und damit bestens geeignet um Materialien unter Bedingungen wie im Erdinneren einzuschliessen und ihre Eigenschaften dann zu analysieren. So können wir wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen und zum Beispiel die Dichte, die Kristallstruktur, die elastischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung von Materialien des tiefen Erdinneren bestimmen. Nach und nach setzen wir damit ein Puzzle zusammen aus dem sich einmal ein Gesamtbild des Erdinneren ergeben wird.

Ein genaues Bild der heutigen Erde ist jedoch nur ein Ziel; gerne würden wir auch wissen wie sich das Erdinnere durch die gesamte Erdgeschichte seit mehr als 4 Milliarden Jahren entwickelt hat. Eine Vorstellung ist dass die frühe Erde grossräumig aufgeschmolzen war und eine Art tiefen Magma Ozean enthielt wodurch die Entwicklung chemisch verschiedener Lagen stark

< Detailansicht der Diamantstempelzelle. Die Abflachung an der Spitze des Diamanten (die sogenannte Kalette) hat einen Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  (Foto: Motohiko Murakami)



Prof. Motohiko Murakami

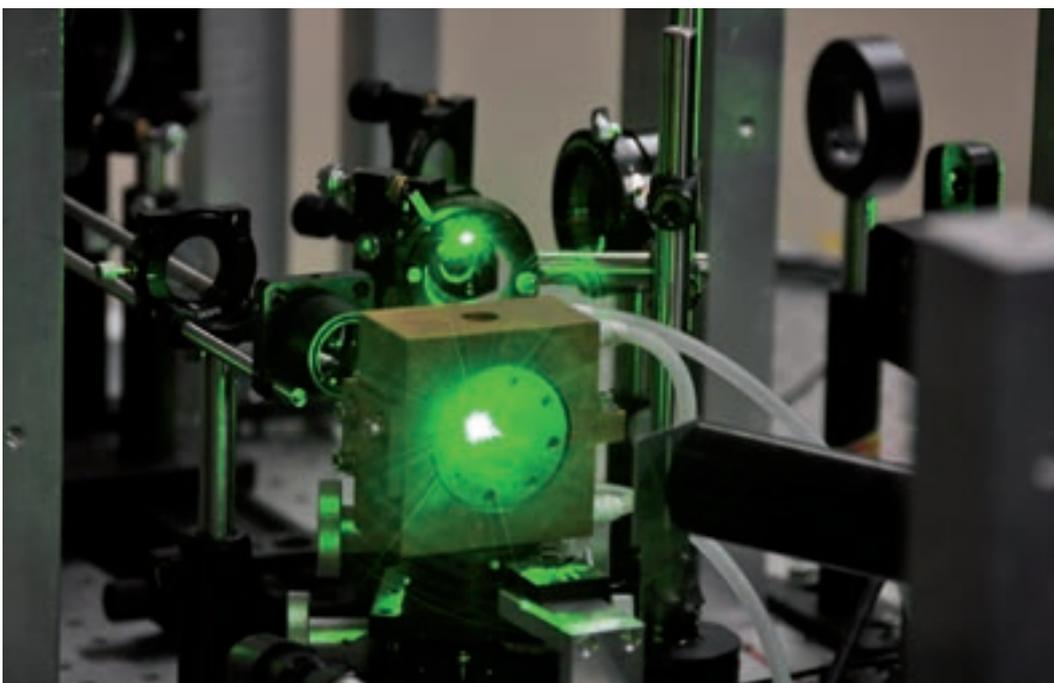


**links:** Mikroskopbild eine Probe in der Diamantstempelzelle bei einem Druck von 172 Gigapascal (1 72 Millionen mal atmosphärischer Druck). Der äussere Ring entspricht der Kalettenfläche des Diamantstempels und hat einen Durchmesser von 150  $\mu\text{m}$ ; der innere Ring entspricht der Probenkammer und enthält Magnesiumsilikat als sogenannter  $\text{MgSiO}_3$  Post Perovskit (Foto: Motohiko Murakami). **rechts:** Aufnahme des Neptun von der Voyager 1 Mission (Foto: NASA)

begünstigt wurde. Wir denken, dass ein Verständnis der Dynamik und der Differenzierungsprozesse in einem solchen tiefen Magma Ozean der beste Weg sind, um die Rätsel um die Entwicklung der frühen Erde zu lösen. Wir führen daher Experimente durch, in denen wir die Prozesse der Bildung der frühen Erde aus einem komplett aufgeschmolzenen Zustand heraus simulieren.

Aus planetologischer Sicht ist eine spannende Frage, ob die Erde in Hinblick auf solche Bildungsprozesse, ihre Struktur und Zusammensetzung ein besonderer Fall ist. Höchstdruckexperimente erlauben in diesem Kontext dann auch, Einblick in die mögliche Struktur anderer Planeten unseres Sonnensystems oder auch von Exoplaneten zu gewinnen.

Druck kann Materialeigenschaften erheblich ändern, und einige interessante und ungewöhnliche Spielarten von Materialeigenschaften sind manchmal bei extremen Drücken zu beobachten. Die Synthese von neuartigen Materialien mit besonderen Eigenschaften ist somit ein anwendungsrelevantes, potentes Nebenprodukt unserer Forschung.



Diamantstempelzelle während einer spektroskopischen Messung (Foto John Hernlund).

# ERD- UND PLANETEN- MAGNETISMUS



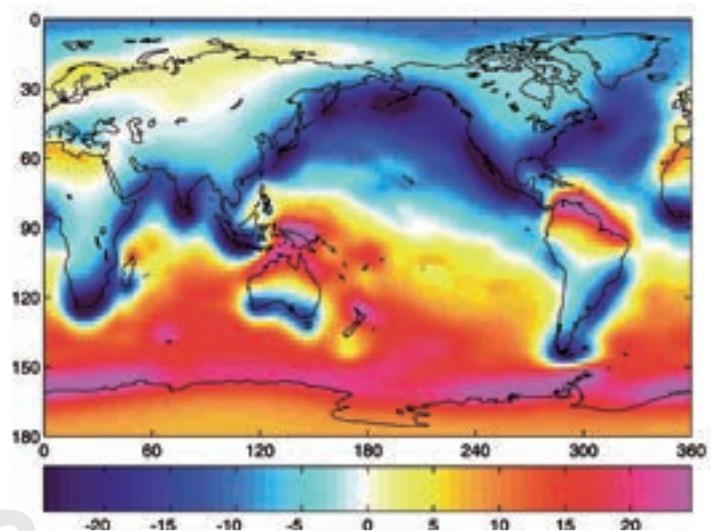
Der Magnetkompass bestimmt anhand des Erdmagnetfeldes die Himmelsrichtungen.

## Erd- und Planeten- magnetismus (EPM)

Die Erde ist von einem internen Magnetfeld umgeben, das uns vor kosmischer Strahlung schützt. Es entsteht im Innern der Erde: Über dem soliden inneren Kern aus Eisen liegt der äussere Kern aus geschmolzenem Eisen und leichteren Elementen wie z. B. Sauerstoff, Silikon und Schwefel. Die Temperaturunterschiede im äusseren Kern bewirken dass die Flüssigkeit in steter Bewegung ist und Konvektionsströme entstehen. Diese sind die Ursache für elektrische Ströme, welche wiederum die Entstehung von Magnetfeldern bewirken. Die Entstehung des Magnetfeldes durch Konvektionsströmungen wird als Dynamoeffekt bezeichnet. Andrew Jackson arbeitet mit seiner EPM Gruppe daran, diese unsichtbaren Vorgänge durch Modelle sichtbar zu machen und so die Mechanismen zu verstehen, die zu den Konvektionsströmungen und dem Dynamoeffekt führen.

Anhand von Messungen des Magnetfeldes an der Oberfläche und im Orbit mit Hilfe von Satelliten lässt sich herleiten, wie das Magnetfeld an der Oberfläche des flüssigen äusseren Kerns aussieht. Um die physikalischen Gesetze zu simulieren, welche den Konvektionsströmen zu Grunde liegen müssen aufwendige Berechnungen durchgeführt werden. Um diese zu ermöglichen, nutzt die Forschungsgruppe das Schweizerische Hochleistungsrechenzentrum (CSCS) in Manno im Tessin. Die Ergebnisse sollen helfen dem Ursprung des Erdmagnetfeldes näher zu kommen, das seit Milliarden von Jahren existiert. Möglicherweise lernt

man auch besser zu verstehen, weshalb sich das Magnetfeld von Zeit zu Zeit umkehrt – das letzte Mal vor 750 000 Jahren. Die Simulationen könnten auch für die Astronomie nützlich sein und Erkenntnisse über die magnetische Aktivität der anderen Planeten in unserem Sonnensystem liefern.

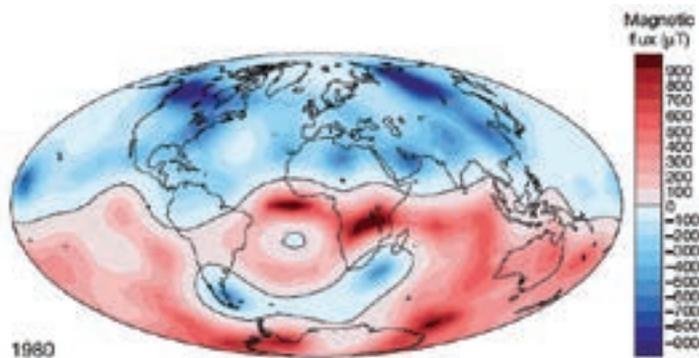


Der geomagnetische Sturm vom 5. 6. November 2001, dargestellt mit einem dreidimensionalen Modell, das auch die Flussdichte im Meer berücksichtigt.

Die Gruppe von Andrew Jackson ist an der SWARM Mission der europäischen Weltraumorganisation ESA beteiligt. In deren Rahmen wurden drei Satelliten gemeinsam mit einer Rakete ins Weltall befördert. Die drei identischen Objekte werden das Erdmagnetfeld mit einer noch nie dagewesenen Präzision messen. Sie umkreisen die Erde auf einer polaren Umlaufbahn zwei nebeneinander in einer Höhe von 450 Kilometer und ein weiterer in 530 Kilometer Höhe. Gemeinsam werden sie die Stärke, Orientierung und die zeitliche Veränderung des Erdmagnetfeldes aufzeichnen. Die Hochpräzisionsmessungen sollen auch kleine elektrische Ströme im Erdmantel, welcher den Kern umgibt entdecken, welche Aufschlüsse über die elektrische Leitfähigkeit des Mantels geben. Diese elektrischen Ströme werden durch schnelle Änderungen im äusseren Magnetfeld verursacht welches vom Sonnenwind aufgebaut wird. Mögliche Schwankungen in der Leitfähigkeit welche man ebenfalls zu entdecken hofft, könnten Fragen über die Temperatur sowie Wasservorkommen im Erdmantel beantworten.



