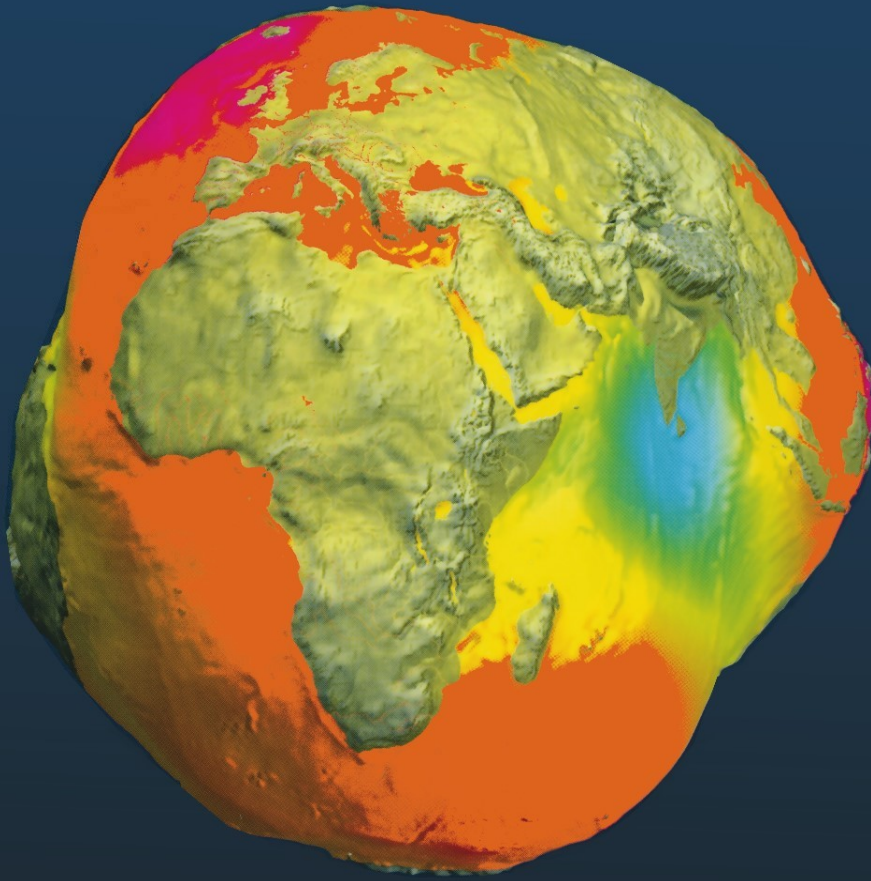


REINHARD HÜTTL (ED.)



EIN PLANET VOLLER ÜBERRASCHUNGEN
NEUE EINBLICKE IN DAS SYSTEM ERDE

OUR SURPRISING PLANET
NEW INSIGHTS INTO SYSTEM EARTH

Ein Planet voller Überraschungen

Our Surprising Planet

Reinhard F. J. Hüttl (Hrsg.)

Ein Planet voller Überraschungen

Neue Einblicke in das System Erde

Our Surprising Planet

New Insights into System Earth

Herausgeber: Reinhard F. J. Hüttl

Gesamtkoordination und Redaktion: Franz Ossing

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ



Alle Abbildungen, soweit nicht anders erwähnt: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag, der Herausgeber und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2011
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

11 12 13 14 15 5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Frank Wigger, Dr. Meike Barth

Lektorat: Dr. Peter Wittmann

Übersetzung: KERN AG, Berlin

Satz: klartext, Heidelberg

Umschlaggestaltung: wsp design Werbeagentur GmbH, Heidelberg, und Grit Schwalbe (GFZ)

Titelfotografie: © GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum

ISBN 978-3-8274-2470-9

Vorwort

Ein überraschender Planet

Wer sich mit dem Planeten Erde beschäftigt, lernt sehr schnell, dass es sich hier um ein hochkomplexes Gebilde handelt, welches sich manchen tradierten wissenschaftlichen Ansätzen verschließt. Lineare Vorgänge sind eher die Ausnahme, Ursache und Wirkung stehen meistens in enger Wechselwirkung. „Das Huhn ist das Mittel, mit dem ein Ei das andere hervorbringt.“ Dieses Zitat des niederländischen Schriftstellers Harry Mulisch scheint auf den ersten Blick die in der Wissenschaft übliche Verknüpfung von Ursache und Resultat zu erweitern: Es gibt nicht die Ursache, die nur die Wirkung erzeugt, sondern das Resultat eines Prozesses ist Anfangspunkt für eine neue Kette von Ursache und Wirkung. Gilt also auch: Das Ei ist der Apparat, mit dem eine Henne die nächste hervorbringt? Offenbar nicht, wenn die Henne ein Hähnchen ausbrütet. Der von Mulisch formulierte Kreislauf erweitert sich: Henne und Ei bringen eine dritte, neue Größe hervor. Harry Mulischs Metapher stellt das Dilemma der klassischen Physik treffend dar: Der reine Ursache-Wirkung-Mechanismus entspricht nicht der Komplexität natürlicher Prozesse; denn diese Prozesse sind im Regelfall nichtlinear, wechselwirkend, voller Singularitäten und nichtreproduzierbar.

Die Geowissenschaften sind das Beispiel par excellence für einen solchen Ansatz. Galt noch bis in die 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts das Verdikt, die Geowissenschaften seien keine eigene Fachdisziplin, weil sie – im Gegensatz etwa zu der Physik oder der Chemie – keinen eigenständigen Ansatz verfolgten, so erweist sich diese letztlich aus dem 17. Jahrhundert stammende Auffassung heute nicht nur als altmodisch, sondern sogar als rückschrittlich. Nicht zufällig war es ein Geowissenschaftler, der Meteorologe Edward Lorenz, der 1963 die Grundzüge der Chaos-Theorie entwickelte, denn nicht-lineare Zusammenhänge sind in den Geowissenschaften der offensichtliche Normalzustand. Auch spiegeln sich die beiden Pole der modernen Physik, die relativistische Weltansicht Einsteins und die Quantenphysik, wie selbstverständlich in geowissenschaftlichen Fragestellungen wider: Die nanosekundengenaue Zeitmessung auf erdumkreisenden GPS-Satelliten zeitigt bereits relativistische Effekte, und die moderne Erforschung des Erdmantels auf atomarer Ebene muss die Gleichungen Schrödingers berücksichtigen. Moderne Naturwissenschaften sind nicht mehr an enge Fachgrenzen gebunden, sie müssen grenzüberschreitend sein; eine reduktionistische Zerlegung in Einzelprobleme weist meistens

schnell die Grenzen der Betrachtung auf. So kann die moderne Kosmologie sehr gut beschreiben, dass unser Sonnensystem im genau richtigen Abstand zum Zentrum der Galaxis liegt, damit es überhaupt Planeten gebären kann. Aber welche Planeten das sind und wie sie sich entwickeln, ist keineswegs mehr eine rein physikalische Fragestellung. Terra, der außergewöhnliche Planet Erde, ist auch hier das beste Beispiel.

Dieses Buch hat keine neuerliche Gesamtdarstellung unseres Planeten zum Ziel. Es gibt eine sehr große Zahl ausgezeichnete Werke, die unsere Erde beschreiben. Wir wählen einen anderen Blickwinkel: Jeden Tag bringt die moderne Geoforschung überraschende Einsichten hervor; wenn heute Wissenschaftler des Deutschen Geoforschungszentrums GFZ von der leisen Revolution in der Theorie der Plattentektonik sprechen, ist das Ausdruck dieser lebendigen Wissenschaft, an welcher die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ ihren Anteil haben. Selbstverständlich gilt für die Geowissenschaften wie für jede moderne Wissenschaft, dass sie international vernetzt ist, aber gerade für unser Fachgebiet gilt, dass es qua definitionem global agiert. Unsere Forscherinnen und Forscher bringen ihre neuen Erkenntnisse in dieser Zusammenarbeit mit ihren Kollegen aus aller Welt zutage, mal federführend, mal als Partner unter vielen. Welche neuen Einsichten in das System Erde sich auch immer ergeben, stets werden sie zurückgekoppelt in die geowissenschaftliche Gemeinschaft. Als Herausgeber hat man damit die angenehme Möglichkeit, über die vorderste Front der Forschung berichten zu können. Das in diesem Buch Vorgelegte basiert daher vor allem auf der hervorragenden Arbeit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ, es gründet sich aber ebenso auf den Fortschritten der geowissenschaftlichen Forschung weltweit. In ihrer täglichen Arbeit erleben die Forscherinnen und Forscher unmittelbar die Faszination des Systems Erde, auch wenn sich das – wie überall im Wissenschaftsbetrieb – zuweilen als zähes Geschäft erweist. Wenn die in diesem Band vorgestellten überraschenden, neuen Einblicke in das System Erde diese Faszination vermitteln können, dann hat dieses Buch seinen Zweck erfüllt.

Ein herzliches „Dankeschön!“

Geowissenschaften halten sich nicht an Ländergrenzen. Es ist für unsere Fachdisziplin mehr noch als für andere Wissenschaftszweige typisch, dass sie weltweit vernetzt ist. Zudem werden die einzelnen Bereiche der Geowissenschaften heute eher als Spezialisierungen einer Gesamtdisziplin verstanden, wodurch ihre Ergebnisse auch immer die Fachgrenzen überschreiten. So entsteht mehr und mehr ein Gesamtbild des Systems Erde, das natürlich nie vollständig sein wird.

Eingebettet in die internationale Gemeinschaft der Geowissenschaften, haben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ ihren Anteil an diesem neuen Bild unserer alten Erde. Dieses Buch beruht vor allem auf ihrer Kompetenz und ihrem Engagement und hätte ohne sie nicht entstehen können. Es wird schnell übersehen, dass hinter den Erfolgen der Wissenschaft und Forschung auch ein erheblicher infrastruktureller Aufwand steht. Ich möchte mich daher bei allen Beschäftigten des GFZ für ihre Arbeit bedanken, insbesondere bei meinem Kollegen Dr. Bernhard Raiser, dem Administrativen Vorstand des GFZ, für seine Unterstützung.

Ganz besonderer Dank aber geht an Franz Ossing für seinen unermüdlichen Einsatz bei der Redaktion und Gesamtkoordination dieses Vorhabens.

