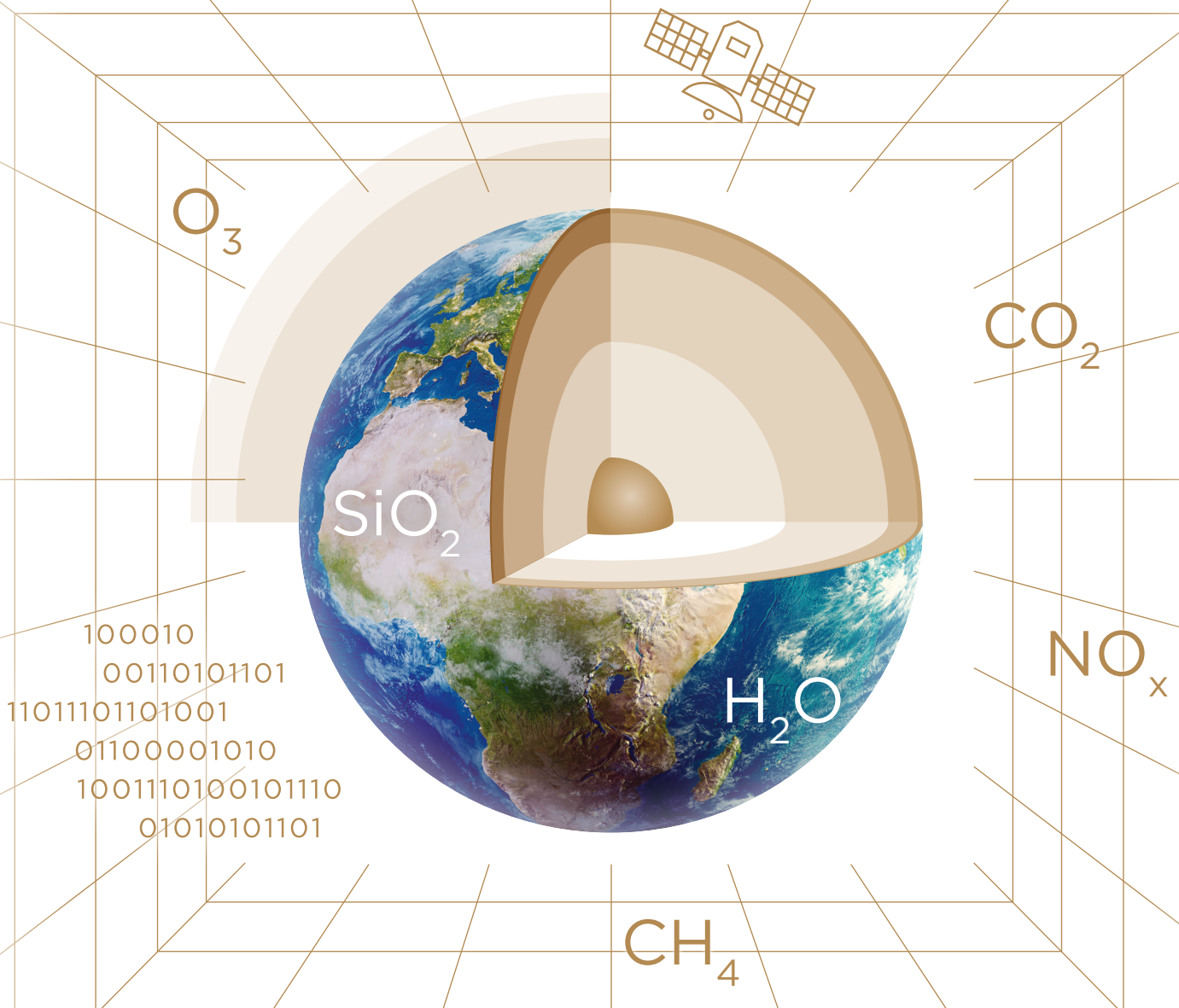




Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

Zukunftsreport Wissenschaft



Erdsystemwissenschaft

Forschung für eine Erde im Wandel

Impressum

Herausgeber

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

Redaktion

Prof. Dr. Onno Oncken, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Gerhard Wörner, Georg-August-Universität Göttingen
Prof. Dr. Peter Schlosser, Arizona State University, Tempe (USA)