Gesteinsbohrungen im Feld.



Darstellung des Erdmagnetfeld Flusses an der Oberfläche des Erdkerns im Jahr 1980



Magnetfeldfreies Labor.

Neben dem Magnetfeld der Erde und der Planeten erforscht die EPM-Gruppe auch die magnetischen Eigenschaften von natürlichen Materialien. So misst sie z. B. den Magnetismus von Mineralien, und aus ohrkernen gewonnene Seesedimente dienen dazu, Erkenntnisse über die magnetische Beschaffenheit der Umwelt zu gewinnen. Auch menschliches Hirngewebe ist Gegenstand der Magnetismusforschung: Die magnetische Beschaffenheit soll Hinweise auf bestimmte Erkrankungen wie z. B. Alzheimer geben können.

Ausserdem entwickelt die Gruppe von Andrew Jackson neue, auf Magnetismus basierende Techniken, um die Verformung von Gestein zu studieren. Die meisten Experimente werden im Labor für natürlichen Magnetismus durchgeführt, einem fast komplett magnetfeldfrei erbauten Haus ausserhalb der Stadt.



Andrew Jackson



Alexey Kuvshinov



Andreas Gehring

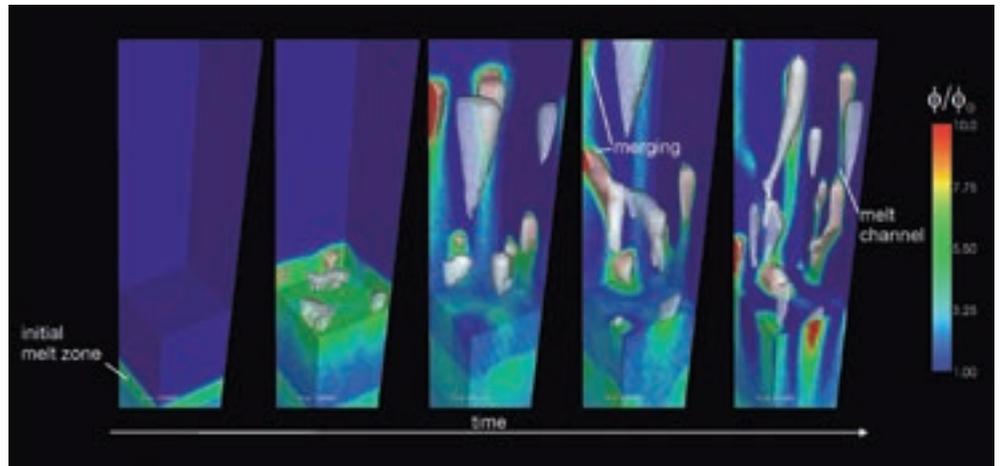


# Geophysikalische Fluidynamik



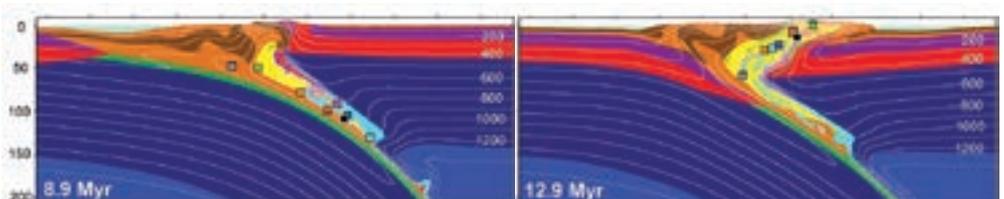
Die Dynamik von langfristigen geologischen und planetaren Prozessen ist in den meisten Fällen zu langsam und zu tief unter der Oberfläche um diese direkt beobachten zu können. Deswegen erforschen die GeophysikerInnen der Fluidynamik die verschiedenen Arten von Strömungs- und Deformationsprozessen in der Erde und erdähnlichen Planeten mit Hilfe von numerischen Modellen. Diese Arbeit umfasst die Berechnung von zwei- und dreidimensionalen Simulationen sowie die Analyse der Resultate mit Hilfe von Messdaten, die bei der Feldarbeit oder im Labor gewonnen werden. Nicht nur die Deformation der Erde wird untersucht. Auch die geochemische und mineralogische Entwicklung des Planeten Erde kann über einen Zeitraum von Milliarden von Jahren modelliert werden.

Die Gruppe von Paul Tackley hat sich auf die Entwicklung von numerischen Modellen spezialisiert. Zu diesem Zweck ist sie Teilhaber am High Performance Cluster Brutus der ETH, einem aus Tausenden von Prozessoren bestehenden, leistungsfähigen Rechnernetzwerk. Der Zugang zu einem solchen Cluster ist Voraussetzung um hochaufgelöste dreidimensionale numerische Simulationen durchführen zu können.



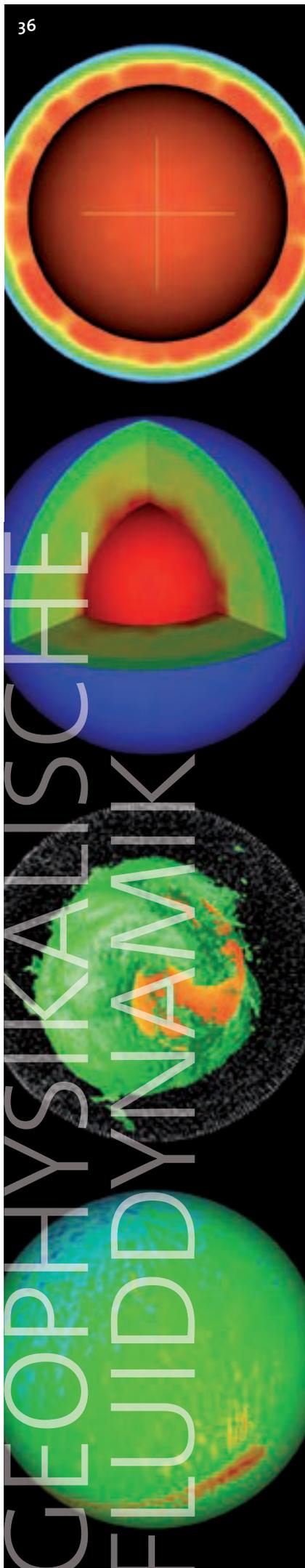
Numerische Simulation von Magmabewegung in partiell geschmolzenem Gestein.

Die Gruppe arbeitet in verschiedenen Teams. Eines widmet sich vor allem der Dynamik der Erdkruste und des obersten Erdmantels. Diese Forscher untersuchen die Prozesse in dieser auch Lithosphäre genannten Erdregion. Sie entwickeln realistische zwei- und dreidimensionale Modelle der Gesteinsdeformation sowie der Temperaturentwicklung. Die Deformation, der Wärmetransport und die mineralogischen Phasenübergänge geben Auskunft darüber, wie die sogenannte Subduktion, das Absinken einer tektonischen Platte unter eine andere, die Gebirgsbildung beim Aufeinanderprallen von Kontinenten sowie die mittelozeanischen Spreizungszonen verlaufen. Wie sind die Alpen oder der Himalaja entstanden? Wie entwickelt sich ein vulkanischer Inselbogen? Was geschieht an einem mittelozeanischen Rücken? Solche Fragen beantworten die numerischen Modellierer mit Hilfe von realistischen Simulationen, die sich mit geologischen, geochemischen und geophysikalischen Messdaten verifizieren lassen.



Numerische Modellierung der Kollision zweier tektonischer Platten.

< Numerische Simulationen des festen Inneren von Merkur, Venus, Erde und Mars (von oben) über Milliarden von Jahren



GEOPHYSIKALISCHE FLUIDDYNAMIK

# Entwicklung

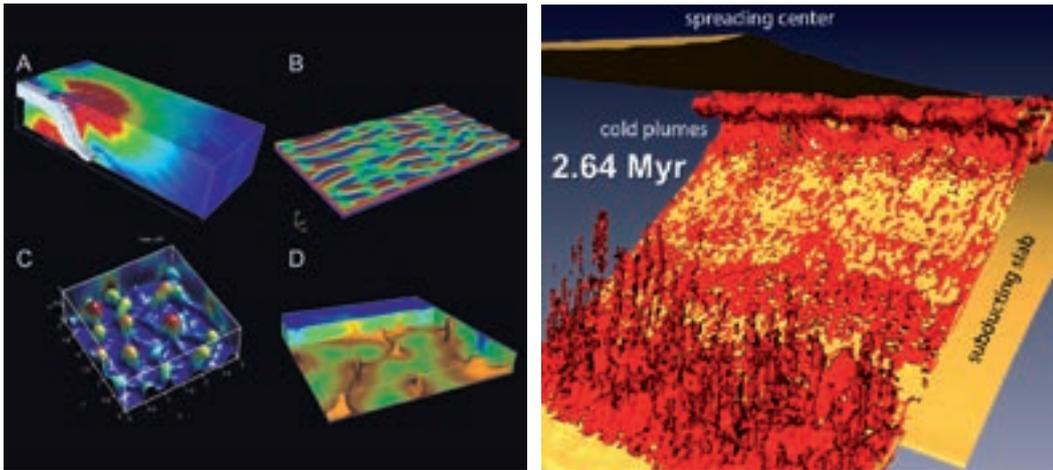
Ein anderes Team widmet sich der Dynamik des Erdmantels. Die Bewegung im Erdmantel wird durch grosse Wärme transportierende Strömungen – die sogenannten Konvektionszellen – bestimmt. Die Forschenden entwickeln numerische Experimente, um den Einfluss verschiedener Parameter auf das Muster der Konvektion zu untersuchen. Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind der Einfluss der Kontinente auf das Fließverhalten des Mantels, die Rolle der mineralogischen Phasenübergänge sowie der Einfluss von Temperatur und chemischer Gesteinszusammensetzung. Dabei werden auch geophysikalische Beobachtungen wie seismische Daten oder Schweremessungen in die geodynamischen Modelle mit einbezogen.