Zum vorliegenden Werk haben viele direkt oder indirekt beigetragen, um die interessanten Arbeitsergebnisse des GFZ der wissbegierigen Öffentlichkeit vorzustellen. Mein besonderer Dank gilt allen denjenigen, deren Arbeitsergebnisse hier vorgestellt werden. Es sind viele Namen, sollte ich jemanden vergessen haben, bitte ich hiermit um Entschuldigung, es täte mir sehr leid:

Jan Anderssohn, Christina Arras, Andrey Babeyko, Patricia Baeuchler, Michael Bender, Oliver Bens, Friedhelm von Blanckenburg, Theresa Blume, Marco Bohnhoff, Achim Brauer, Sabine Chabrilat, Benjamin Creutzfeld, Georg Dresen, Helmut Echtler, Jörg Erzinger, Saskia Esselborn, Carsten Falck, Frank Flechtner, Christoph Förste,

Dietlinde Friedrich, Gerhard Gendt, Matthias Gottschalk, Andreas Güntner, Clemens Glombitza, Otto Grabe, Gottfried Grünthal, Christian Haberland, Mohamed Hamoudi, Robin Hanna, Ulrich Harms, Wilhelm Heinrich, Gerd Helle, Katja Hirsch, Brian Horsfield, Ernst Huenges, Sibylle Itzerott, Sandro Jahn, Alexander Jordan, Christoph Janssen, Björn Onno Kaiser, Hermann Kaufmann, Rainer Kind, Volker Klemann, Jürgen Klotz, Monika Koch-Müller, Monika Korte, David Kriegel, Michael Kühn, Jörn Lauterjung, Vincent Lesur, Axel Liebischer, Volker Lüders, Hermann Lühr, Yuriy Maystrenko, Kai Mangelsdorf, Bruno Merz, Claus Milkereit, Jens Mingram, Daria Morozova, Samuel Niedermann, Vera Noack, Onno Oncken, Stefano Parolai, Matteo Picozzi, Rolando di Primio, Oliver Ritter, Sigrid Roessner, Matthias Rosenau, Martin Rother, Alexander Rudloff, Erik Rybacki, Torsten Sachs, Ingo Sasgen, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Schicks, Christian Schmidt, Torsten Schmidt, Tilo Schöne, Hans-Martin Schulz, Rainer Schulz, Judith Sippel, Stephan Sobolev, Daniel Spengler, Sergei Stanchits, Bernhard Steinberger, Angelo Strollo, Maik Thomas, Frederik Tilmann, Andreas Tretner, Robert Trumbull, Steffi Uhlemann, Katy Unger-Shayesteh, Forough Sodoudi, Kamil Ustaszewski, Andrea Vieth, Sergiy Vorogushyn, Tiem Vu Thi Ahn, Thomas Walter, Michael Weber, Anke Westphal, Hans-Ulrich Wetzel, Jens Wickert, Heinz Wilkes, Ingo Wölbern, Hilke Würdemann, Xiaohui Yuan, Jochen Zschau.

Wir wissen so viel über unseren Heimatplaneten wie nie zuvor in der Geschichte, aber wir haben auch gelernt, dass das komplexe System Erde noch viele Überraschungen in der Hinterhand hat. Die Erforschung des Planeten Erde bleibt also hochinteressant. Wir laden Sie ein, uns auch in Zukunft auf diesem Weg zu begleiten.

Reinhard Hüttl

Wissenschaftlicher Vorstand

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Foreword

A Surprising Planet

Anyone who studies planet Earth soon learns that it is a highly-complex entity – one which defies many traditional scientific approaches. Cause and effect closely interact in most cases, whereas linear processes tend to be the exception. „The chicken is the means by which one egg brings about another.“ At first glance, this quotation from the late Dutch writer Harry Mulisch appears to extend the usual scientific link between cause and effect; i.e.: there is not only a cause which produces a result, but also, that result is the starting point for a new chain of cause and effect. Does this mean that the egg is the apparatus with which one hen produces another hen? Clearly not if the hen hatches out a cockerel. The cycle formulated by Mulisch therefore takes on a wider meaning: the hen and the egg bring about a new, third variable. Harry Mulisch’s metaphor aptly describes the dilemma of classic physics – a pure cause and effect mechanism does not correspond to the complexity of natural processes. This is because these processes are usually non-linear, interactive, full of singularities and are non-reproducible.

Geosciences are the perfect example of such an approach. Until the 1970s, the verdict was that the geosciences were not a separate discipline because – unlike physics and chemistry – they would not pursue an independent approach. This 17th century opinion is now not only deemed to be old-fashioned, but even retrograde. It was no coincidence that it was a geoscientist, the meteorologist Edward Lorenz, who developed the fundamentals of chaos theory in 1963. Non-linear relationships are the apparent normal state in geosciences. And also the two poles of modern physics, the relativistic world view of Einstein and quantum physics, are naturally reflected in geoscientific issues. The measurement of time with nanosecond precision on GPS satellites orbiting the earth already produces relativistic effects; modern research into the Earth’s mantle at an atomic level must take account of Schrödinger’s equations. Modern natural sciences are no longer confined within the narrow boundaries of specific fields of thought; they must cross frontiers. In most cases, reductionistic dissection into individual problems soon reveals the limits of the analysis. For example, modern cosmology does a good job of describing how our solar system lies at precisely the right distance from the centre of the Galaxy in order to be able to generate planets. But which planets these are and how they develop is now anything but a pure question of

physics. Terra, the extraordinary planet Earth, is once again the best example.

This book does not aim to present a new general description of our planet. A wealth of excellent works describing our Earth already exists and we have therefore chosen a different perspective. Each day, modern georesearch produces surprising insights. When scientists at the GFZ German Research Centre for Geosciences nowadays talk about the quiet revolution in the theory of plate tectonics, then this is an expression of the vibrant science in which the scientists of the GFZ have their share. Naturally, like every modern science, the geosciences are internationally networked, but by definition, our field in particular operates globally. Our researchers reveal their new findings in collaboration with their colleagues all over the world; sometimes they have overall responsibility, sometimes they are partners among many. Whatever new insights into System Earth result, they are always fed back to the geoscientific community. As an editor, one therefore has the pleasant task of reporting on the leading edge of research. The content presented in this book is mainly based on the excellent work of the scientists at the GFZ, but it is also based on progress made by geoscientific research worldwide. In their daily work, the researchers directly experience the fascination of System Earth, even if at times – like everywhere in science – it proves to be a tough business. If the surprising new insights into System Earth presented in this volume are able to convey this fascination, then this book has fulfilled its purpose.

A Heartfelt „Thank you!“

Geosciences do not stay within national borders. Our discipline, more than any other branch of science, is typically part of a global network. In addition, today’s individual geoscientific fields tend to be understood as being specialisations of an overall discipline, which means their results also always transcend disciplinary boundaries. In this way, an overall image of System Earth is increasingly emerging which will, of course, never be complete.

Embedded as they are in the international community of geosciences, the staff of the GFZ German

Research Centre for Geosciences have played their part in constructing this new image of our old Earth. This book is based, above all, on their expertise and commitment and without them it could never have been written. It is easy to overlook that behind the successes of science and research, there is a substantial infrastructural effort. I would therefore, like to thank all staff at the GFZ for their work, especially my colleague Dr. Bernhard Raiser, the Administrative Director of the GFZ, for his support.

Also, a very special thank you goes to Franz Ossing for his tireless work on the editing and overall coordination of this project.

Many people have contributed to this work, both directly and indirectly, so that the results of the GFZ's fascinating work can be presented to a public always hungry for knowledge. My particular thanks go to everyone whose work is represented here. There are many names – if I have forgotten anyone, please accept my sincerest apologies:

Jan Anderssohn, Christina Arras, Andrey Babeyko, Patricia Baeuchler, Michael Bender, Oliver Bens, Friedrich von Blanckenburg, Theresa Blume, Marco Bohnhoff, Achim Brauer, Sabine Chabrilat, Benjamin Creutzfeld, Georg Dresen, Helmut Echlter, Jörg Erzinger, Saskia Esselborn, Carsten Falck, Frank Flechtner, Christoph Förste, Dietlinde Friedrich, Gerhard Gendt, Matthias Gottschalk, Andreas Güntner, Clemens Glombitza, Otto Grabe, Gottfried Grünthal, Christian Haberland, Mohamed Hamoudi, Robin Hanna, Ulrich Harms, Wilhelm Heinrich, Gerd Helle, Katja Hirsch, Brian Horsfield, Ernst Huenges, Sibylle Itzerott, Sandro Jahn, Alexander Jordan, Christoph Janssen, Björn Onno Kaiser, Hermann Kauf-

mann, Rainer Kind, Volker Klemann, Jürgen Klotz, Monika Koch-Müller, Monika Korte, David Kriegel, Michael Kühn, Jörn Lauterjung, Vincent Lesur, Axel Lieb-scher, Volker Lüders, Hermann Lühr, Yuriy Maystrenko, Kai Mangelsdorf, Bruno Merz, Claus Milkereit, Jens Min-gram, Daria Morozova, Samuel Niedermann, Vera Noack, Onno Oncken, Stefano Parolai, Matteo Picozzi, Rolando di Primio, Oliver Ritter, Sigrid Roessner, Matthias Rosenau, Martin Rother, Alexander Rudloff, Erik Rybacki, Torsten Sachs, Ingo Sasgen, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Schicks, Christian Schmidt, Torsten Schmidt, Tilo Schöne, Hans-Martin Schulz, Rainer Schulz, Judith Sippel, Stephan Sobolev, Daniel Spengler, Sergei Stanchits, Bern-hard Steinberger, Angelo Strollo, Maik Thomas, Frederik Tilmann, Andreas Tretner, Robert Trumbull, Steffi Uhle-mann, Katy Unger-Shayesteh, Forough Sodoudi, Kamil Ustaszewski, Andrea Vieth, Sergiy Vorogushyn, Tiem Vu Thi Ahn, Thomas Walter, Michael Weber, Anke Westphal, Hans-Ulrich Wetzel, Jens Wickert, Heinz Wilkes, Ingo Wölbern, Hilke Würdemann, Xiaohui Yuan, Jochen Zschau.

We know so much about our home planet, more than ever before in history, yet the complex System Earth still has many surprises up its sleeve. Research into planet Earth therefore remains highly interesting. We invite you to accompany us on this journey, now and in the future.