Redaktionelle Begleitung

Dr. Christian Anton, Johannes Mengel, Dr. Henning Steinicke, Dr. Sebastian Wetterich
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Kontakt: politikberatung@leopoldina.org

Lektorat

Dr. Grit Zacharias, Leipzig

Titelgrafik und Umschlaggestaltung

Sisters of Design – Anja Krämer & Claudia Dölling GbR, Halle (Saale)

Grafiken

Erfurth Kluger Infografik GbR, Berlin

Gestaltung und Satz

Klötzner Company, Hamburg

Druck

druckhaus köthen GmbH & Co. KG
Friedrichstraße 11/12
06366 Köthen (Anhalt)

ISBN: 978-3-8047-4255-0

DOI

https://doi.org/10.26164/leopoldina_03_00590

Lizenz

Texte und Grafiken stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zitiervorschlag

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022): Zukunftsreport Wissenschaft. Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Halle (Saale).

Redaktionsschluss

30. Juni 2022

Zukunftsreport Wissenschaft

Erdsystemwissenschaft

Forschung für eine Erde im Wandel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	4
Zusammenfassung.....	5
1 Wissenschaft für unseren Planeten im Wandel.....	8
1.1 Die Ära der Geowissenschaften.....	8
1.2 Die Fragmentierung der Geowissenschaften.....	9
1.3 Der Erdsystem-Ansatz.....	11
1.4 Entdeckung, Diagnose, Lösungen – die Leitmotive dieses Berichts.....	12
1.5 Von der Erdbeobachtung zur Modellbildung.....	14
1.6 Für die Zukunft ausbilden.....	15
1.7 Aufbau und Ziele dieses Berichts.....	15
2 Die Erde als System	16
3 Die großen Herausforderungen der Erdsystemwissenschaft...21	
3.1 Dynamik der tiefen Erde und ihre Verbindung mit der Erdoberfläche.....	21
3.2 Koevolution von Erde und Leben.....	28
3.3 Gegenwart und Zukunft des Ozeans, der Atmosphäre und der Kryosphäre.....	37
3.4 Klimaveränderungen in der Erdgeschichte als Fenster in die Zukunft.....	44
3.5 Das Anthropozän.....	50
3.6 Extremereignisse, Risiken und Resilienz.....	57
3.7 Ressourcen.....	65
4 Big Data in der Erdsystemwissenschaft.....	79
4.1 Große Herausforderungen durch große Datenmengen: Big Data	79
4.2 Dateninfrastruktur – die Bereitstellung von Big Data.....	80
4.3 Maschinelles Lernen – Optionen für verrauschte Daten und unbekannte Zusammenhänge.....	81
4.4 Digitale Zwillinge der Erde entwickeln.....	82
4.5 Die Computer der Zukunft – die Rolle der Skalierung.....	83
4.6 Was wird benötigt?.....	84

5	Akademische Ausbildung in Erdsystemwissenschaft.....	85
5.1	Die Vielfalt der geowissenschaftlichen Studiengänge.....	85
5.2	Eine Lehre der Erdsystemwissenschaft	86
5.3	Geowissenschaften mit weiteren Naturwissenschaften stärker kombinieren.....	87
5.4	Neue Technologien einsetzen.....	88
5.5	Lösungen kommunizieren.....	89
5.6	In den Schulen beginnen.....	89
5.7	Was wird benötigt?.....	90
6	Handlungsempfehlungen für die Erdsystemwissenschaft.....	91
6.1	Empfehlungen für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger.....	91
6.2	Empfehlungen für die geowissenschaftliche Gemeinschaft.....	93
	Literatur.....	96
	Mitwirkende.....	98