Paul Tackley



Taras Gerya

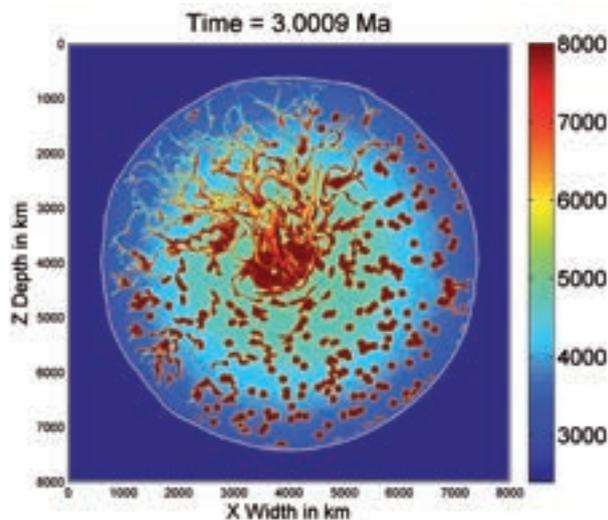


Computersimulation von verschiedenen geodynamischen Prozessen. A) Subduktion B) Gebirgsfaltung, C) Salztektunik D) Konvektion.

Kalte Gasfahnen – sogenannte Plumes – oberhalb einer subduzierenden Platte.

Die Vorgänge, die von einem Nebel kleinster Partikel zu den Planeten in unserem heutigen Sonnensystem geführt haben, können noch immer nicht gänzlich erklärt werden. Die meisten Spuren der Entstehung sind heute verwischt, deshalb muss man sich auf numerische Simulationen und Laborexperimente stützen. Ein weiteres Team widmet sich dieser Arbeit. Sie ist besonders spannend und herausfordernd, weil sich viele Prozesse bei der Entstehung der Planeten überlappen können. Zum Glück liefern die erdähnlichen Planeten Merkur, Venus und Mars sowie verschiedene Asteroiden wertvolle Daten, mit denen sich Rückschlüsse auf diese Prozesse ziehen lassen. Mit Modellen vom Inneren der Planeten lässt sich die frühe Entwicklung des Sonnensystems nachvollziehen. Simuliert werden vor allem die Entstehung des eisernen Planetenkerns sowie des Magma Ozeans, der wahrscheinlich einmal die junge Erde bedeckt hatte. Für diese Untersuchungen arbeitet man mit Forschenden aus der Astronomie und Geochemie zusammen, die die Erkenntnisse der Geophysiker mit ihren Messungen wertvoll ergänzen können.

Wie auf der Erde findet oder fand auf den Planeten Venus und Mars auch eine innere thermische Umwälzung – eine sogenannte Mantelkonvektion statt. Diese Vorgänge in erdähnlichen Planeten werden ebenfalls modelliert. Dabei wendet man ähnliche Techniken an wie zur Erforschung des Erdmantels. Unterschiedliche Konvektionsmuster erzeugen unterschiedliche Eigenheiten in der Tektonik, Topographie und dem Schwerfeld der Himmelskörper. Die Berechnungen dazu können mit direkten Messungen vergangener und aktueller Weltraummissionen verglichen und so verifiziert werden.



Computersimulation der Entstehung des Erdkerns durch absinkende Eisendiapire.

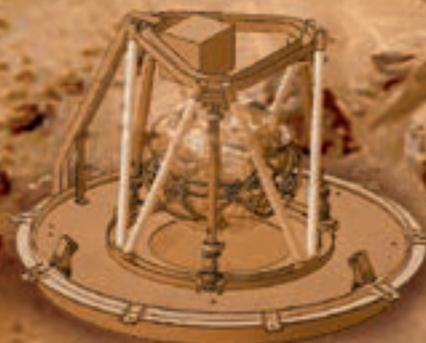


## Seismologie und Geodynamik

Die Seismologie befasst sich mit dem Aufbau, der Struktur und dem Zustand des Erdinnern sowie der Entstehung von Erdbeben und den Prozessen der Wellenausbreitung in der Erde. Die Lithosphäre die feste Gesteinshülle und deren oberste Schicht die Erdkruste auf welcher wir leben, bilden die nur 100 Kilometer dicke Haut unseres Planeten. Darunter besteht er aus zähflüssigem Material. Die Erde ist also eigentlich ein im Inneren heißer rotierender Tropfen der von seiner eigenen Gravitationskraft zusammengehalten wird und von einer dünnen Gesteinskruste umgeben ist. Die Strömungen im Erdinnern bewirken eine ständige Umformung und Bewegungen der in verschiedene Platten zerbrochenen Lithosphäre. Sie sind die Ursache für Erdbeben, Vulkane und Gebirgsbildung. All diese Prozesse an und in der Lithosphäre und im Erdinnern werden mit den Begriffen Geodynamik und Plattentektonik umschrieben.

Die Forschungsgruppe Seismologie und Geodynamik SEG von Domenico Giardini und Eduard Kissling benützt seismische Wellen aller Arten und Wellenlängen um mit Hilfe der seismischen Tomographie die dreidimensionale Struktur des Erdinnern abzubilden. Diese noch junge Untersuchungsmethode ist bereits heute die mit Abstand wichtigste geophysikalische Methode zur Erfassung und Abbildung von Strukturen im Erdinnern. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt der Gruppe bildet die Verbesserung und Erweiterung der Methode. Vor Kurzem ist es gelungen, die Refraktions- und Reflexionsseismik mit der teleseismischen Tomographie zu kombinieren. Die Auflösungsgenauigkeit der Tomographie konnte dadurch signifikant gesteigert werden. So gelang es die Topographie der Grenze zwischen Lithosphäre und der darunterliegenden zähflüssigen Asthenosphäre unter den Alpen abzubilden.

Die Weiterentwicklung der Oberflächenwellen Tomographie und deren Verbindung mit der Raumwellen-Tomographie bilden einen weiteren Schwerpunkt. Damit wird die Geometrie der sogenannten sekundären oder S Wellen untersucht die bei Erdbeben auftreten. Sie sind von entscheidender Bedeutung für ein besseres Verständnis der Flieseigenschaften der sogenannten Rheologie der Lithosphäre und des Erdmantels.

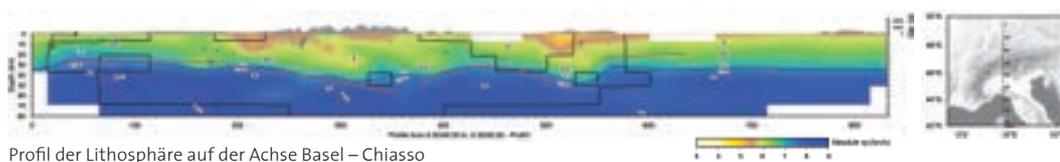


Die Gruppe SEG verbindet Messungen in Feldexperimenten mit methodisch-theoretischen Arbeiten. Einer der Schwerpunkte der Forschung stellt die Untersuchung von sogenannten Orogenen, den Knautschzonen zwischen zwei tektonischen Platten, und Subduktionszonen dar. Die dreidimensionale Tiefenstruktur des weiteren Alpenraumes ist vor allem dank der jahrzehntelangen Forschung des Instituts für Geophysik an der ETH Zürich weltweit die mit Abstand am besten bekannte «Wurzelzone» eines Gebirges. Sie erlaubt neben Einblicken in das unterschiedliche rheologische Verhalten von Oberkruste, Unterkruste und Mantellithosphäre auch das Studium der treibenden Kräfte bei der noch heute anhaltenden Hebung der Alpen. Diese Forschung wird in enger Zusammenarbeit mit den Gruppen Geophysikalische Fluidynamik sowie Strukturgeologie und Tektonik durchgeführt.

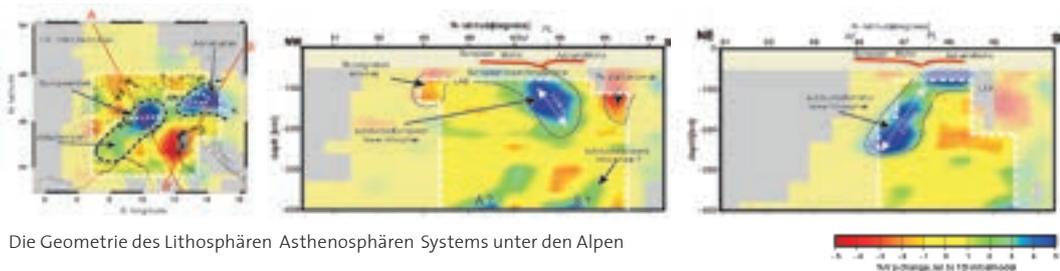


Domenico Giardini

Die Kombination von Primär- und Sekundär Wellentomographie ist die beste Methode zur Erfassung und Abbildung der dreidimensionalen Strukturen von Subduktionszonen. Die Gruppe verbindet diese Methode mit fluiddynamischen und petrophysikalischen Modellierungen. Damit kann man zum Beispiel die Entstehung und Migration von Magmen und Fluiden studieren, welche für die Evolution der kontinentalen Kruste von grosser Bedeutung sind.

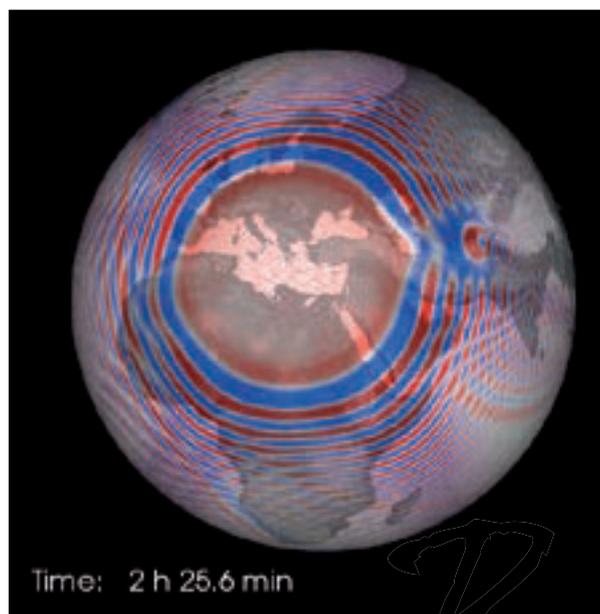


Profil der Lithosphäre auf der Achse Basel – Chiasso



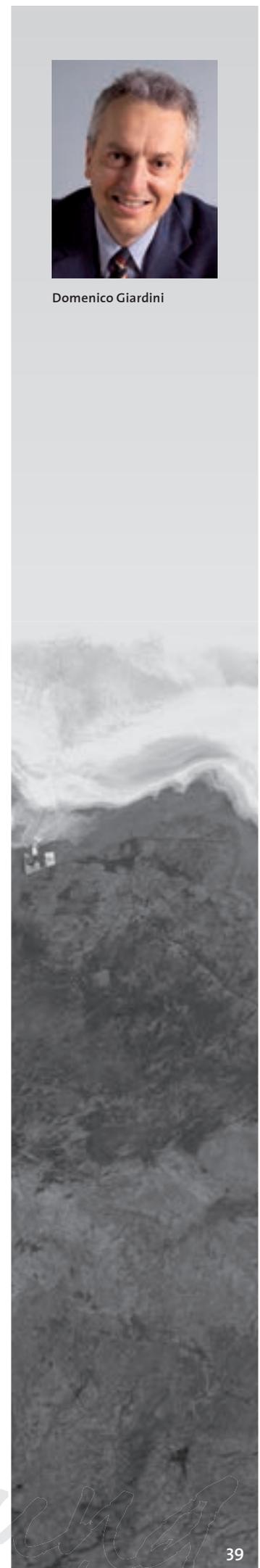
Die Geometrie des Lithosphären-Asthenosphären-Systems unter den Alpen

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung und Modellierung der Erdbeben-Herdynamik und von Wellenformen in komplexen Medien. Mit Hilfe von geodätischen und seismischen Methoden werden Modellrechnungen mit gemessenen regionalen Krustendeformationen verglichen. So lassen sich alle Deformationen in der Lithosphäre studieren, welche durch die plattentektonischen Spannungen ausgelöst werden und diese abbauen.