Reinhard Hüttl

Scientific Executive Director

Helmholtz Centre Potsdam

GFZ German Research Centre for Geosciences

Inhalt

Kapitel 01

Das komplexe System Erde	3
Eine blau-weiße Kugel mit beweglicher Oberfläche	4
Erdbeben: Signale der Plattentektonik	4
Klima im System Erde: Rohstoffe und die Folgen	8
Fossile Brennstoffe: in naher Zukunft noch unverzichtbar	10
Die Zukunft ist regenerativ	12
Zukunftsaufgaben	12

Kapitel 02

Der Blick aus dem All in das System Erde	17
Gewicht auf einer rotierenden Ellipse	18
„Gravity is Climate“: Klimaforschung mit Satelliten	26
Die Meerestopographie	28
GPS zur Messung der Tektonik	32
GPS-Atmosphärensondierung: von der Wettervorhersage bis zur Klimaforschung	36
Ausblick	38

Kapitel 03

Wie die moderne Tektonik Wegener vom Kopf auf die Füße stellt	41
Kontinente als Wärmedecke und Mantel-Plumes	42
Plattenränder im Brennpunkt	48
Klima und Tektonik: der Baustil der Anden	58
Eine leise Revolution in der klassischen Theorie	62
Ausblick	70

Kapitel 04

Georeaktor Sedimentbecken	73
Ozean oder nicht? Die Ausdünnung der Lithosphäre	74
Einblick mit Bits: die Modellierung von Beckenstrukturen	78
Ausblick	86

Kapitel 05

Vulkane und Erdbeben: Normalität im System Erde	89
Wenn Vulkane erwachen	90
Erdbeben: Naturgefahr und Informationsquelle	102
Ausblick	118

Kapitel 06

Ein Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean	121
Die Ursache	122
Schneller reagieren: ein neues Warnsystem bei Tsunami	122
Die Komponenten des GITEWS	124

Content

Chapter 01

The Complex System Earth	3
A blue and white sphere with a moving surface	5
Earthquakes: signals of plate tectonics	7
Climate in System Earth: raw materials and the consequences	9
Fossil fuels, still indispensable in the near future	11
The future is renewable	13
Future tasks	15

Chapter 02

The View into System Earth from Space	17
Weight on a rotating ellipse	19
“Gravity is Climate”: climate research using satellites	27
Marine topography	27
GPS for measuring tectonics	31
GPS atmosphere sounding: from weather prediction to climate research	33
Outlook	37

Chapter 03

How Modern Tectonics Set Wegener Right	41
Continents as an insulating blanket and mantle plumes	45
Plate margins in focus	51
Climate and tectonics: the architectural style of the Andes	57
A quiet revolution in classic theory	63
Outlook	71

Chapter 04

Sedimentary Basins as Georeactors	73
Ocean or not? Thinning of the lithosphere	75
Insight with bits: modelling of basin structures	77
Outlook	87

Chapter 05

Volcanoes and Earthquakes: Normality in System Earth	89
When volcanoes awaken	91
Earthquakes: natural hazard and source of information	101
Outlook	119

Chapter 06

A Tsunami Early Warning System for the Indian Ocean	121
The cause	123
Faster response: a new warning system for tsunami	125
Components of the GITEWS	127

Die Entscheidungsfindung	132
Capacity building	134
Ausblick	136
 Kapitel 07	
Das Magnetfeld der Erde – unsichtbarer Schutz und Fernerkundungssignal . .	141
Ein variabler Schutzschirm mit vielen Facetten	142
Signale aus dem Erdkern und wandernde Pole: Information über unseren Planeten	144
Ausblick	152
 Kapitel 08	
Die Erde im Labor	157
Bis die Kruste bricht	158
Das tiefe Erdinnere im Labor	162
Ausblick	178
 Kapitel 09	
Wissenschaftliches Bohren: ein Teleskop in die Tiefe	181
Bohren in die Kontinente: die ersten Ansätze	182
Die Kontinentale Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland	184
ICDP: Bohren an Land	184
InnovaRig – eine moderne Bohranlage für die Wissenschaft	196
Ausblick	198
 Kapitel 10	
Die Haut der Erde	201
Die Geoessource Wasser	202
Geoessource Boden	210
Erkundung der Erdoberfläche	212
Isotopengeochemische „Fingerabdrücke“ in Erdoberflächenprozessen	216
Ausblick	224
 Kapitel 11	
Der Klimawandel im System Erde	227
Strahlende Sonne, schräge Bahn	228
Warvierte Seeablagerungen: ein hochgenaues natürliches Klima- und Umweltarchiv der Kontinente	234
Baumjahre als Archiv von Kohlenstoff- und Wasserkreislauf	240
Ausblick	244
 Kapitel 12	
Geo-Energie	247
Der Kohlenstoffkreislauf und die Lagerstätten	248
Kohlenwasserstoffe und Beckenmodellierung	250
Brennendes Eis: Methanhydrate	252
Shale Gas: eine unkonventionelle fossile Energieressource	256
Kohlendioxid zurück in die Erde	260
Energie aus der Tiefe: Geothermie	264
Ausblick	270

Decision-making	133
Capacity building	137
Outlook.	137
Chapter 07	
The Earth's Magnetic Field – Invisible Protection and Remote Sensing Signal.	141
Variable protective screen with many facets	145
Signals from the Earth's core and wandering poles provide information about our planet	145
Outlook.	155
Chapter 08	
The Earth in the Laboratory	157
Earthquake rupture in the laboratory	159
The Earth's deep interior in the laboratory	163
Outlook.	179
Chapter 09	
Scientific Drilling: a Telescopic View of the Deep.	181
Drilling into the continents: the initial approaches	183
The Continental Deep Drilling Program of the Federal Republic of Germany	185
ICDP: drilling on land	187
InnovaRig – a modern drilling rig for scientific research.	195
Outlook.	199
Chapter 10	
The Skin of the Earth	201
Water as a geo-resource	205
Soil as a geo-resource	209
Exploring the Earth's surface	213
Geochemical isotope “fingerprints” in the Earth's surface processes	217
Outlook.	225
Chapter 11	
Climate Changes in System Earth.	227
Radiant sun, oblique orbit	229
Varved lake deposits: a high-precision natural climate and environmental archive of the continents	235
Annual growth rings of trees as an archive of the carbon and water cycle.	239
Outlook.	245
Chapter 12	
Geo-Energy	247
The carbon cycle and underground reservoirs	249
Hydrocarbons and basin modelling	251
Burning ice: methane hydrates	255
Shale gas: an unconventional fossil energy resource	257
Returning carbon dioxide into the Earth.	259
Energy from the deep: geothermal energy	265
Outlook.	273

Kapitel 13

Leben in der tiefen Biosphäre	275
Leben tief im Gestein	280
Hochdruck im Eis und andere Extreme	288
Ausblick	290

Kapitel 14

Das Bild der Welt: Wissenschaft und Kunst	293
Geophysik als Kunst	294
Die „nützliche Kunst“	296
Das Gemeinsame in Kunst und Wissenschaft	300
Ausblick	302

Index	305
------------------------	-----

Chapter 13

Life in the Deep Biosphere	275
Life deep in rocks	281
High pressure in ice and other extremes	289
Outlook.	289

Chapter 14

The Image of the World: Science and Art	293
Geophysics as art	297
“Useful art”.	299
The common elements in art and science	301
Outlook	301
Index	305



1.1 Ein einzigartiger Planet: die Erde aus der Sicht der Apollo-17-Astronauten. (Foto: NASA)

1.1 A unique planet: the Earth as seen by the Apollo 17 astronauts. (Photo: NASA)

Kapitel 01

**Das komplexe System
Erde**

Chapter 01

**The Complex System
Earth**

Vor über viereinhalb Milliarden Jahren begann eine Staub- und Gaswolke im Weltall sich zu einigen Dutzend Protoplaneten zu verdichten. Durch Kollision und Verschmelzen wuchsen diese zu einem größeren Körper an, der um eine noch recht junge Sonne rotierte. Dieser Planet, den wir heute Erde nennen, verfügt noch immer über eine große Menge Energie, die ihn zu einem der dynamischsten Himmelskörper macht, die wir kennen. Ausdruck dieser Dynamik ist die Tektonik, die – angetrieben durch die enorme Wärme im Erdinneren – die großen Platten auf der Erdoberfläche bewegt.

Vor der Entwicklung der Weltraumteleskope war es faktisch unmöglich, Planeten außerhalb unseres Sonnensystems direkt zu beobachten. Erst mit dem satellitengestützten Hubble-Teleskop gelang es den Astronomen erstmals, Planeten in anderen Sonnensystemen zu entdecken. Als Resultat können wir bisher festhalten: Die Erde ist ein außergewöhnlicher Planet. Unser Universum besteht aus hundert bis zweihundert Milliarden Galaxien, von denen jede wiederum etwa hundert bis zweihundert Milliarden Sterne besitzt. Ob es darin erdähnliche Planeten mit Leben gibt, wissen wir nicht. Aber die dafür notwendige Konstellation ist recht selten: Sonne, Erde und Mond in passenden Größen und Entfernungen voneinander und ein System sich wechselseitig stützender Subsysteme, nämlich Geosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre in ihren jeweiligen Ausformungen, bilden eine Gesamtheit, deren Existenz in dieser Form sich letztlich nur statistisch-stochastisch erklären lässt. Unser Heimatplanet Erde ist ebenso einzigartig wie schön.

Eine blau-weiße Kugel mit beweglicher Oberfläche

Aus der Ferne betrachtet, erscheint die Erde als eine perfekte blau-weiße Kugel, eingebettet in das Samtschwarz des Alls. Eine ideale Kugel ist sie aber nur für unser schlecht auflösendes menschliches Auge: Durch die rotationsbedingte Fliehkraft hat die Erde am Äquator einen 42 Kilometer größeren Durchmesser als entlang der Nord-Süd-Achse. Durch diese Polabflachung ergäbe sich ein elliptischer Körper. Hochpräzise Vermessungen der Erde zeigen aber, dass sie zudem ein sehr unregelmäßig geformtes Gebilde ist. Die Ursache findet sich in einer nicht gleichmäßigen Massenverteilung im Erdinneren, hervorgerufen durch die dort herrschende enorme Wärme.