Vorwort

Der Planet Erde ist ein komplexes System. Die Interaktion und Dynamik seiner Komponenten prägen unseren Planeten und beeinflussen damit ganz wesentlich auch dessen Bewohnbarkeit für den Menschen. Unser Verständnis des Erdsystems ist jedoch lückenhaft. Viele große Fragen der Geowissenschaften sind nur unzureichend beantwortet, wie zum Beispiel: Unter welchen Bedingungen konnte das Leben auf der Erde entstehen und sich weiterentwickeln? Lassen sich Erdbeben sicher vorhersagen? Wie lange sind Ozeane noch verlässliche Puffer, die den Klimawandel abfedern? Wie interagieren Artenvielfalt und Klima? Reichen die Ressourcen des Planeten, um das Überleben der Erdbevölkerung zu sichern?

Wie fragil die Dynamik im Erdsystem ist, wird besonders deutlich, seit der Mensch massiv in das Gefüge der Erde eingreift und zu einer entscheidenden Kraft geworden ist, deren Einfluss in allen Teilen der Erde drastisch spürbar ist. Für dieses neue Zeitalter der Erdgeschichte prägte der Nobelpreisträger Paul Crutzen ML den Begriff des Anthropozäns.

Der Mensch hat globale Prozesse in Gang gesetzt, die die Umwelt und Lebensbedingungen eines großen Teils der Weltbevölkerung bedrohen, ganze Regionen der Erde unbewohnbar machen, die globale Gesundheit beeinträchtigen und die natürlichen Ressourcen soweit ausschöpfen, dass die Entwicklung zukünftiger Generationen beeinträchtigt ist. Die wissenschaftlichen Grundlagen für ein Verständnis dieser Prozesse zu entwickeln und Risikoabschätzungen und Lösungen zu erarbeiten, sind die zentralen Herausforderungen der Geowissenschaften. Hierfür ist ein von systemischem Denken geprägter Ansatz notwendig – die Erdsystemwissenschaft.

Die Erforschung des Erdsystems sieht sich jedoch auch innerhalb des Wissenschaftssystems Herausforderungen gegenüber. Die Komplexität dieses Forschungsfeldes trifft auf eine in unterschiedlichste Fachdisziplinen zersplitterte akademische Ausbildung und Forschung.

Dieser Zukunftsreport ist ein Plädoyer dafür, die Erdsystemwissenschaft als konzeptuellen und strukturellen Rahmen zu entwickeln, um der Grundlagenforschung neue Impulse geben und gesellschaftliche Herausforderungen bewältigen zu können. Er ruft dazu auf, traditionelle Denkmuster in Lehre und Forschung zu hinterfragen und mutig zukunftsfähige Strukturen aufzubauen, die den großen Herausforderungen gerecht werden. Nur so kann das notwendige Verständnis der Veränderungen unserer Lebensumwelt erlangt und können geeignete Handlungsoptionen wissenschaftsbasiert entwickelt werden.

Prof. (ETHZ) Dr. Gerald H. Haug

Präsident der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Zusammenfassung

Die Nutzung fossiler Energien, die Übernutzung natürlicher Ressourcen und die sich daraus ergebende Beeinträchtigung oder Zerstörung vieler Ökosysteme durch die Menschen haben den Zustand von Teilen der Erde massiv verändert. Der Klimawandel ist die sichtbarste und zugleich gravierendste Folge. Menschliches Handeln gefährdet damit zunehmend das Wohlergehen künftiger Generationen und macht die Gewährleistung der Stabilität des Erdsystems zur größten Herausforderung, der sich die globale Gesellschaft jetzt und in absehbarer Zukunft stellen muss. Die Menschheit ist herausgefordert, schnellstmöglich Lösungen zu entwickeln und umsetzen, um den Klimawandel zu begrenzen, Nahrungsquellen, Rohstoffe, Wasser, Land und Meere nachhaltig zu nutzen, Naturgefahren in einer zunehmend urbanisierten Gesellschaft vorherzusehen und abzumildern und kritische Entwicklungen von Erdsystemkomponenten zu überwachen und zu bewerten. Die Dringlichkeit, diese Herausforderungen im Rahmen der 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen anzugehen, macht die Geowissenschaften zu einer der zentralen wissenschaftlichen Disziplinen der Zukunft.