Simuliertes Erdbeben bei Kreta:  
Die Ausbreitung der Erdbebenwellen über den Globus.

Die Entwicklung von besseren und breitbandigen Seismometern bildet eine wesentliche Voraussetzung für die Erfolge der modernen Seismologie. Um den inneren Aufbau von Planeten und deren Monden zu erkunden, sind Seismometer unverzichtbare Instrumente. Allerdings stellt der Einsatz im Weltall extreme Anforderungen an die Geräte, sie müssen eine besonders robuste Mechanik haben und in grossen Temperaturbereichen einsetzbar sein. In internationaler Zusammenarbeit entwickelt ein Team der SEG die Elektronik solcher leichten und robusten Seismometer für den Einsatz in planetarischen Missionen der ESA, der NASA und der Japan Aerospace Exploration Agency, der JAXA.

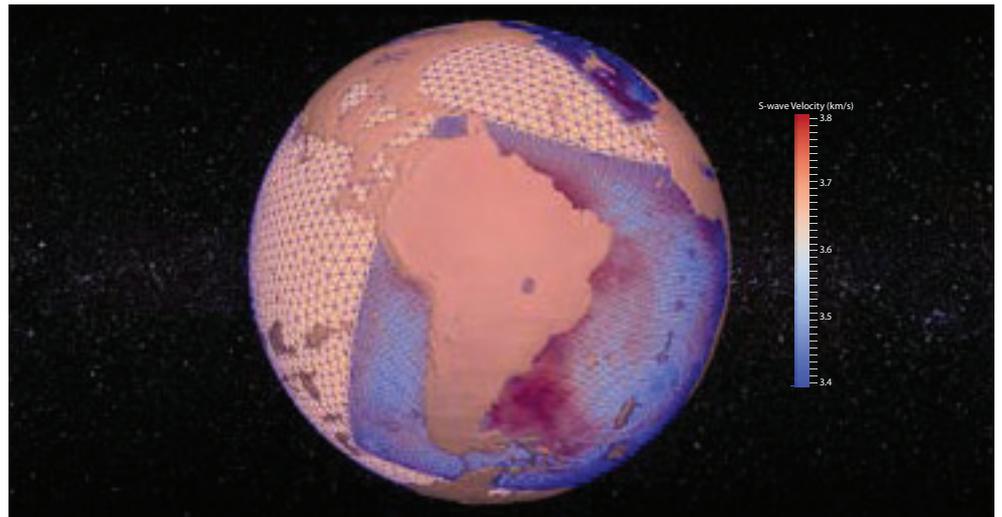


## Seismologie und Wellenphysik

Ber

Der feste Erdkörper befindet sich in einem ständigen Schwingungszustand. Dieser wird ausgelöst durch so verschiedene Phänomene wie Ozeanwellen, atmosphärische Turbulenzen oder Erdbeben, welche seismische Wellen erzeugen. Diese Wellen reisen mit Geschwindigkeiten von teilweise mehr als 10 Kilometern pro Sekunde durch die Erde und sammeln somit Informationen über deren innere Struktur – ganz ähnlich wie ein Röntgenstrahl auf seinem Weg Informationen über den menschlichen Körper sammelt.

Die Gruppe von Andreas Fichtner nutzt Aufzeichnungen seismischer Wellen, GPS-Daten von Deformationen der Erdoberfläche sowie Daten des Erdschwerefelds, um die Struktur und Evolution der Erde sowie die Charakteristiken grosser Erdbeben zu verstehen. Wichtigstes Werkzeug sind dabei Computersimulationen, welche die seismische Wellenausbreitung und die Entstehung von Erdbeben in geologisch besonders aktiven Regionen darstellen. Diese Simulationen nutzen die Fähigkeiten moderner Hochleistungsrechner wie «Monte Rosa» oder «Piz Daint» am Schweizerischen Hochleistungsrechenzentrum (CSCS) in Lugano. Mit der Hilfe von Grafikkarten, die ursprünglich für die Bildverarbeitung in Computerspielen entwickelt wurden, erlauben es die modernen CSCS-Rechner Erdbeben und seismische Wellen in der Erde mit einer Genauigkeit zu berechnen, die auf einem herkömmlichen Desktop mehr als 100 Millionen Jahre Rechenzeit in Anspruch nehmen würde.

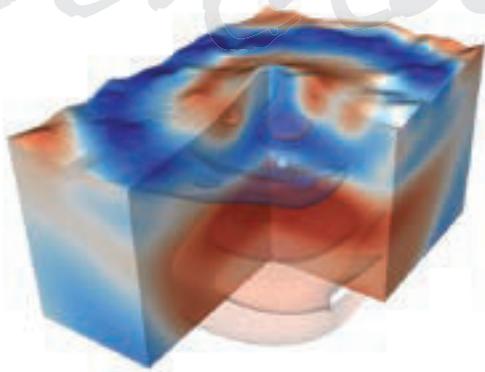


Modell der festen Erde bestehend aus Millionen kleiner Tetraeder, mit Topographie (überhöht) und Scherwellengeschwindigkeit in 100 Kilometer Tiefe.

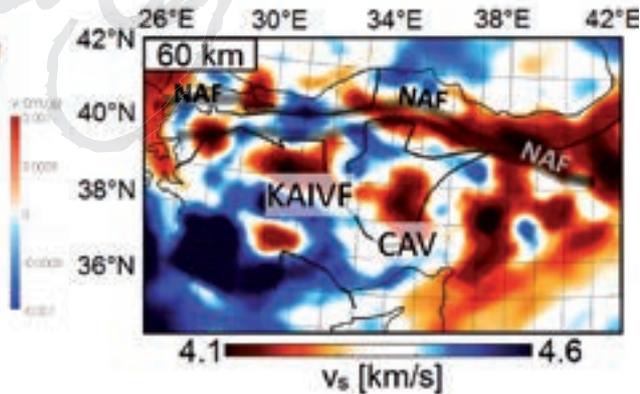
Diese Kombination moderner mathematischer Methoden für Computersimulationen und die Verfügbarkeit der Hochleistungsrechner am CSCS macht es möglich, die Struktur und Dynamik der Erde mit vorher nicht gekannter Präzision zu studieren und dazu enorme Datenmengen zu nutzen, die ein gewöhnlicher Computer nicht verarbeiten (geschweige denn speichern) könnte.

Dank diesen aussergewöhnlichen Ressourcen zeichnen die Forschungsergebnisse der Gruppe ein detailliertes Bild von Konvektionsbewegungen in der tiefen Erde (bis mehrere 100 Kilometer Tiefe) und deren Zusammenhang mit oberflächennahen Prozessen wie Vulkanismus, Gebirgsbildung, Erdbebenaktivität und der Entstehung von Lagerstätten. So belegen neueste Resultate zum Beispiel, wie heisses und weniger dichtes Gestein aus über 1000 Kilometer Tiefe unter Grossbritannien fast wie in einer dünnen Röhre in Richtung Island transportiert wird, wo es im Zuge von Vulkanausbrüchen zu Tage tritt. Ebenso konnte die Gruppe in etwa 50 bis 100 Kilometer Tiefe unter der Osttürkei eine ausgedehnte Schwächezone nachweisen. Diese ist für die Bildung der Nordanatolischen Bruchzone verantwortlich, entlang derer sich regelmässig grosse Erdbeben ereignen.

# Seismologie



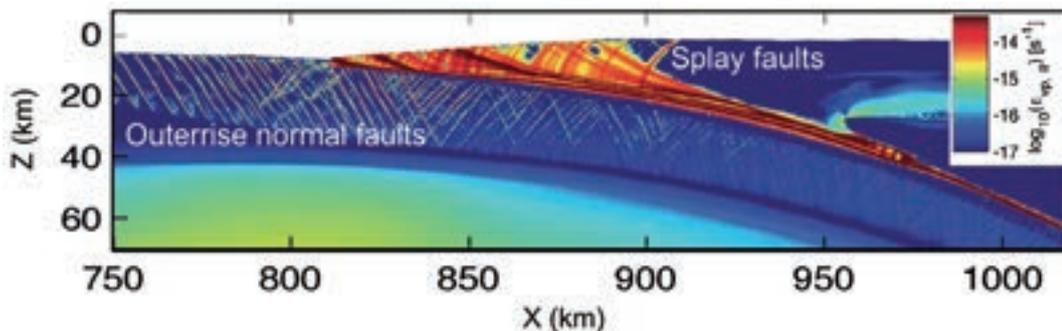
Ausbreitung seismischer Wellen durch ein Modell des Mount St. Helens.



Scherwellengeschwindigkeit in 60 Kilometer Tiefe unter Anatolien. Gut sichtbar sind Niedriggeschwindigkeitszonen unter vulkanischen Provinzen (Kirka-Afyon-Isparta Vulkanfeld [KAIVF], Zentral-Anatolisches Vulkanfeld [CAV]) sowie die Signatur der Nordanatolischen Bruchzone (NAF), entlang derer sich regelmäßige große Erdbeben ereignen.