Die Figur der Erde lässt sich ohne die Kenntnis der räumlich und zeitlich variablen Erdanziehungskraft nicht exakt bestimmen (► Abb. 1.2). Der Aufbau des

Erdkörpers und seine ständige, dynamische Änderung äußern sich in Prozessen der Plattentektonik, die wiederum die Oberfläche unseres Planeten umgestalten. Alle diese Prozesse laufen auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen ab.

Nach menschlichen Maßstäben ewige Gebirge sind geologisch gesehen vergleichsweise jung. Die heute über acht Kilometer hohen Berge des Himalajas begannen vor nur rund fünfzig Millionen Jahren emporzuwachsen, als Indien mit einer Geschwindigkeit von damals etwa 20 Zentimetern pro Jahr mit Eurasien zusammenstieß. Dieser Vorgang dauert bis heute an, wenngleich die Kollisionsgeschwindigkeit auf sechs bis acht Zentimeter pro Jahr reduziert ist.

In geologischen Zeiträumen von Millionen von Jahren hat die Plattentektonik auch Wechselwirkungen mit dem Klima. Die Anden, die Rocky Mountains und der Himalaja sind als Barrieren im Bereich der Atmosphäre entscheidende Faktoren im globalen Klimageschehen. Aber umgekehrt zeigen uns neuere Forschungsergebnisse auch, dass das Klima wiederum die Tektonik beeinflusst: Durch die niederschlagsgesteuerte Erosion der Anden werden große Mengen Sediment in den Pazifik vor den Südan den transportiert – Material, das sich in den sogenannten Akkretionskeilen vor der Küste wiederfindet. Die Abtragung der Gebirge führt zu isostatischen Ausgleichsbewegungen, mit entsprechender Deformation der Erdkruste. So hat das Klima einen indirekten Einfluss auf die Entwicklung des aktiven Plattenrandes und die Gebirgsbildung.

Erdbeben: Signale der Plattentektonik

Erdbeben sind unmittelbarer Ausdruck der lebendigen Tektonik unseres Planeten. Die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens stammt aus Potsdam. Der junge Wissenschaftler Ernst von Rebeur-Paschwitz stellte 1889 bei seinen Messungen der gezeitenbedingten Vertikalbewegungen der Erdkruste eine Störung seiner Messungen fest. Gleichartige Aufzeichnungen seiner Messapparatur in Wilhelmshaven und Meldungen über ein Erdbeben, das Japans Hauptstadt Tokio erschütterte hatte, führten ihn zu der Erkenntnis, dass die aufgezeichneten Störungen nichts anderes waren als die Schwingungen des Erdkörpers in Potsdam, die von diesem Beben im Pazifik in der Nähe der japanischen Hauptinsel stammten (► Abb. 1.3).

Seitdem hat sich die wissenschaftliche Seismologie rasant weiterentwickelt. Unsere Kenntnis des inneren

More than four and a half billion years ago, a cloud of dust and gas began to condense in the cosmos. This cloud formed several dozen proto-planets. As a result of collision and fusing, these proto-planets merged to form a larger body, which revolved around the still young sun. This planet, which we now call Earth, continues to have a high level of energy, making it one of the most dynamic celestial bodies we know. The Earth's dynamic nature is expressed by tectonics, which – driven by the tremendous heat at the core – move the large crust plates on the surface of the Earth.

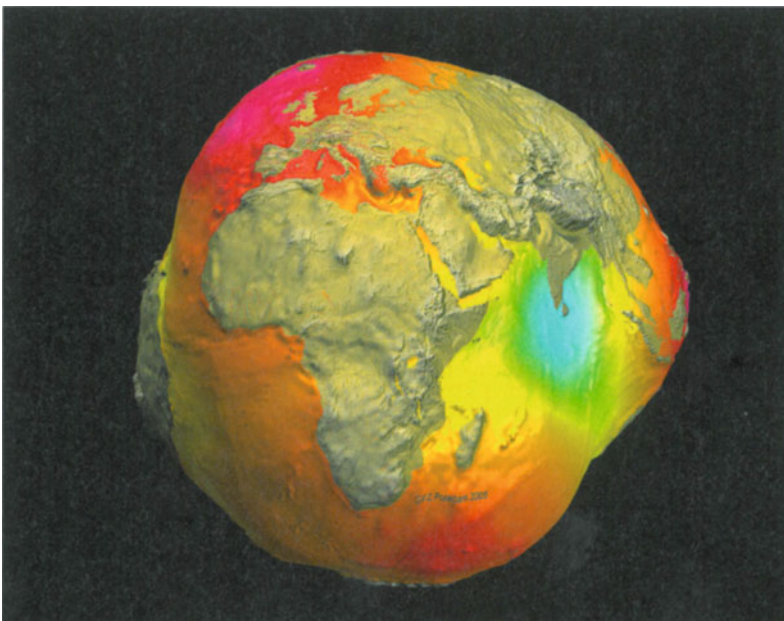
Before the development of space telescopes, it was virtually impossible to directly observe planets outside our solar system. Only when the satellite-based Hubble telescope was launched were astronomers able to discover planets in other solar systems. As a result of this, we can now conclude that the Earth is an exceptional planet. Our universe consists of one to two hundred billion galaxies, each of which has around one to two hundred billion stars. We do not know whether these galaxies contain Earth-like planets that support life. The necessary constellation – sun, earth and moon of corresponding sizes and distances from each other – is extremely rare. Also required is a series of subsystems that support each other: geosphere, atmosphere, hydrosphere, cryosphere and biosphere in their respective forms. These comprise a complete body, whose existence in this form can be explained only in terms of stochastic statistics. Our home planet Earth is as unique as it is beautiful.

A blue and white sphere with a moving surface

Observed from a distance, the Earth appears to be a perfect blue and white sphere embedded in the jet black of the universe. It is, however, an ideal sphere only to the poor resolution of the human eye. As a result of the centrifugal force caused by the Earth's rotation, the diameter at the equator is 42 kilometres longer than along the north-south axis. Although this flattening at the poles should produce an elliptical body, high-precision measurements show that the Earth has an irregular shape. This is brought about by the uneven mass distribution inside the Earth, which is caused by the enormous heat that exists there.

It is impossible to determine the shape of the Earth precisely without knowledge of the gravitational force, which is variable in space and time (► Fig. 1.2). The structure of the terrestrial body and its constant, dynamic changes are expressed in the processes of plate tectonics that reshape the surface of our planet. All of these processes happen on very different spatial and temporal scales.

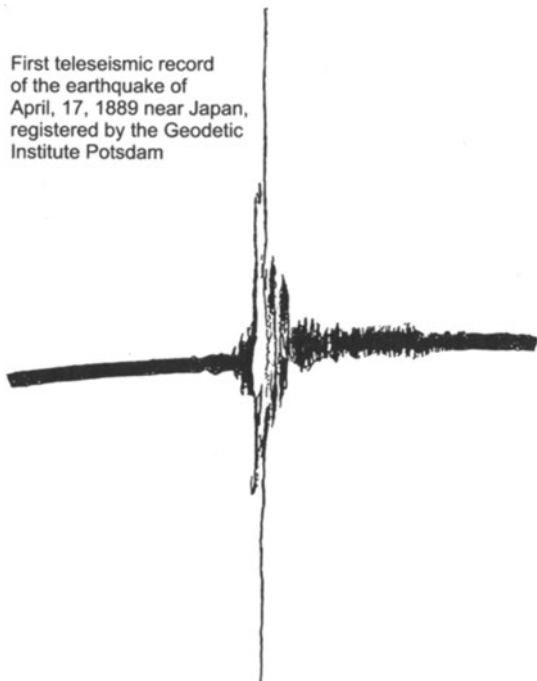
Mountains, eternal by human standards, are relatively young in geological terms. The Himalayas, currently over eight kilometres high, only began to grow around fifty million years ago when India began to collide with Eurasia at a speed of around 20 centimetres per year. This process continues today, although the colli-



1.2 The "Potsdam Gravity Potato". The irregular shape of the Earth is produced by differing gravitational forces resulting from the uneven distribution of mass inside the Earth. The shape shown here is exaggerated 15 000-fold (► Chapter 02).

1.2 Die „Potsdamer Schwerekartoffel“: Unterschiedliche Anziehungskräfte aufgrund ungleichmäßiger Massenverteilungen im Erdinnern erzeugen die unregelmäßige Form des Erdkörpers, die hier um das 15 000-Fache überhöht dargestellt ist (s. auch ► Kapitel 02).

First teleseismic record of the earthquake of April, 17, 1889 near Japan, registered by the Geodetic Institute Potsdam



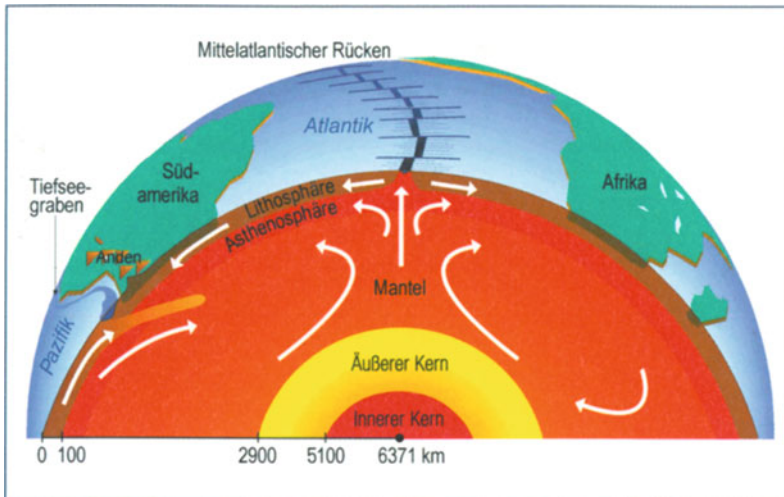
1.3 Die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens gelang Ernst von Rebeur-Paschwitz am 17. April 1889 in Potsdam.

1.3 The world's first remote recording of an earthquake was made by Ernst von Rebeur-Paschwitz in Potsdam on 17 April 1889.