In den letzten Jahrzehnten haben die verschiedenen Disziplinen der Geowissenschaften verstärkt einen quantitativen Ansatz verfolgt, um Prozesse des Erdsystems mithilfe von Erdbeobachtungs-, Überwachungs- und Modellierungstechniken in ihrer Gesamtheit zu denken, da zwischen Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre und Geosphäre sehr enge Verbindungen und gegenseitige Abhängigkeiten bestehen. Diese Erkenntnis hat zur Entwicklung eines Konzeptes geführt, das „Earth System Science“ genannt wird. In Deutschland hat dieser Ansatz einer „Erdsystemwissenschaft“ in den Forschungseinrichtungen, den Forschungsthemen, in der Ausbildung und in den Fachgesellschaften jedoch noch nicht ausreichende Verbreitung gefunden. Die Entwicklung des Konzeptes einer Erdsystemwissenschaft ist von größter Bedeutung, da die wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen die Fähigkeiten einzelner Disziplinen bei Weitem übersteigen.

Bereits jetzt sind einige Bereiche der Geowissenschaften an deutschen Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen durch positive Entwicklungen geprägt. Allerdings fehlt in der deutschen Forschungslandschaft bislang ein Rahmen für Forschung und Lehre, der sämtliche Maßnahmen bündelt, um die großen Herausforderungen in all ihren Dimensionen gemeinsam anzugehen. Eine junge Generation, die sich mit den vielfältigen Fragen des globalen Wandels auseinandersetzt, wird sich zunehmend für ein Studium und die Forschung im Bereich der Erdsystemwissenschaft interessieren. Es ist daher an der Zeit, die Erdsystemwissenschaft in Deutschland als zukunftsweisenden Rahmen zu etablieren, der auf den Stärken der bestehenden geowissenschaftlichen Disziplinen aufbaut, aber die disziplinenübergreifende Vernetzung deutlich intensiviert. Innerhalb eines solchen Rahmens werden neue wissenschaftliche Entdeckungen gefördert, Diagnosen zu Zustand und Entwicklung des Planeten und seiner Habitate geliefert und damit Lösungen für die vielen Herausforderungen einer sich schnell verändernden Welt ermöglicht.

Mit diesem Bericht möchte die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina:

- 1) eine Diskussion und Maßnahmen der verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen zur künftigen wissenschaftlichen und organisatorischen Entwicklung in Deutschland anregen und
- 2) Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern Empfehlungen zu wichtigen Handlungsfeldern geben.

Um die deutschen Geowissenschaften zu modernisieren und ihre führende Rolle bei der Lösung der zahlreichen gesellschaftlichen Herausforderungen zu sichern, werden folgende sechs Maßnahmen vorgeschlagen:

I. Die Erdsystemwissenschaft als Leitidee etablieren

Die Erdsystemwissenschaft hat ein grundlegendes Verständnis zur Entstehung und Entwicklung unseres Planeten sowie der Wechselwirkungen und Rückkopplungen innerhalb der Systeme der Erde zum Ziel. Sie integriert die verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen und schafft die Voraussetzungen für die Ableitung von Prognosen und Lösungen für eine Erde im Wandel. Die Erdsystemwissenschaft wird sich die technologischen Fortschritte in den Natur-, Computer- und Ingenieurwissenschaften zunutze machen und somit eine verstärkt transdisziplinäre, digitale und quantitative Wissenschaft sein.