Detaillierte Informationen über 3D-Struktur werden nicht nur zum Verständnis von Dynamik und Evolution der Erde genutzt, sondern auch um die Bruchprozesse von Erdbeben zu studieren. Ist die innere Struktur der Erde ausreichend gut bekannt, so lassen sich Aussagen darüber treffen, wie Gestein unter hohen Spannungen bricht und sich der so entstehende Bruch ausbreitet.

In Zusammenarbeit mit Forschern der Australian National University in Canberra entwickelt die Gruppe Methoden, mit denen solche Eigenschaften großer Erdbeben nahezu in Echtzeit bestimmt werden können. Sind Eigenschaften wie Tiefe und Orientierung des Bruchs bekannt, können und sollen sie dazu genutzt werden, um zuverlässigere Vorhersagen über potentielle Tsunamis im Südpazifischen Raum zu treffen.



Numerisches Modell einer Subduktionszone, entlang welcher eine tektonische Platte (von links kommend) unter einen Kontinent (rechts) abtaucht. Rötliche Regionen repräsentieren Bruchzonen, die für hohe Erdbebenaktivität verantwortlich sind.

Um die räumliche Auflösung von 3D-Erdmodellen weiter zu verbessern, arbeitet die Gruppe mit Unterstützung des europäischen Datenzentrums ORFEUS und IT-Fachleuten des CSCS an der Berechnung eines neuen umfangreichen seismischen Datensatzes auf der Basis von seismischem Rauschen. Dieses wird größtenteils von Ozeanwellen generiert und wäre ohne das rechenintensive Processing der Gruppe nicht nutzbar. Der neue Datensatz wird zur Erkundung der Erdstruktur und der Interaktion zwischen Ozeanen und der festen Erde genutzt.

Die Arbeit der Gruppe erfordert ein hohes Maß an Interdisziplinarität. Sie agiert somit als Bindeglied zwischen verschiedensten Naturwissenschaften, von Mathematik und Physik über Informatik und Seismologie bis hin zu Geodynamik, Tektonik und Geologie.

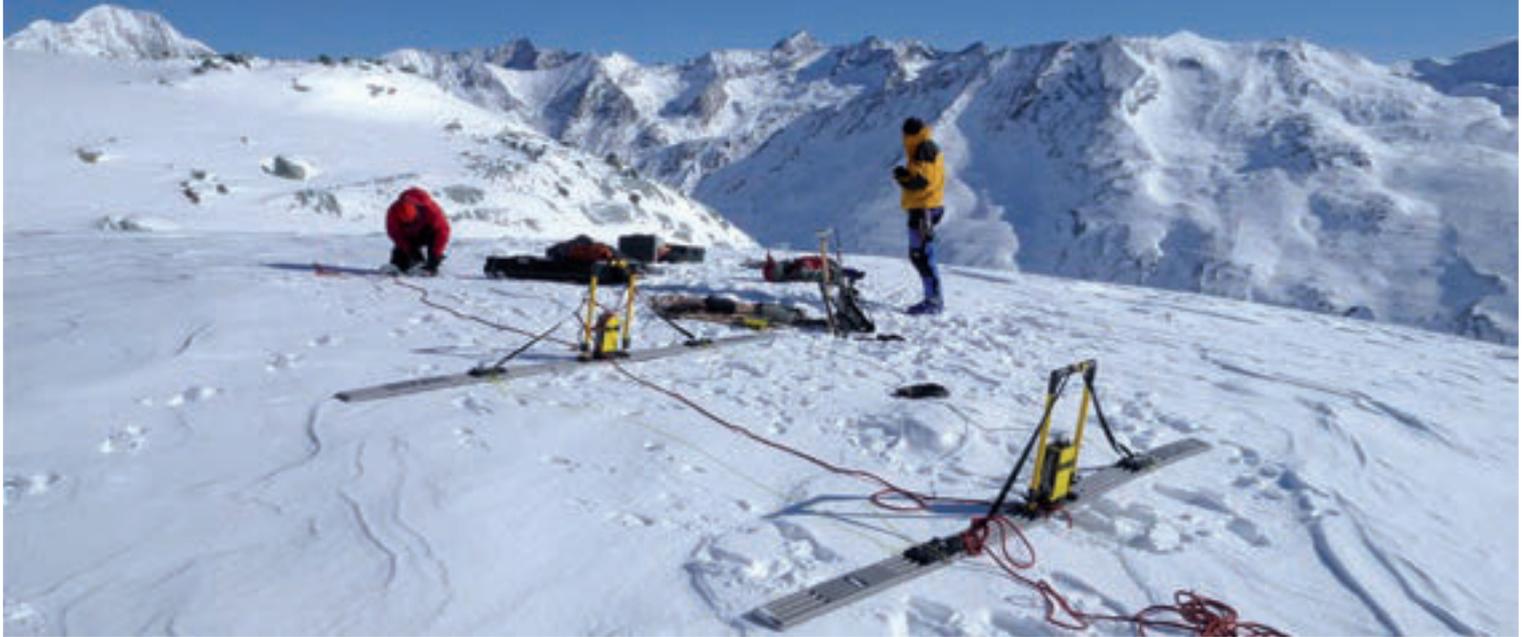
Der Hochleistungsrechner «Piz Daint» am CSCS verarbeitet enorme Datenmengen und ermöglicht so Simulationen von bislang nicht bekannter Präzision. >



Andreas Fichtner



# EXPLORATIONS- UND UMWELTGEOPHYSIK



Bodenradarmessungen in den Schweizer Alpen.

## Explorations- und Umweltgeophysik

# Untergrund

Die Explorations- und Umweltgeophysik befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung geophysikalischer Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrunds. Der Fokus liegt auf dem Teil der Erdkruste, der mit Bohrungen erreicht werden kann – das heisst zwischen der Oberfläche und etwa zehn Kilometer Tiefe. Dieser Bereich ist für viele gesellschaftlich relevante Probleme von grosser Bedeutung.

Die Forschungsgruppe für Explorations und Umweltgeophysik (EEG) von Johan Robertsson und Hansruedi Maurer wendet verschiedenste geophysikalische Techniken an, die von seismischen Methoden und Bodenradar über geoelektrische bis zu elektromagnetischen Messungen reichen. Geophysikalische Methoden sind mit modernen medizinischen Abbildungsverfahren vergleichbar: Die Idee ist, das Innere der Erde zerstörungsfrei zu untersuchen, da ein direkter Zugang zum Untergrund oft aufwendig oder unmöglich ist. Die oft stark variierenden physikalischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrunds stellen dabei grosse Herausforderungen dar.

Eine Spezialität der EEG Gruppe ist ihre methodische Breite und das weite Spektrum an Forschungsthemen. Diese reichen von der Physik des oberflächennahen Untergrunds über die Entwicklung neuer theoretischer Ansätze bis zu innovativen Anwendungen. Dabei profitiert die EEG Gruppe von der engen Zusammenarbeit mit theoretisch und praktisch ausgerichteten Mitgliedern.

Die EEG Gruppe ist in ein Netzwerk von Universitäts- und Industriepartnern eingebunden. So führt sie zusammen mit der TU Delft und der RWTH Aachen ein Joint Master Programm in Angewandter Geophysik durch. Weiter profitiert die Gruppe von der engen Zusammenarbeit mit führenden Firmen im Explorations- und Energiesektor.



Geophysikalische Messkampagne in Botswana (Afrika).

Aufgelistet ist hier eine Auswahl an Gebieten, in welchen die EEG Gruppe zurzeit signifikante Beiträge leistet.

- **Beschreibung geothermaler Systeme** – Geothermische Energie gewinnt zunehmend an Bedeutung als erneuerbare Energie. Ausgehend von Feldexperimenten werden geophysikalische Techniken zur Beschreibung von unterschiedlichen geothermalen Reservoiren entwickelt.
- **Permafrost** – Der Permafrost taut vielerorts als Folge der globalen Erwärmung auf, was zu Hangrutschungen führen kann. In Zusammenarbeit mit anderen Instituten der ETH Zürich werden verschiedene Blockgletscher in den Alpen mit geophysikalischen Methoden intensiv untersucht.
- **Überwachung von radioaktiven Abfällen** – Forscher der EEG Gruppe untersuchen Optionen, um Lagerstätten für radioaktive Abfälle zu überwachen. Um kleinste Änderungen zu erkennen werden modernste Verfahren wie die seismische Wellenforminversion eingesetzt.



Seismische Messungen auf einem alpinen Gletscher.



Schiff mit Sonden beim Sammeln von marinen seismischen Daten.

- **CARNEVAL Industriekonsortium** – Das CARNEVAL Konsortium fokussiert auf die Untersuchung oberflächennaher Strukturen, die einen störenden Einfluss auf seismische Messungen haben. Die Schwerpunkte liegen auf der Verbesserung von Messmethoden, der gekoppelten Auswertung verschiedener Datensätze und der Entwicklung von Techniken zur Unterdrückung des Einflusses oberflächennaher Schichten auf seismische Daten, die für die Erkundung tiefer liegender Strukturen aufgenommen wurden.
- **Erfassung, Modellierung und Auswertung des gesamten seismischen Wellenfeldes** – Moderne Messinstrumente mit mehreren 100 000 Kanälen können das seismische Wellenfeld in einer sehr hohen Dichte abtasten. Die EEG Gruppe bearbeitet Aufzeichnungen mit Instrumenten, die seismische Wellen in verschiedene Raumrichtungen anregen und messen können. Diese Datensätze sind die Grundlage für die Entwicklung neuer wellenleichungsbasierter Abbildungsverfahren und Auswertungsansätze.
- **Wellenausbreitungslabor** – Dieses Labor ermöglicht es, die Wechselwirkung seismischer Wellen mit Medien auf eine neue Art zu studieren. Dazu wird das physikalische Experiment in eine numerische Simulation eingebunden. Mögliche Anwendungen sind das Studium nicht-linearer Effekte und Experimente mit Medien, bei denen die Ausbreitung seismischer Wellen bisher nur unzureichend verstanden wird.



ETH High Performance Computer Cluster «Brutus»



Seismische Messungen im Grimsel-Felslabor.



Johan Robertsson



Hansruedi Maurer





Labor der Geothermischen Energie und Geofluide Gruppe. Hier werden reaktive Durchfluss Experimente und Visualisierungen von multi phasen Strömen in 3D gedruckten porösen Medien durchgeführt.