Erdaufbau (► Abb. 1.4) stammt aus dieser Disziplin, in der industriellen Exploration ist die seismische Erkundung eine Standardmethode. Moderne Verfahren erlauben präzisere Untersuchungen, die in Verbindung mit verbesserten Auswertemethoden neue Einsichten in das System Erde ermöglichen. Die Hawaii-Inseln, um ein Beispiel zu nennen, sind die Spitze des mit 11 000 Metern höchsten Vulkangebäudes der Erde, mit 7000 Metern von der Basis des Pazifikbodens gemessen und 4000 Metern über Wasser. Wie ist es entstanden? Geowissenschaftler gehen von Blasen heißen Gesteins, einem sogenannten *mantle plume*, 2900 Kilometer tief im unteren Erdmantel aus, die – wie die Gasblasen im Mineralwasserglas – nach oben wandern und an der Erdoberfläche einen Vulkan entstehen lassen. Diese Überlegungen werden durch geochemische Untersuchungen und Messungen der Erdschwere unterstützt und konnten auch durch Bohrungen auf den Vulkanen von Hawaii bestätigt werden.

Der endgültige Nachweis dieses Prozesses allerdings gelang durch neue Methoden der Auswertung von Erdbebenwellen. Sie ermöglichten einen seismologischen Beleg der im Erdmantel aufsteigenden Magmablasen, aus denen Hawaii kontinuierlich entsteht.

Erdbeben sind aber nicht nur ein Fenster in das Erdinnere für die Wissenschaft. Sie bedeuten auch eine für den Menschen bedrohliche Naturgefahr. Allein das Erdbeben vom Dezember 2004 und der daraus entstandene Tsunami forderte fast eine Viertelmillion Menschenleben. Verhindern lassen sich solche Naturereignisse nicht, aber die Geowissenschaften spielen bei der Entwicklung und Einrichtung von Frühwarnsystemen eine zentrale Rolle. Katastrophen dieser Art wecken auch in Regionen, die nicht von Erdbeben bedroht sind, ein Gespür für die Dynamik unseres Planeten. Immerhin ereignen sich jährlich etwa eine halbe Million Erdbeben der Magnitude 2 auf der logarithmischen Richterskala und Erdbeben der Magnitude 4, die schon deutlich zu spüren sind, treten pro Jahr etwa 7500 Mal auf. Die meisten dieser Beben ereignen sich an den Rändern der tektonischen Platten. Nahezu alle diese Erdbeben werden von den seismologischen Messnetzen automatisch aufgezeichnet und ausgewertet. Schon die enorme Zahl signalisiert: Das Bild des Erdbebenforschers, der mit krauser Stirn die zappelnde Seismometernadel analysiert, hat nur noch in Katastrophenfilmen seinen Platz und vermittelt den Zuschauern eine sehr altmodische Vorstellung von Geowissenschaft. Gerade



1.4 Heat and mass transfer inside the Earth are the cause of plate tectonics.

1.4 Wärme- und Massentransport im Erdinneren sind die Ursache für die Plattentektonik.

sion speed has decreased to six to eight centimetres per year.

During geological time periods of millions of years, plate tectonic processes also interact with the climate. Acting as barriers within the atmosphere, the Andes, Rocky Mountains and Himalayas have a decisive impact on the global climate. Conversely, new research results reveal that the climate affects tectonics. The erosion of the Andes by rainfall transports large quantities of sediment into the Pacific off the Southern Andes – material that is found in so-called accretionary wedges off the coast. The erosion of the mountains produces isostatic compensatory movements with corresponding deformation of the crust. Consequently, the climate has a direct impact on the development of the active plate edge and the formation of mountains.

Earthquakes: signals of plate tectonics

Earthquakes are a direct expression of the active tectonics of our planet. The world's first remote recording of an earthquake was made in Potsdam in 1889 by a young scientist, Ernst von Rebeur-Paschwitz. He discovered disturbances in his measurements of tidal-based vertical movements of the crust and obtained similar recordings from his measuring apparatus in Wilhelmshaven. These results, coupled with news of an earthquake that had shaken the Japanese capital of Tokyo, led him to conclude that the recorded interference was nothing other than vibrations of the terrestrial body. These vibrations,

which originated from this Pacific quake in the vicinity of the main island of Japan (► Fig. 1.3), could be felt in Potsdam.

Since then, scientific seismology has undergone rapid development. Our knowledge of the inner structure of the Earth (► Fig. 1.4) comes from this discipline. Seismic investigation is a standard method used in industrial exploration. Modern procedures allow more accurate investigations that, in conjunction with improved analysis methods, provide new insights into System Earth. The Hawaii Islands, to name one example, are the tip of the highest volcano on Earth. They are 11 000 metres high – 7000 metres from their base on the Pacific Ocean floor to sea level and 4000 metres above water. How did they come into being? Geoscientists assume they were formed from a big plume of hot rock, a so-called *mantle plume*, 2900 kilometres deep in the lower mantle of the Earth. Rather like gas bubbles in a glass of mineral water, this plume floats upwards and gives birth to a volcano on the surface of the Earth. These ideas are supported by geochemical investigations and measurements of gravity, and have been confirmed by drilling into the volcanoes of Hawaii.

Final proof of this process was obtained by new methods of analysing earthquake waves. These new methods provided seismological evidence for the existence of magma bubbles that are rising in the mantle of the Earth and from which Hawaii is continually developing.

Earthquakes are not only a window for science to see inside the Earth, they are also a serious natural hazard to humans. The earthquake of December 2004 and the resulting tsunami claimed almost a quarter of a million lives. Although such disasters cannot be prevented, geo-

in der modernen Seismologie zeigt sich, dass nicht nur die verfeinerten Beobachtungs- und Messinstrumente, sondern auch die verbesserten Auswertungsmethoden einen wesentlichen Teil des Fortschritts der Wissenschaft ausmachen.

Klima im System Erde: Rohstoffe und die Folgen

Die Geowissenschaften prägen unseren Alltag, auch wenn uns das nicht immer bewusst ist. Die aktuelle Diskussion über die globale Klimaänderung ist ein gutes Beispiel dafür. Das Wissen um die Klimaänderung ist ein Resultat geowissenschaftlicher Forschung. Der Anstieg der mittleren Atmosphärentemperatur unseres Planeten um etwa $0,8^{\circ}\text{C}$ in den letzten 130 Jahren gilt derzeit als gesicherter Messwert. Geowissenschaftler widmen sich diesem Thema aus zwei Blickwinkeln, die auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen beruhen. Die erste Sichtweise ist die der Atmosphärenforscher: Klimatologen sind – mit Recht – stolz darauf, die jährliche Mitteltemperatur über einen Zeitraum von tausend Jahren recht genau ermitteln zu können. Geologen dagegen, die sich mit der festen Erde beschäftigen, betrachten eine weit aus längere Zeitskala der Erdgeschichte: Über viereinhalb Milliarden Jahre ist unser Planet schon alt, und selbst wenn wir nur den Zeitraum wählen, über den Europa in ungefähr den Umrissen von heute existiert hat, liegt man bei bis zu 70 Millionen Jahren. Betrachtet man die aus geologischen Archiven rekonstruierten Temperaturverläufe über derartige Zeitskalen (Paläo-

klima), so findet man ein stetiges, manchmal dramatisches Auf und Ab mit nur wenigen Ausnahmesituationen, in denen das Klima vergleichsweise stabil war. Und: Die Klimaumschwünge der Erdgeschichte zum Wärmereinen wie zum Kälteren waren fast durchweg ebenso schnell wie drastisch.

Die rund elftausend Jahre seit dem Ende der letzten Kaltphase stellen eine solche Ausnahmesituation dar. Diese Holozän genannte Periode der Erdgeschichte zeichnet sich durch einen eher stabilen Verlauf der Temperaturkurve aus. Das bedeutet nicht, dass es während dieser Zeitspanne keine klimatischen Veränderungen gegeben hätte: Einerseits erlaubte das Römische Klimaoptimum vor rund 2000 Jahren den Weinanbau in England, der sich im Mittelalter bis nach Südschottland ausdehnte; andererseits führte ein paar Jahrhunderte später, etwa ab dem 16. Jahrhundert, die sogenannte Kleine Eiszeit in weiten Teilen Europas zu Nahrungsmittelknappheit und sogar Hungersnöten. Aber, und das sei hier hervorgehoben, diese Klimaänderungen sind gering im Vergleich zu dem, was das System Erde im „normalen“ Verlauf seiner Geschichte aufweisen kann. Die Natur gibt also keine Garantie dafür, dass der seit 11 700 Jahren andauernde relativ stabile Zustand möglichst lange so bleiben wird – eher das Gegenteil ist der Fall.

Wie wir gesehen haben, besteht das System Erde aus einer Vielzahl von Teilsystemen. Das Klima ist eine der Schnittstellen, auf die Prozesse in Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre einwirken. Unsere Forschungen geben uns ständig neue und überraschende Einsichten in diese Prozesse und ihre verzweigten Wechselwirkungen, und wir sind immer noch weit davon entfernt, sie vollständig zu verstehen. Vor diesem Hintergrund erscheint die Annahme, wir

1.5 Erforschung des Paläoklimas: Sedimente aus Binnenseen sind präzise natürliche Klimaarchive.

1.5 Palaeoclimate research: sediments from lakes are precise, natural climate archives.



scientists play a central role in the development of early warning systems. Even in regions not threatened by earthquakes, disasters like these make us realise the dynamic nature of our planet. After all, around half a million earthquakes of magnitude 2 on the logarithmic Richter scale happen every year; earthquakes of magnitude 4, which can be clearly felt, occur around 7500 times per year. Most of these quakes occur at the edges of tectonic plates. Almost all of these earthquakes are automatically recorded and evaluated by seismological measuring networks. Their huge number demonstrates that the image of the furrow-browed seismologist analysing the bouncing seismometer needle has a place only in disaster films. This image conveys an out-dated notion of geoscience. Clearly, a considerable proportion of scientific advancement, particularly in modern seismology, is due not only to sophisticated observation and measuring instruments, but also to improved evaluation methods.

Climate in System Earth: raw materials and the consequences

Even if we are not always aware of them, the geosciences shape our everyday life. Current discussion of global climate change is a good example of this. Knowledge of climate change is a result of scientific research. The increase of around 0.8°C in the average atmospheric temperature of our planet in the last 130 years is currently accepted as a verified measurement. Geoscientists look at this topic from two perspectives based on very different time-scales. The first perspective is that of atmosphere researchers: climatologists are – justifiably – proud of being able to measure the average annual temperature very precisely over a period of a thousand years. In contrast, geologists dealing with solid ground see the history of the Earth on a far longer time-scale: our planet is more than four and a half billion years old and, even if we consider only the period during which Europe has existed with approximately its present outline, we are still looking at up to 70 million years. The temperature profiles reconstructed from geological archives over such time-scales (palaeoclimate) show a constant, sometimes dramatic rise and fall with only a few exceptional situations in which the climate was relatively stable. Furthermore and almost without exception, the abrupt climate changes in the history of the Earth, both warmer and colder, have been as rapid as they have been extreme.

It is around eleven thousand years since the end of the last cold phase, and this period represents one such exceptional situation. This period in the history of the Earth, called the Holocene, is characterised by a relatively stable path of the temperature curve. This does not mean that there have been no climatic changes during this time span. On the one hand, the climate optimum in Roman times around 2000 years ago enabled vines to be cultivated in England, which extended to southern Scotland in the Middle Ages. On the other hand, a few centuries later, from around the 16th century, the so-called Little Ice Age caused food shortages and even famine in large parts of Europe. However – and this is emphasised here – these climate changes have been minor compared with those System Earth can claim in the “normal” course of its history. Nature therefore provides no guarantee that the prolonged relatively stable condition of the last 11 700 years will continue for a long time to come – in fact, the opposite is true.

As we have seen, System Earth consists of many sub-systems. The climate is one of these interfaces. It is affected by processes in the atmosphere, hydrosphere, geosphere, biosphere and anthroposphere. Our research is constantly providing us with new and surprising insights into these processes and their diverse reciprocal effects, and we are still a long way from fully understanding them. Against this background, the assumption that we can limit current global warming to two degrees by 2050 by reducing anthropogenic greenhouse gas emissions seems doubtful. The actual achievability of this two-degree objective is scientifically unfounded because there are too many variables in play in System Earth, and even the climate subsystem has a high, inherent momentum of its own.

Yet, on the other hand, it is also true that the available scientific methods have allowed us to identify a signal in the global temperature change since the 1970s, at the latest, that can only be explained as the consequence of human activity. In terms of the history of the Earth, humans are a very successful result of natural evolution and have become established in almost all habitats on Earth. This success has been accompanied by a huge consumption of resources. Even in early societies, humans never really acted in an ecofriendly manner; however, in previous eras, man-made effects were limited to a local scale. Humankind is now interfering with System Earth with increasing intensity and on a global scale. We are affecting the climate not only as a result of a continuous increase in CO₂ output, but also by changing the surface of the Earth and by our increasing consumption of raw materials. In short, by the existence of our current population of almost seven billion, humans have them-

könnten die aktuelle Erderwärmung durch Reduktion der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen bis 2050 auf zwei Grad begrenzen, als fragwürdig. Eine tatsächliche Erreichbarkeit dieses Zwei-Grad-Ziels lässt sich wissenschaftlich nicht begründen, dafür sind im Gesamtsystem Erde zu viele Variablen im Spiel, und auch der Teilkomplex Klima selbst besitzt eine hohe Eigendynamik.

Andererseits gilt aber auch: Mit den verfügbaren wissenschaftlichen Methoden stellen wir spätestens seit den 1970er-Jahren ein Signal in der globalen Temperaturänderung fest, das wir uns nicht anders erklären können denn als Folge menschlicher Tätigkeit. Erdgeschichtlich gesehen ist der Mensch ein sehr erfolgreiches Ergebnis der natürlichen Evolution, und er hat sich in nahezu allen Lebensräumen der Erde etabliert. Mit diesem Erfolg einhergegangen ist ein enormer Ressourcenverbrauch. Auch in frühen Gesellschaften hat der Mensch nie wirklich umweltfreundlich agiert, aber die Auswirkungen des menschlichen Handelns waren in früheren Epochen lokal begrenzt. Heute jedoch greift der Mensch immer stärker und im globalen Maßstab in das System Erde ein. Er beeinflusst das Klima nicht nur durch den ständig zunehmenden CO₂-Ausstoß, sondern ebenso durch die Veränderung der Erdoberfläche und steigenden Rohstoffverbrauch – kurz, durch sein gesamtes Dasein in derzeit fast sieben Milliarden Exemplaren. Der Mensch selbst ist zum Geofaktor geworden. Daraus folgt die Notwendigkeit zum Handeln.

Es geht dabei nicht nur um das Klima. Der ständig wachsende Rohstoff- und Energieverbrauch ist langfristig ebenso inakzeptabel wie das sorglose Erzeugen von Abfallprodukten, sei es Hausmüll, der auf Deponien gelagert, oder Kohlendioxid, das in die Lagerstätte Atmosphäre entsorgt wird. Wir müssen also Wege finden, die sowohl Minderungsstrategien für den Ausstoß von Treibhausgasen eröffnen, als auch die Anpassung an eine sich ständig ändernde natürliche Umgebung ermöglichen. Sicher ist, dass der Rohstoff- und Energieverbrauch auf absehbare Zeit weiter wachsen wird – eine fast unausweichliche Folge des prognostizierten Wachstums der Weltbevölkerung auf neun Milliarden Menschen bis zum Jahr 2050 und des gleichzeitigen Siegeszugs eines an Konsum und Bequemlichkeit orientierten „westlichen“ Lebensstils. Den Hochtechnologie-ländern kommt daher eine besondere Aufgabe zu: Sie müssen Verfahren und Techniken entwickeln, welche die eigenen Gesellschaften wie auch die der Schwellen- und Entwicklungsländer in die Lage versetzt, Energie und Rohstoffe mit höherer Effizienz und geringeren Folgewirkungen zu nutzen.

Fossile Brennstoffe: in naher Zukunft noch unverzichtbar

Der Umbau des Energiesystems hin zu regenerativen Energieformen wird nicht von heute auf morgen erfolgen. Nach allen seriösen Schätzungen werden fossile Brennstoffe auch in absehbarer Zukunft noch einen wesentlichen Bestandteil der Weltenergieversorgung darstellen. Die effektivere Nutzung dieser Energieträger muss daher ein Ziel auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffnutzung sein, zumal diese festen, flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen zum Verbrennen eigentlich viel zu wertvoll sind.

Das beginnt bereits bei der Exploration: Erdöl und Erdgas altern sowohl chemisch als auch mikrobiell. Die Erkundung durch Bohren ist teuer, und bevor man eine kilometertiefe Bohrung abteuft, sollte man wissen, ob sich der Aufwand lohnt. Neben den klassischen seismischen Erkundungsmethoden haben die Geowissenschaftler Verfahren zur Prognose der Erdölqualität entwickelt, welche die Explorationsbohrungen auf ein Minimum reduzieren können. Erdöl ist unter anderem in geologischen Beckenstrukturen zu finden. Kombiniert man Geochemie und Mikrobiologie mit Verfahren der numerischen Beckenmodellierung, lässt sich gegebenenfalls der Grad des biologischen Abbaus von Erdöl im Untergrund vorhersagen – eine Voraussetzung zur optimalen Nutzung von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten. Bei einem absehbaren Wachstum der Erdbevölkerung auf über neun Milliarden Menschen bis zum Jahre 2050 wird die effiziente Rohstoffnutzung in jedem Fall nötig sein, auch bei nichtenergetischer Nutzung dieser wertvollen Ressourcen.

Neuere Schätzungen gehen davon aus, dass Gashydrate, also „brennendes Eis“, eine zukünftige Energiequelle sein könnten, die quantitativ deutlich größer ist als alle Erdölreserven (► Abb. 1.6). Diese Methanhydrate bilden sich bei hohem Druck und niedrigen Temperaturen vor allem in den Sedimenten an untermeerischen Kontinentalhängen. Was aber geschieht bei ihrer Förderung? Die Kontinenten sind potenziell instabil. Es besteht daher die Möglichkeit, dass bei der Förderung der Methanhydrate ein Abhang ins Rutschen gerät. Die Folgewirkungen könnten beträchtlich sein; das zeigt die aufgrund natürlicher Prozesse abgegangene Storegga-Rutschung am Kontinentalschelf von Norwegen vor rund 8000 Jahren, die einen gewaltigen Tsunami erzeugte. Geowissenschaftler untersuchen derzeit diese Zusammenhänge, um zukünftige Risiken abschätzen zu können.

Unvermeidlich ist, dass bei der Verbrennung dieser fossilen Stoffe das Treibhausgas CO₂ entsteht. Dieses

selves become a geofactor. Consequently, there is a need for action.

This does not only involve the climate. The continuous consumption of raw materials and energy is as unacceptable in the long term as the careless generation of waste products. This applies to both household waste stored in landfills and carbon dioxide emitted into the air that uses the Earth's atmosphere as a dump. We must therefore find ways to establish curtailment strategies for the emission of greenhouse gases that allow adaptation to the continuously changing natural environment. It is certain that the consumption of raw materials and energy will continue to grow in the foreseeable future. This is an almost unavoidable consequence of the predicted growth in the world's population to nine billion people by 2050 and the simultaneous triumphant progress of a "western" lifestyle that focuses on consumption and convenience. High-tech countries therefore have a special task: they must develop methods and techniques that enable their own societies, as well as those of the emerging economies and developing countries, to use energy and raw materials with greater efficiency and less consequential effects.

Fossil fuels, still indispensable in the near future

The conversion of our energy system to regenerative forms of energy will not happen overnight. According to all serious estimates, fossil fuels will continue to furnish a significant proportion of the world's energy supply for the foreseeable future. More effective use of these energy sources must therefore be a goal on the path to sustainable use of raw materials, particularly as these solid, liquid and gaseous hydrocarbon compounds are far too valuable to burn.

This starts with exploration: mineral oil and natural gas age both chemically and microbially. Exploration by drilling is expensive and, before drilling a kilometre-deep well, we must be sure that it is worth the effort. In addition to the classical seismic methods of investigation, geoscientists have developed methods of predicting mineral oil quality, which can reduce exploratory drilling to a minimum. Oil is found in various types of locations, including geological basin structures. If geochemistry and microbiology are combined with numerical methods of modelling basins, it might be possible to predict the degree of biodegradation of oil in the ground. This is a prerequisite for optimum use of hydrocarbon deposits. With a foreseeable growth in the

world's population to over nine billion people by 2050, efficient utilisation of raw materials will definitely be necessary, even for applications of these valuable resources that do not involve energy.