## Geothermische Energie und Geofluide

*Fluide*

Die Gruppe Geothermische Energie und Geofluide (GEG) unter der Leitung von Professor Martin Saar ist eine Stiftungsprofessur der Werner Siemens-Stiftung. Die Wissenschaftler untersuchen den Flüssigkeits- und Energietransport in der Erdkruste. Dazu entwickeln und nutzen sie Computersimulationen und führen Laborexperimente und Felduntersuchungen durch. Ziele der Forschung sind es fundamentale wissenschaftliche Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie der Fluid- und Energietransport in der Erdkruste funktioniert und zu Lösungen der dringlichsten Herausforderungen der Gesellschaft beizutragen insbesondere bezüglich der Energie- und Geofluid (z. B. Wasser) Versorgung sowie des globalen Klimawandels. Zu den Forschungsthemen gehören:

- Wasser- und CO<sub>2</sub> basierte geothermische Energie:
  - Exploration (Auffinden von Ressourcen)
  - Gewinnung (aus geologischen Reservoiren)
  - Umwandlung: Von Wärme für Fernwärme und industrielle Prozesse  
Von Enthalpie (Wärme- und Druckenergie) in Elektrizität
- Entwicklung und Betrieb von Petrothermalen Geothermie Systemen (auch EGS genannt)
- Permanente geologische CO<sub>2</sub> Speicherung zur Minderung des globalen Klimawandels
- Erd Batterie: Untergrund Energie Speicherung von überproduzierter Solar- und Wind-Energie

- Kopplung der Geothermie mit Bio-Solar und oder Wind Energie (z. B. als geothermischer Vorwärmer)
- Grundwasser-Lösungsmittel und Partikelfluss (z. B. Tracer DNA Nanopartikel, Verunreinigungen) und Trinkwasserversorgung

Die Forschung ist eng mit mehreren Geowissenschaften und anderen wissenschaftlichen und technischen Bereichen verbunden wie Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Geophysik, Geochemie, Strömungsmechanik, Explorationsgeophysik, Informatik und Mathematik sowie Maschinen-, Chemie- und Petroleumtechnologie. Dementsprechend vielfältig sind die Expertisen der GEG Mitarbeiter.

Beispiele der Forschungsprojekte der GEG Gruppe:

### Geoelektrische Methoden zur Geothermie-Exploration

Neue elektromagnetische Mess- und Datenverarbeitungs-methoden werden zur exakteren Erkundung geothermischer Ressourcen (z.B. in der Schweiz oder im Ostafrikanischen Graben siehe Abbildung) und zur Bestimmung von Permeabilitätsveränderungen als Folge von hydraulischen Stimulationen bei der Entwicklung von Petrothermalen Geothermie Systemen (EGS) entwickelt.

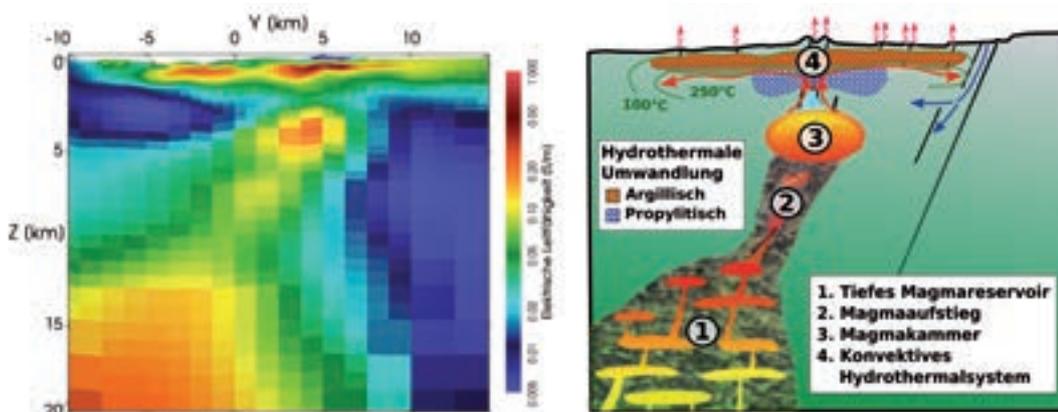
### Entwicklung von Numerischen Simulatoren

Entwicklung neuer Computerprogramme (numerische Simulatoren) und Koppelung dieser mit existierenden numerischen Simu-

latoren um reaktiven Flüssigkeits- und Wärme Transport in der Erdkruste zu simulieren. Zum Beispiel wurde ein Reaktionssimulator entwickelt (Reaktoro.org) und mit dem Multiphysics Simulator MOOSE (Mooseframework.org) vom Idaho National Lab gekoppelt. Dadurch lassen sich nun massiv-parallele Simulationen des chemischen multi phasen Flüssigkeits und Wärme Transport auf Reservoir Skalen durchführen Ein weiteres Beispiel ist unser lattice Boltzmann Simulator (LHydra.umn.edu), der ähnliche Transportprozesse (auf Porengröße) bewerkstelligt. Computersimulationen sind extrem wichtig wenn Raum und oder Zeit Skalen untersucht werden sollen, die im Laborversuch unmöglich machbar sind.

### Kombination von Feld-, Labor- und Computeruntersuchungen

Mit Bohrkernen aus Geothermie- oder CO<sub>2</sub> Einspeicherungsbohrungen werden reaktive Durchflussversuche im Labor durchgeführt bei denen CO<sub>2</sub> gesättigtes Wasser durch den Kern strömt und mit den Mineralien reagiert. Diese Experimente werden innerhalb des GEG-Gruppen-eigenen Röntgen-Strahl-Tomographen (XRCT) durchgeführt so dass 3D Bilder der Mineral Auflösungen Ausfällungen während des Durchflusses erstellt werden können. Anschliessend werden diese 3D Gesteins Bilder im 3D Drucker transparent gedruckt. Diese 3D Drucke werden dann im GEG-Laserlabor Particle Image Velocimetry und Laser Induced Fluorescence Versuchen unterzogen wobei multiphasen Flüssigkeiten durch die gedruckten Modelle geströmt werden und gleichzeitig sowohl das 3D Geschwindigkeits-Vektor-Feld als auch das 3D Feld der Lösungssstoffe visualisiert werden. Letztlich werden diese 3D Felder verwendet um Computer Simulationen zu testen, mit denen später die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf geothermische Reservoirgrößen übertragen werden Dies ermöglicht voll gekoppelte (Druck Flussgeschwindigkeit Temperatur Chemie) Simulationen von geothermischen Reservoirprozessen durchzuführen. Mit dieser Forschung werden Fragen bezüglich der langfristigen Permeabilitätsänderungen CO<sub>2</sub>-Leckagepotentialen oder thermischen Durchlaufzeiten bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung oder der CO<sub>2</sub>-basierten Geothermie bearbeitet. Dies hat Auswirkungen auf die Gesellschaft in den Bereichen Klimaschutz und erneuerbare Energieversorgung.



Untergrundmodell der elektrischen Leitfähigkeit eines Geothermalfelds im Ostafrikanischen Graben. Das Modell wurde durch 3D Inversion von magnetotellurischen Daten erzeugt und zeigt deutlich den typischen Aufbau eines vulkanischen Hochenthalpie Geothermie Systems. Die Studie entstammt einer Kollaboration zwischen der GEG Gruppe (Samrock, Saar), der EPM Gruppe (Grayver) und der isländischen Geothermiefirma Reykjavik Geothermal

### Ein hocheffizientes, CO<sub>2</sub>-speicherndes Geothermie-Kraftwerk und Speicher von Sonnen/Wind-Energie

Die GEG Gruppe hat eine neue Methode entwickelt um hocheffizient geothermischen Strom zu erzeugen und gleichzeitig Sonnen- und Wind-Energie zu speichern. Hierbei wird CO<sub>2</sub> von fossil befeuerten Kraftwerken zur permanenten Speicherung in den Untergrund injiziert, um den globalen Klimawandel zu reduzieren. Ein kleiner Teil des dann im Untergrund geothermisch erhitzten CO<sub>2</sub> zur hoch effizienten Grundlast Stromerzeugung zurück an die Oberfläche geleitet und anschließend in den geothermischen CO<sub>2</sub> Speicherbehälter zurückgeführt so dass kein CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben wird Die Verwendung von CO<sub>2</sub> anstelle von Wasser, um Wärme zu extrahieren, ermöglicht die Nutzung von wesentlich niedrigeren Ressourcentemperaturen Gleichzeitig können hydraulische Stimulationen zur Erzeugung erhöhter Durchlässigkeiten vermieden werden Schliesslich kann dieses Konzept auch der gleichzeitigen gross skaligen hocheffizienten kurz bis langfristigen Speicherung von Sonnen- und Wind Energie im Untergrund dienen.

Simulation der Injektion einer Flüssigkeit in einen Riss mit MOOSE. >



Martin Saar



Xiang-Zhao Kong



## Professur für Seismologie und Schweizerischer Erdbebendienst SED

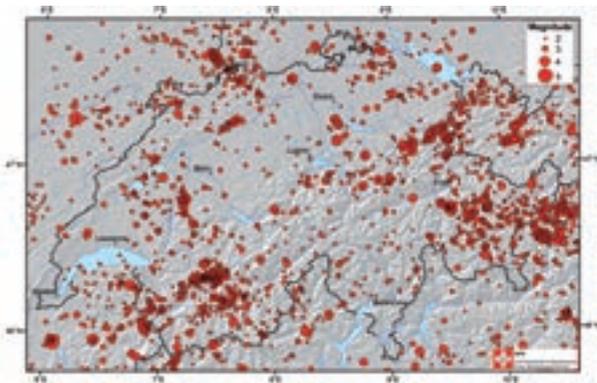
Die Beobachtung sowie die Ursachen und Auswirkungen von Erdbeben stehen im Zentrum der Forschungsaktivitäten der Professur für Seismologie und der Tätigkeiten des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) an der ETH Zürich. Erdbeben sind auch in der Schweiz eine ernst zu nehmende Gefahr und bergen eines der grössten Risiken unter den Naturgefahren. Gleichzeitig beinhalten Erdbebenwellen reichhaltige Informationen über den Aufbau unseres Planeten. Seit Juni 2013 leitet Professor Stefan Wiemer die Forschungsgruppe Seismologie. Er ist gleichzeitig Direktor des SED, der Fachstelle des Bundes für Erdbeben.