Recent assessments assume that gas hydrates – i.e. "combustible ice" – could be a future source of energy. Gas hydrates (► Fig. 1.6) are available in considerably greater quantities than all the oil reserves combined. These methane hydrates form under conditions of high pressure and low temperature, particularly in the sediments on undersea continental slopes. But what will happen when they are mined? The continental slopes are potentially unstable. It is therefore possible that a slope will start to slip when the methane hydrates are extracted. The consequences of this could be considerable: the Storegga slip, caused by natural processes on the continental shelf in Norway around 8000 years ago, resulted in a massive tsunami. Geoscientists are currently investigating these relationships in order to be able to assess future risks.

Combustion of these fossil materials inevitably produces CO_2 , a greenhouse gas with a harmful effect on the climate. Continued release of this gas into the atmo-



1.6 Combustion of a sample of synthetic methane hydrate. Laboratory investigations of methane hydrates will provide information on the utilization of these fossil fuels.

1.6 Laboruntersuchungen von Methanhydraten können Aufschlüsse über die Nutzbarkeit dieser fossilen Brennstoffe geben. Hier brennt eine synthetisch erzeugte Probe von Methanhydrat.

weiter unreguliert in der Atmosphäre abzulagern, ist keine Lösung. Man kann das Kohlendioxid aber aus dem Rauchgas der Kraftwerke und Fabriken abtrennen und es zurück in die Erde bringen, wo es herkommt; oder man recycelt das klimaschädliche Gas, indem man es chemisch weiterverarbeitet.

Bereits jetzt wird an einigen Erdöl- und Erdgasförderstellen in der Nordsee das Kohlendioxid wieder an den Entnahmeort hinuntergepumpt, allerdings weniger zur Entsorgung als eher zu dem Zweck, mit dem Gasdruck das Reservoir besser ausfördern zu können. Im brandenburgischen Ketzin hingegen untersucht man in einem Langzeitvorhaben, wie sich CO_2 in einem Salzwasser führenden Sandstein in etwa 700 Metern Tiefe verhält. Dort werden in einem Experiment rund 60 000 Tonnen CO_2 in den Untergrund gepumpt, um in der Folge das Verhalten des eingespeisten Gases mit dem gesamten Methodenspektrum der Geowissenschaften zu untersuchen. Sollte sich dieser Weg als gangbar erweisen, wäre damit ein Reservoir gefunden, in dem sich große Mengen dieses Treibhausgases speichern ließen, und zwar weltweit. Zumindest für große Punktquellen könnte sich über diese in Deutschland erarbeitete Technologie auch eine Option für die sich entwickelnden Volkswirtschaften Asiens und Afrikas eröffnen.

Kohlendioxid zurück in die Erde zu bringen, ist jedoch nur eine Brückentechnologie, um Zeit zu gewinnen, bis wir zu einer umweltverträglicheren Energieversorgung kommen.

Die Zukunft ist regenerativ

Die Zukunft auf längere Sicht gehört nicht den fossilen Brennstoffen. Wenn in absehbarer Zeit über neun Milliarden Menschen mit Wasser, Rohstoffen und Energie versorgt werden müssen, kann das nur in nachhaltiger Weise geschehen. Dabei kommt den regenerativen Energiequellen eine entscheidende Rolle zu. Aber was heißt das, in erdgeschichtlichen Kategorien ausgedrückt?

Gegen 4,6 Milliarden Jahre Erdgeschichte heben sich menschliche Zeitmaßstäbe als mikroskopisch ab. Wenn wir von regenerativer Energie sprechen, beziehen wir uns auf die menschliche Zeitskala, denn auch heute bildet sich an vielen Stellen auf der Erde Erdöl aus organischer Masse. Aber diese Prozesse laufen weit außerhalb menschlicher Zeitvorstellungen ab. Die als nachhaltig bezeichneten Energiequellen Wind, Sonne, Biomasse, Erdwärme und Gezeiten stellen uns Energie dagegen schon heute zur Verfügung, im tagtäglichen Betrieb des Systems Erde.

Unsere Erde ist ein Feuerball. Im Erdkern, 6370 Kilometer unter unseren Füßen, beträgt die Temperatur über 5000°C und an der Kern-/Mantelgrenze in 2900 Kilometern Tiefe herrschen immer noch 3000°C . Von den extremen Temperaturen im Erdmantel trennt uns nur die durchschnittlich 30 Kilometer mächtige Kruste. Unser Planet bietet uns also für menschliche Maßstäbe unendlich viel Energie an.

Erdwärme wird an vielen Orten schon als Wärmequelle genutzt, vor allem da, wo sie nahe an der Oberfläche und damit leicht zugänglich zur Verfügung steht. So speist Island mehr als die Hälfte seines Bedarfs an Nutzenergie aus Geothermie, und auch die Stromerzeugung aus Erdwärme ist auf der Vulkaninsel im Nordatlantik weit verbreitet (► Abb. 1.7).

In Deutschland sind die geologischen Bedingungen nicht so günstig wie in Island, aber auch hier offeriert uns die Erde nutzbare Energie. Im brandenburgischen Groß Schönebeck wurden zwei über 4300 Meter tiefe Bohrungen niedergebracht. Man will nachweisen, dass auch bei uns die Erdwärme selbst bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 150°C nicht nur zum Beheizen von Gebäuden, sondern auch zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die zwangsläufig geringere Effizienz ließe sich ausgleichen, indem man die Niedrigtemperaturwärme aus der Erde mit Biomasse kombiniert und so die Ergiebigkeit erhöht und damit die Kosten verringert. Groß Schönebeck liegt im Norddeutschen Becken, einer geologischen Struktur, die von Polen bis Belgien reicht und die sich ähnlich an vielen Stellen auf dem Globus findet. Gelingt die geothermische Nutzung an diesem Standort, dann sollte sich dieses Verfahren von Warschau bis Amsterdam und auch andernorts auf der Welt einsetzen lassen, wenn es der Untergrund erlaubt.

Zukunftsaufgaben

Halten wir fest: Unser Planet ist ein äußerst komplexes Gebilde mit einer nicht überschaubaren Anzahl von Teilsystemen. In jedem dieser Teilsysteme laufen nichtlineare, dynamische Prozesse ab, die in Wechselwirkung sowohl untereinander als auch mit den anderen Teilsystemen stehen. Zudem ist das System Erde geprägt durch Vorgänge, die eine riesige Spannweite in Raum und Zeit abdecken. Dass sich auf der Erde Leben, auch menschliches Leben, findet, macht diesen Planeten nach unserem Wissensstand einzigartig.

Die Existenz des Menschen ist eingebettet in dieses hochkomplexe System, sein Wirken unterliegt Rahmenbedingungen, die er nicht vollständig durchschaut, die

sphere in an unregulated manner is no solution. However, carbon dioxide can be separated from flue gases produced by power stations and factories and then returned into the ground from whence it came. Alternatively, it can be recycled by means of chemical processing.

At some oil and natural gas wells in the North Sea, carbon dioxide is already being pumped back down to the place of extraction. The main objective there is to use the gas pressure to improve extraction from the reservoir rather than for reasons of disposal. In the town of Ketzin (Germany), however, a long-term project is being conducted to investigate how CO₂ behaves in saline water-bearing sandstone at a depth of around 700 metres. In this experiment, around 60 000 tonnes of CO₂ are being pumped underground. The behaviour of the injected gas will then be investigated using the entire spectrum of geoscientific methods. If this avenue proves to be viable, we would have found reservoirs all over the world in which large quantities of this greenhouse gas can be deposited. At least for large point sources, this German technology could constitute an option for the developing economies of Asia and Africa.

Pumping carbon dioxide back into the Earth is, however, only a bridging technology to gain time until we arrive at a more environmentally friendly energy supply.

The future is renewable

In the longer term, the future does not lie in fossil fuels. If over nine billion people need to be supplied with

water, raw materials and energy in the foreseeable future, this needs to be done in a sustainable way. Therefore renewable energy sources have a decisive role to play. What does this mean though in terms of geological categories?

Against the 4.6 billion years of Earth's history, human time-scales seem microscopic. When we talk about renewable energy, we refer to the human time-scale. Although oil is being formed from organic mass in many places on Earth even today, these processes take place far beyond the human concept of time. In contrast, the energy sources of wind, sun, biomass, geothermal heat and tides, which are described as sustainable, already provide us with energy in the daily operation of System Earth.

Our Earth is a fireball. In the Earth's core, 6370 kilometres beneath our feet, the temperature is over 5000 °C; at the core/mantle boundary 2900 kilometres down, the temperature is still 3000 °C. We are separated from these extreme temperatures in the mantle only by the crust, which is an average of 30 kilometres thick. On a human scale, our planet therefore offers us an unlimited supply of energy.

Geothermal heat is already used as a heat source in many places, particularly where it is close to the surface and therefore easily accessible. Iceland, for example, obtains more than half of its energy requirements from geothermal resources. Electricity generation from geothermal heat is also widespread on this volcanic island in the North Atlantic (► Fig. 1.7).

In Germany, the geological conditions are less favourable than in Iceland, but the Earth still offers us useful energy. In the Brandenburg community of Groß



1.7 Hot water from inside the earth as an energy source: Well HE-53 in the Hellisheiði geothermal field in South-West Iceland during a production test.

1.7 Heißes Wasser aus dem Erdinnern als Energiequelle: die Bohrung HE-53 im Geothermalfeld Hellisheiði in Südwest-Island während eines Produktionstests.

1.8 Laser-Reflektionsmessung zur Positionsbestimmung erdnaheer Satelliten wie CHAMP und GRACE.

1.8 Laser reflection measurement to determine the position of satellites in a low-Earth orbit, such as CHAMP and GRACE.



er aber erforschen möchte. Es ist der Anspruch der Geowissenschaften, diesen komplexen Wirkungszusammenhängen des Systems Erde auf die Spur zu kommen. Der Planet Erde ist unser Lebensraum, und wenn der Mensch versucht, die Prozesse zu verstehen, die die Dynamik dieses Planeten verursachen, heißt das nichts anderes, als sein Haus zu erkunden.

Gerade in der Einmaligkeit und Komplexität ihres Arbeitsgegenstandes liegt die eigentliche Faszination der Geowissenschaften. Zudem haben es die Geowissenschaften mit sehr großen Spannweiten in Raum und Zeit zu tun. Die Skalen reichen von Milliarden Jahren, die das Alter unserer Erde beschreiben, bis zu Nanosekunden bei Messungen mittels des Global Positioning System (GPS), von molekularen Größen in der Geochemie bis zu Lichtjahren bei der Bestimmung von geodätischen Basislinien der Very Long Baseline Interferometry mithilfe von Quasaren. Hinzu kommt eine unüberschaubare Anzahl nichtlinearer Prozesse und Wechselwirkungen in und zwischen den Teilsystemen Geosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre – um nur die wichtigsten zu nennen. Die Aufteilung der Geowissenschaften in Einzeldisziplinen wie Geophysik, Geodäsie, Geologie, Mineralogie, Geochemie, Geoökologie spiegelt eine notwendige Spezialisierung wider, um den vielen Facetten des Systems Erde gerecht zu werden.

Die Geowissenschaften haben in den vergangenen Jahrzehnten entscheidende Schritte vollzogen. Zu Recht stellt das Wissenschaftsmagazin *New Scientist* die Entdeckung der Plattentektonik als eine der zehn größten Ideen der Menschheit gleichberechtigt neben die Evolutionstheorie, die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie. Wir sind – bei allem Wissen – aber noch weit davon entfernt, die Erde und ihre Prozesse in ihrer gesamten Komplexität zu verstehen. Angesichts der großen Zahl nichtlinearer Wechselwirkungen, Umwand-

lungsprozesse und nicht berechenbarer Singularitäten stellt sich durchaus die Frage, ob unsere derzeitige Physik diesen komplizierten Apparat „Planet Erde“ überhaupt beschreiben kann. Andererseits ist die Anthroposphäre, sind wir Menschen ein aktives Teilsystem dieses Planeten, wie uns die Debatte um Rohstoffe, Klima und Eingriffe in die Ökosysteme zeigt. Wir müssen also das System Erde bestmöglich verstehen, um in ihm bestehen zu können.

Menschen vermögen als einzige Spezies des Planeten Erde vernunftgesteuert zu agieren. Sie haben daher auch das Potenzial, nicht nur die Erde zu nutzen, sondern die unvermeidlichen, teils negativen Folgewirkungen dieser Nutzung zu minimieren – im eigenen Interesse.

Krieg, Terrorismus und Gewalt bedrohen Millionen von Menschen, jetzt und in diesem Augenblick. Die Beseitigung dieser Menschheitsgefahren hat sicherlich eine sehr hohe Priorität. Wir dürfen aber nicht übersehen, dass die ungebremste und unkontrollierte Nutzung der Schätze unseres Planeten zu neuer Gewalt führen kann; man denke nur an das Konfliktpotenzial, das der Rohstoff Wasser in vielen Regionen der Erde birgt.

Insofern ist es keine Überschätzung, wenn man die Geoforschung und ihre Anwendungen als eine Schlüsselwissenschaft für das zukünftige Überleben der Menschheit darstellt. Das Wachstum der Weltbevölkerung stellt uns vor die Aufgabe, die Ressourcen unseres Heimatplaneten so zu nutzen, dass eine nachhaltige Existenzsicherung auch für die nachfolgenden Generationen möglich ist. Die Geowissenschaften und damit das Verständnis des Systems Erde-Mensch sind folglich Leitdisziplinen für die Zukunft. Wir haben keinen Reserveplaneten zum Auswandern, also müssen wir mit unserer Erde sorgfältig umgehen. Und eben dazu sollte man sie möglichst gut kennen und verstehen.

Schönebeck, two wells more than 4300 metres deep have been sunk. The intention is to demonstrate that geothermal heat can also be used in Germany, even at the relatively low temperature of 150 °C. This can be used not only for heating buildings, but also to generate electricity. The inevitable lower efficiency could be compensated by combining low-temperature heat from the Earth with biomass, thereby increasing yield and reducing costs. Groß Schönebeck lies on the North German Basin, a geological structure extending from Poland to Belgium. Similar examples can be found in many places around the globe. If geothermal exploitation is successful at this location, this method could be used from Warsaw to Amsterdam – and elsewhere in the world, if the underground situation allows.

Future tasks

Let us remember: our planet is a highly complex entity with a vast number of subsystems. Non-linear, dynamic processes take place in each of these subsystems and have reciprocal effects both among themselves and on the other subsystems. Moreover, System Earth is characterised by processes covering a huge range in terms of space and time. As far as we know, the fact that life, including human life, is found on Earth makes this planet unique.

The existence of humankind is embedded in this highly complex system. Also the impact of humans is subject to parameters we do not fully understand but want to explore. The geosciences aspire to understand the effects of these complex interactions of System Earth. Planet Earth is our living environment. By trying to understand the processes that determine the dynamics of this planet, we are doing nothing more than exploring our own home.

The fascination of the geosciences lies directly in the uniqueness and complexity of their object. In addition, geoscientists concern themselves with very long spans of both space and time. The scales range from the billions of years describing the age of the Earth, to nanoseconds for measurements using the global positioning system (GPS); from molecular sizes in geochemistry, to light years for determining geodetic baselines of the very long baseline interferometry using quasars. In addition, there are a vast number of non-linear processes and reciprocal effects within and between the subsystems of the geo-

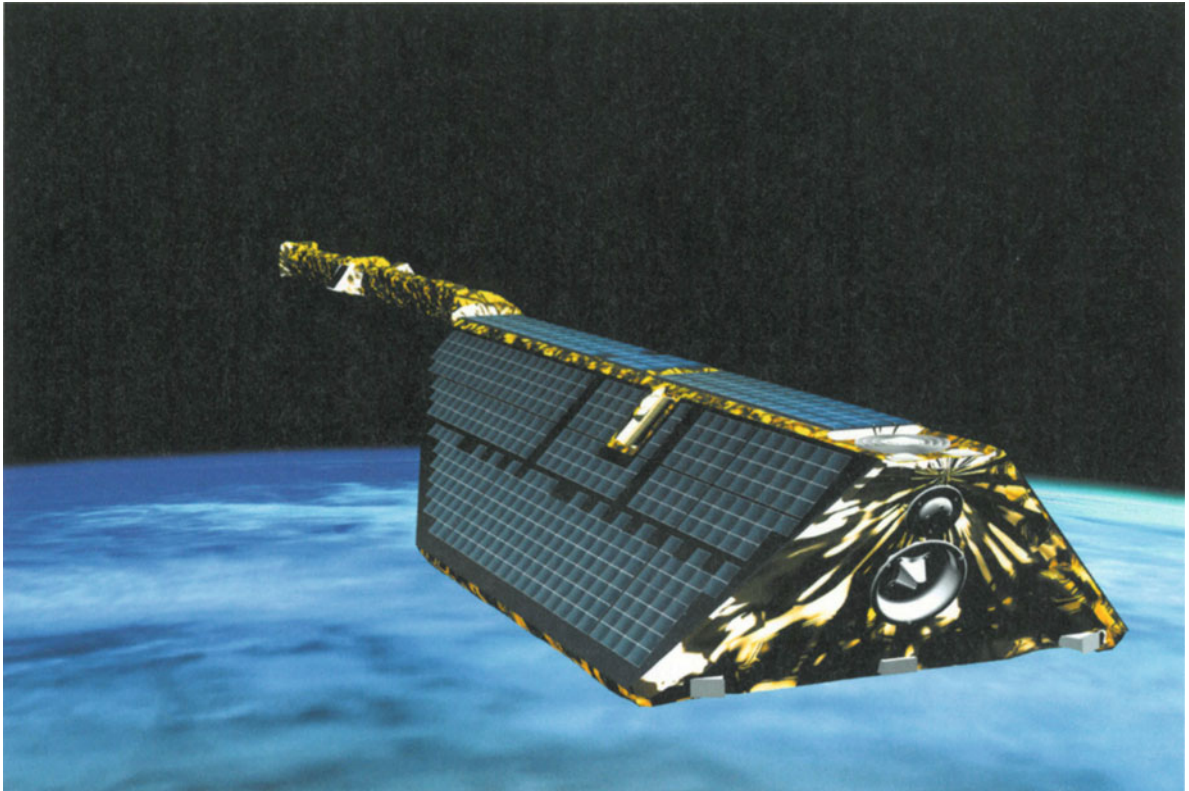
sphere, atmosphere, hydrosphere and biosphere – to name only the main ones. The division of the geosciences into individual disciplines such as geophysics, geodesy, geology, mineralogy, geochemistry and geocology reflects a necessary specialisation in order to cater for the many facets of System Earth.

Decisive steps have been made in the geosciences in recent decades. The science magazine *New Scientist* justifiably ranks the discovery of plate tectonics as one of the ten biggest concepts of humankind, on a par with the theory of evolution, quantum mechanics and the theory of relativity. But, for all we know, we are still a long way from understanding the Earth and its processes in their entire complexity. In view of the large number of non-linear interactions, transformation processes and unpredictable singularities, the question arises as to whether our current understanding of physics will ever be able to describe this complex apparatus of “Planet Earth”. We must also consider the anthroposphere: we humans are an active subsystem of this planet, as demonstrated by debates on raw materials, the climate and invasions of ecosystems. It is thus essential that we widen our understanding of System Earth as far as possible in order to be able to exist within it.

Humans are the only species on Planet Earth that are able to act on the basis of reason. They therefore have the potential not only to use the Earth, but also to minimise – in their own interests – the inevitable, sometimes negative consequences of this use.

War, terrorism and violence threaten millions of people right now. The eradication of these threats to humanity is certainly a very high priority. However, we must not overlook the fact that unchecked and uncontrolled use of the treasures of our planet can lead to new violence: think of the conflicts that water, as a raw material, has the potential to cause in many regions of the Earth.

In this respect, it is no overestimation to describe georesearch and its applications as a key science for the future survival of mankind. The growth of the world’s population challenges us to use the resources of our home planet in such a way that a sustainable existence is also possible for subsequent generations. The geosciences, and the understanding of the Earth-Human system, are therefore leading disciplines for the future. We have no reserve planets to migrate to, so we must treat our Earth with care. To do this, we need to know and understand it as well as we can.



2.1 Der Geoforschungssatellit CHAMP (CHALLENGING Mini Satellite Payload) maß in den Jahren 2000 bis 2010 das irdische Schwere- und Magnetfeld und atmosphärische Zustandsgrößen.

2.1 The georesearch satellite CHAMP (CHALLENGING Mini Satellite Payload) measured the Earth's gravitational and magnetic fields as well as atmospheric parameters from 2000 to 2010.

Kapitel 02

**Der Blick aus dem All
in das System Erde**

Chapter 02

**The View into System Earth
from Space**