### Der Schweizerische Erdbebendienst

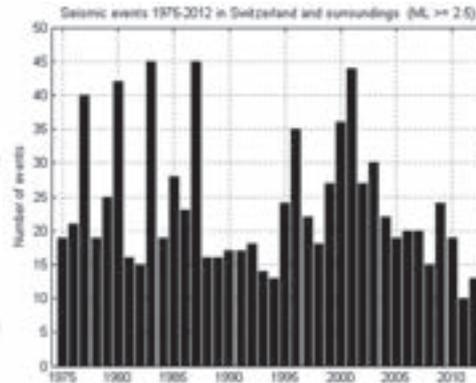
Der SED überwacht die seismische Aktivität in der Schweiz sowie im grenznahen Ausland und beurteilt die Erdbebengefährdung in der Schweiz. Er trat in die Fussstapfen der 1878 gegründeten Erdbebenkommission, mit welcher die Schweiz vor Ländern wie Japan oder Italien eine offizielle Institution dieser Art geschaffen hatte. In seiner heutigen Form als ausserdepartementale Einheit an der ETH Zürich, besteht der SED seit 2009 und beschäftigt ungefähr 60 Personen als Wissenschaftler, Doktorandinnen, Techniker und in der Administration. Ein Grossteil der Forschungsaktivitäten ist durch Drittmittel finanziert. Die Gruppe forscht gemeinsam mit anderen Institutionen an einer Vielzahl europäischer und internationaler Projekte, was einen regen fachlichen Austausch über die Landesgrenzen hinaus garantiert. Obwohl der Schwerpunkt der meisten Arbeiten auf der Schweiz liegt, betätigt sich der SED auch an Projekten im Ausland. Zurzeit betreibt er beispielsweise ein Messnetzwerk von mehr als 30 Stationen in Bhutan sowie einige Stationen in Grönland.

### Erdbeben in der Schweiz

Der SED registriert in der Schweiz und im nahen benachbarten Ausland durchschnittlich zwei Erdbeben pro Tag, das ergibt im Jahr zwischen 500 und 800 Ereignisse. Ungefähr zehn davon sind jeweils stark genug (ca. Magnitude 2.5 oder mehr) um von der Bevölkerung verspürt zu werden. Im Vergleich mit anderen europäischen Ländern weist die Schweiz eine mittlere Erdbebengefährdung auf, wobei regionale Unterschiede bestehen: Im Wallis, in Basel, im St. Galler Rheintal, in Mittelbünden, im Engadin und in der Zentralschweiz werden mehr Erdbeben registriert als in anderen Gebieten. Im Durchschnitt ist in der Schweiz alle 60 bis 100 Jahre mit einem starken Erdbeben mit einer Magnitude von etwa 6 zu rechnen. Ein Erdbeben dieser Stärke ereignete sich zum vorerst letzten Mal im Jahr 1946 bei Sierre im Wallis. Ein solches Beben kann aber überall und jederzeit in der Schweiz auftreten.



Erdbeben in der Schweiz 1975 bis 2012.



Erdbeben in der Schweiz von 1975 bis 2012 mit einer Magnitude von 2,5 oder mehr

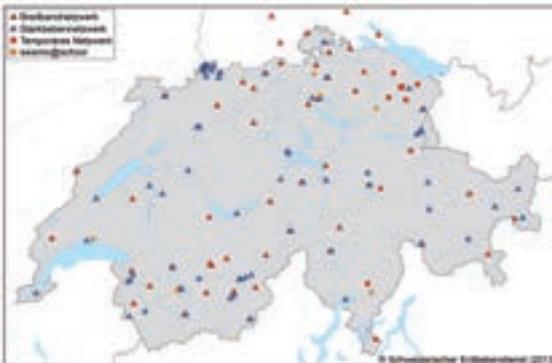
### Erdbebenüberwachung und Alarmierung

Seit 1975 betreibt der SED ein seismisches Stationsnetz mit Echtzeit-Kommunikation und zentraler Datenerfassung, um die Erdbebenaktivität in der Schweiz zu überwachen. Seit Mitte der 90er Jahre existiert das breitbandige Stationsnetz annähernd in der heutigen Konfiguration.

Die hochempfindlichen Seismometer erfassen bereits kleinste Erschütterungen und sind in der Lage Bodenschwingungen über einen sehr breiten Frequenzbereich aufzuzeichnen. Aufgrund dieser Eigenschaften dienen sie nicht nur zur Überwachung globaler und regionaler Erdbeben, sondern ermöglichen es auch, den Aufbau der Erde beziehungsweise der Alpen zu studieren. Mikroerdbeben z. B. im Rahmen von Geothermieprojekten seismisch zu überwachen oder geotechnische Eigenschaften des Untergrunds zu bestimmen.



Station des Starkbebennetzwerk bei Buchs, Buchserberg



Seismisches Netzwerk der Schweiz (Stand 2013).

Forschungsbedarf besteht bei der Weiterentwicklung solcher Alarmierungssysteme, beispielsweise durch seismische Frühwarnsysteme: Elektromagnetische Wellen, die für die Kommunikation genutzt werden, breiten sich viel schneller aus als seismische. Dies ermöglicht es heute, Gebiete in einiger Entfernung zum Epizentrum eines Bebens ein paar Sekunden vor dem Eintreffen der stärksten Erschütterungen zu warnen, sofern das Beben schnell genug erkannt wird. Der SED forscht daran, derartige Frühwarnsysteme zu optimieren und untersucht, ob sich die Stärke eines Erdbebens bereits aus den ersten Sekunden eines Seismogramms verlässlich bestimmen lässt.

Die Daten der über 150 Stark- und Schwachbeben-seismometer werden kontinuierlich und in Echtzeit zur zentralen Datenerfassung nach Zürich geschickt. Zusammen mit der Gruppe Seismologie und Geodynamik (Prof. Domenico Giardini) wird zudem ein Pool von mobilen Stationen unterhalten, die für temporäre Messungen und Feldexperimente eingesetzt werden.

Ein Alarmierungssystem, das von Wissenschaftlern, Technikern und Programmierern unterhalten und ständig weiterentwickelt wird, ist mittlerweile in der Lage, Erdbeben zu erkennen und zu lokalisieren. Dafür braucht es nicht einmal 30 Sekunden. Im Ereignisfall informiert der SED Öffentlichkeit, Behörden und Medien automatisch über den Ort, die Stärke und mögliche Auswirkungen eines Erdbebens. Der 24-Stunden-Pikettdienst des SED steht Interessierten zudem jederzeit für Informationen zu Verfügung.



Stefan Wiemer



Florian Haslinger

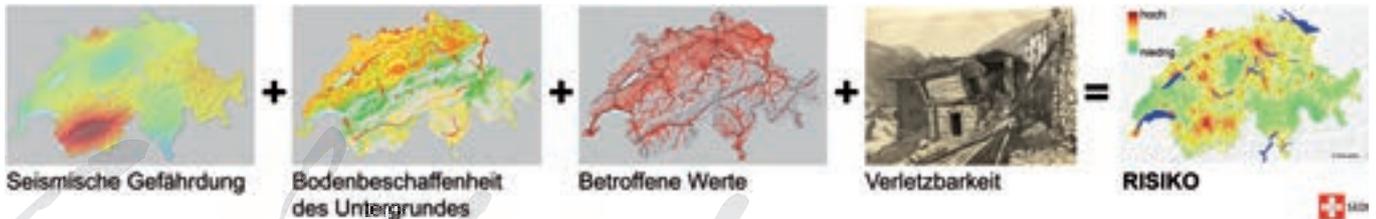


John Clinton



Donat Faeh





Die vier Faktoren des Erdbebenrisikos.

### Erdbebengefährdung und -risiko

Die mit Hilfe der seismischen Netzwerke gesammelten Daten dienen nicht nur zur Erdbebenüberwachung und Alarmierung sondern auch dazu, die Erdbebengefährdung und das Erdbebenrisiko zu erforschen. Die Erdbebengefährdung gibt die Wahrscheinlichkeit an mit der eine bestimmte Bodenbeschleunigung innerhalb eines definierten Zeitraums an einem gewissen Ort auftritt. Um die Gefährdung zu bestimmen, greifen Seismologen auf regionale Informationen aus der Erdbebenhistorie, der Tektonik und der Geologie zurück. Weiter werten sie historische Schadenbeschreibungen aus und entwickeln Modelle der Wellenausbreitung. Die Erstellung und regelmässige Überarbeitung der seismischen Gefährdungsabschätzung der Schweiz zählt zu den Hauptaufgaben des SED. Gleichzeitig forscht die Arbeitsgruppe intensiv daran, die Grundlagen für die Gefährdungsabschätzung zu verbessern um die durch Erdbeben verursachten Schäden in Zukunft zu reduzieren. Weil der lokale Untergrund die Abschätzung der lokalen Gefährdung massgeblich beeinflusst erarbeitet und validiert der SED beispielsweise Methoden um diesen besser zu erforschen.

In anderer Form unterstützt der SED mit seiner wissenschaftlichen Mitarbeit am Atomteststopp-Vertrag die Risikominderung im Nuklearbereich. Die UNO-Staaten einigten sich auf der Abrüstungskonferenz 1996 einen Vertrag zum umfassenden Verbot von Nuklearsprengungen aufzulegen der als wesentliches Überwachungselement ein globales seismisches Netzwerk beinhaltet. Der SED beliefert die zuständige internationale Behörde in Wien mit Daten und informiert die verantwortlichen nationalen Stellen über die neuesten Entwicklungen in diesem Bereich.

Weitere Gebiete, mit denen sich die Forschungsgruppe beschäftigt sind zum Beispiel die Überwachung von Felsstürzen, Glazio-Seismologie, statistische Seismologie, induzierte Seismizität, Ingenieurseismologie und Seismotektonik.

### Öffentlichkeitsarbeit und Bildung

Die gewonnenen Erkenntnisse vermittelt der SED nicht nur an Studierende sondern auch an die interessierte Öffentlichkeit. Medien und Behörden. Mit seiner umfassenden Medien- und Öffentlichkeitsarbeit zielt er darauf ab, die Schweizer Bevölkerung stärker für Erdbeben und die davon ausgehende Gefährdung zu sensibilisieren und die vorhandenen Grundkenntnisse mit Hilfe von anschaulichen Informationsmaterialien zu stärken.



Mitarbeitende des SED im Frühjahr 2013.



Webseite des Schweizerischen Erdbebendienstes:  
[www.seismo.ethz.ch](http://www.seismo.ethz.ch)

Auf Twitter informiert der SED umgehend über alle Erdbeben in der Schweiz ab einer Magnitude von 2.5: [https://twitter.com/seismoch\\_d](https://twitter.com/seismoch_d)



## Fachgruppe Georessourcen Schweiz



Die Fachgruppe Georessourcen Schweiz ist eine dem Departement Erdwissenschaften angegliederte Gruppe<sup>1</sup>, die angewandte Forschung in enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopografie swisstopo (dem Kompetenzzentrum für Geodaten und Georessourcen des Bundes) sowie verschiedenen Industriepartnern betreibt. Die Fachgruppe führt Studien und Forschungsprojekte zur rohstoff-geologischen Landesuntersuchung durch und erarbeitet dabei Grundlagedaten zur Geologie der Schweiz und zur Nutzung der Georessourcen sowie des Schweizer Untergrunds im Allgemeinen. Die Fachgruppe wird von Stefan Heuberger geleitet und beschäftigt fünf bis sieben Geowissenschaftler

Hauptforschungsschwerpunkt ist die Rohstoffgeologie. Im Zentrum steht dabei die Untersuchung der Lagerstätten und Rohstoffvorkommen der heutzutage bedeutendsten mineralischen Rohstoffe in der Schweiz (Kies, Sand, Ton, Kalk, Salz, Gips und Naturstein) sowie auch der Energierohstoffe im Untergrund (Tiefe Geothermie und Kohlenwasserstoffe).

Dabei werden bestehende Geodaten (z. B. geologische Karten, Bohrdaten, Wärmefluss- und Seismikdaten), kompiliert, harmonisiert und in neu entwickelte Datenbanken und 3D Modelle integriert. Zur Kalibrierung dieser Datensätze werden nach Bedarf Feldaufnahmen (z. B. Kartierungen, Detailaufnahmen in Steinbrüchen oder von Bohrkernen), Laboranalysen (z. B. XRF oder Siebanalysen) und Fernerkundungsmethoden angewendet. Produkte dieser angewandten Forschungsprojekte sind Rohstoff-Karten und Datenbanken, geologische 3D Modelle (vom einzelnen Kieskörper bis zum gesamten Schweizer Molassebecken) und umfangreiche thematische Berichte zu den einzelnen Rohstoffgruppen. Desweiteren beschäftigt sich die Gruppe mit Fragestellungen zur Rohstoff- und Untergrundnutzung und damit zusammenhängenden, möglichen Konflikten (z. B. CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, geologische Tiefenlagerung).

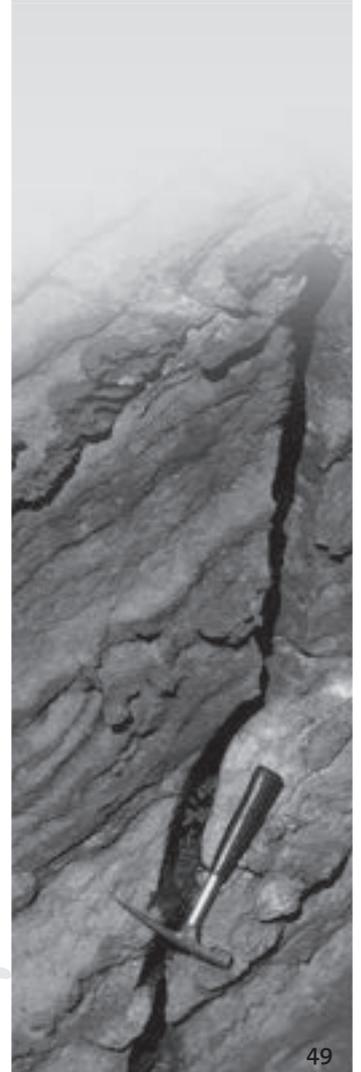
Die Fachgruppe besitzt eine eigene Fachbibliothek und unterhält umfangreiche Sammlungen der nutzbaren Gesteine der Schweiz inklusive der zugehörigen Kartenwerke. Basierend auf umfassenden Datenbanken und Archiven zu Rohstoffvorkommen, Rohstoffabbaustellen und Produktionszahlen werden von der Fachgruppe kontinuierlich Datensätze über internetbasierte Dienste der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (Rohstoffinformationssystem der Fachgruppe auf [map.georessourcen.ethz.ch](http://map.georessourcen.ethz.ch) sowie jenes der swisstopo auf [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch)).

Die Gruppe betreut zudem Vorlesungen (z. B. Integrierte Erdsysteme III «Georessourcen & Geoenergie») Feldkurse, Exkursionen sowie Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten.

<sup>1</sup> Die Gruppe wurde im Juli 2018 gegründet und ist nach der Auflösung der Schweizerischen Geotechnischen Kommission (SGTK) aus deren Geschäftsstelle an der ETH Zürich hervorgegangen.



Stefan Heuberger





Heike Willenberg

## Weiterbildung

Certificate of Advanced Studies CAS ETH in Angewandten Erdwissenschaften

Absolventen und Absolventinnen des Studiums in Erdwissenschaften arbeiten heute in einem breiten, sich ständig verändernden Berufsfeld. Für die beratenden Fachleute der Praxis wird somit die Weiterbildung ein wichtiger Bestandteil beruflicher Entwicklung

Das Departement Erdwissenschaften bietet daher mit dem CAS ETH in Angewandten Erdwissenschaften ein berufsbegleitendes modular aufgebautes Weiterbildungsprogramm an. Die Kurse sind Ort eines intensiven Austauschs unter den Berufstätigen und Fachleuten, sodass neben dem Wissenstransfer auch der Erfahrungsaustausch und die Vernetzung unter den Teilnehmenden gefördert wird.

Die Themen im CAS in Angewandten Erdwissenschaften sind das Baugrundverhalten im Untertage- und Grundbau, die Nutzung von Energie Ressourcen (insb. Geothermie), der Schutz der Grundwasserversorgung und die Analyse und Bewältigung von geologischen Naturgefahren. Für jedes dieser Fokusthemen wird eine Modulgruppe mit zwei viertägigen Blockkursen und einem zusätzlichen Projektmodul angeboten. Für das Weiterbildungszertifikat sind zwei frei wählbare Modulgruppen erforderlich. Die Blockkurse können auch als Einzelkurse besucht werden.

Der CAS ETH in Angewandten Erdwissenschaften richtet sich an ein interdisziplinäres Zielpublikum aus Erdwissenschaftlern und Absolventen in den Erdwissenschaften nahestehenden Bereichen wie z.B. dem Bauingenieurwesen, die in der Schweiz und dem nahen Ausland tätig sind. Dozierende sind Forschende der ETH und anderer Universitäten, aber auch Berufsfachleute.

Aktuelle Informationen zum Weiterbildungsprogramm des CAS in Angewandten Erdwissenschaften sind über die Webseite [www.cas-erdw.ethz.ch](http://www.cas-erdw.ethz.ch) verfügbar.

Zertifikat

# focusTerra

– das erdwissenschaftliche Forschungs- und Informationszentrum der ETH Zürich

*focusTerra* informiert in einem spektakulären Ausstellungsturm Laien und Experten über Spannendes und Wissenswertes in und auf der Erde. Mit seinen Ausstellungen die aktuelle und faszinierende Themen über unseren und andere Planeten aufgreifen, baut *focusTerra* eine Brücke zwischen Forschung und Öffentlichkeit. Auf einer Reise vom Inneren der Erde zu den Gipfeln der Alpen informiert *focusTerra* die Besucher über die Funktion und Bedeutung natürlicher Ressourcen wie auch über den Ursprung, die Entwicklung und die Kräfte der Erde, die den Planeten formen.



Der Ausstellungsturm von *focusTerra* im Innenhof des naturwissenschaftlichen Gebäudes der ETH Zürich (ild: Susanna Bruell)

*focusTerra* lädt auf vielfältige Weise ein, die Erde selber zu entdecken: Im Erdbebensimulator wo in sicherer Umgebung ein Erdbeben erlebt werden kann, oder anhand des Dynamomodells, mit dem das Magnetfeld der Erde das uns vor dem gefährlichen Sonnenwind schützt nachgebildet werden kann. An der Erdbebenwand des Schweizerischen Erdbebendienstes lässt sich verfolgen, ob es in den letzten 12 Stunden auf der Erde gebebt hat. Und ein grosser rotierender Globus zeigt wie Millionen Jahre andauernde Bewegungen der Kontinente das heutige Bild der Erde entstehen liessen.



Erleben Sie ein Erdbeben im Erdbebensimulator. (ild: Peter Rüeegg, HK)

Ästhetische Highlights sind die Edelsteine und eine der schönsten Rauchquarzgruppen aus den Zentralalpen sowie weitere wunderschöne alpine Kristalle aus den berühmten erdwissenschaftlichen Sammlungen der ETH Zürich. Fossilien dieser Sammlungen illustrieren ferner die erdgeschichtliche Entwicklung der Pflanzenwelt. Auch Lokales gilt es zu entdecken: Die Entwicklung der Landschaft um die Stadt Zürich in den letzten 12 Millionen Jahren ist in dreidimensionalen Modellen dargestellt.

Schliesslich kann der Besucher in den Tiefen der Ozeane skurrile Landschaften entdecken, die am Meeresgrund aus heissen Quellen entstehen und um die herum farbenprächtige Tiere leben – Orte an denen möglicherweise sogar das Leben auf der Erde begann.



Die grosse Kristallgruppe vom Tiefengletscher im Kanton Uri geborgen 1946 von Peter Indergand sen (ild: Susanna Bruell)

Sonderausstellungen, Führungen und zahlreiche Events ergänzen die Dauerausstellung. Durch sie möchte *focusTerra* Freude am Verstehen und an der Erforschung der Erde vermitteln und zu einem verantwortungsvollen Umgang mit der Natur animieren. *focusTerra* eignet sich besonders auch für den Besuch durch Schulklassen. Diese können aus den vielfältigen Themen der Ausstellungen auswählen, welche den Schulunterricht auf abwechslungsreiche Weise ergänzen. Der Eintritt zu den Ausstellungen, den Veranstaltungen sowie den Führungen am Sonntag ist frei. *focusTerra* wird gemeinsam betrieben von der ETH-Bibliothek und vom Departement Erdwissenschaften.

Detailinfos: [www.focusterra.ethz.ch](http://www.focusterra.ethz.ch)



Ulrike Kastrup



Gillian Grün



Kerstin Fankhauser



## **Impressum**

Herausgeber: Departement Erdwissenschaften

Konzept: Gabrielle Attinger

Realisation: Silvia Kos Ahrer

Gestaltung: Karin Frauenfelder

Druck: Casanova Druck Werkstatt AG, Chur

1000 Expl., August 2020

ETH Zürich  
Departement Erdwissenschaften  
Sonneggstrasse 5  
8092 Zürich

[www.erdw.ethz.ch](http://www.erdw.ethz.ch)