II. Kapazitäten für Erdbeobachtung aufbauen

Veränderungen im System Erde müssen erkannt, überwacht und für die Prognose künftiger Entwicklungen genutzt werden. Das erfordert umfangreiche Erdbeobachtungskapazitäten und Analysewerkzeuge und massive Investitionen in wissenschaftliche Infrastrukturen. Förderorganisationen, Universitäten und Forschungseinrichtungen sollten gemeinsam einen nationalen Fahrplan zum Aufbau der notwendigen Beobachtungskapazitäten entwerfen und Investitionen in eine neue Generation von Erdbeobachtungs- und Datenverwaltungs-Infrastrukturen voranbringen. Diese Infrastruktur wird einen direkten und breiten Zugang zu Beobachtungsdaten und Visualisierungswerkzeugen ermöglichen.

III. Digitale Infrastrukturen und Kapazitäten für Big Data entwickeln

Um der Komplexität des Erdsystems Rechnung zu tragen und letztlich auch einen sicheren Handlungsspielraum für die Menschheit zu gewährleisten, müssen Wege, Grenzen und kritische Schwellenwerte des globalen Wandels, der Ressourcenverfügbarkeit und der Georisiken ermittelt werden. Dies umfasst auch die möglichen Auswirkungen des Überschreitens dieser Schwellenwerte auf Gesellschaft und Umwelt. Umfangreiche Investitionen in digitale Infrastrukturen, die mit Initiativen für eine nationale Datenstrategie und eine Hochleistungsrechner-Infrastruktur einhergehen müssen, sind deshalb erforderlich. Dazu zählt auch die Schaffung geeigneter Kapazitäten für die Speicherung, Analyse und Modellierung von „Big Data“.

IV. Universitäre Ausbildung weiterentwickeln

Die Ausbildung der nächsten Generation von Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern ist für die Verwirklichung dieser Pläne von entscheidender Bedeutung. Erdsystemwissenschaft sollte schon in den Schulen in die Lehrpläne aufgenommen werden, um Schülerinnen und Schüler mit ausgeprägtem Interesse an MINT-Fächern (Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften und Technik) für eine Hochschulausbildung in der Erdsystemwissenschaft zu gewinnen. Die Verbindung von Grundlagen und Anwendung auf die Lösung künftiger Probleme im Kontext des Erdsystems sollten die Eckpfeiler der Ausbildung in allen geowissenschaftlichen Disziplinen werden. Die Lehrpläne sollten den Studierenden fächerübergreifend die Fähigkeit vermitteln, das volle Potenzial von Erdbeobachtungssystemen und Analysewerkzeugen zu nutzen, Modellierungs- und Visualisierungsstrategien zu entwickeln und moderne Datenanalysemethoden anzuwenden.

V. Kompetenzen zur Kommunikation von Lösungsvorschlägen aufbauen

Zukunftsszenarien von einer Erde im Wandel erfordern Lösungsoptionen und vor allem deren wirksame Vermittlung an die Öffentlichkeit und an politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger. Diesbezügliche Fähigkeiten werden an Universitäten und Forschungszentren in der Regel nicht gelehrt. Die Entwicklung der Fähigkeit zur wechselseitigen Kommunikation von Lösungen geht über das, was die Geowissenschaften allein leisten können, hinaus. Ebenso wichtig sind daher die Verbindungen zu anderen Disziplinen, z. B. der Soziologie, Ökonomie und Psychologie.

VI. Vernetzung verstärken

Die Erdsystemwissenschaft wird die Bildung von Netzwerken erfordern. In Netzwerken kann eine kritische Masse an Kompetenzen, Forschungs- und Infrastrukturkapazitäten erreicht werden, die den aktuellen Herausforderungen gerecht werden. In den marinen Wissenschaften gibt es auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene bereits erfolgreiche interdisziplinäre Netzwerke und Partnerschaften. Solche Verbünde sind auch im Bereich der terrestrischen Geoforschung erforderlich. Ein zusätzlicher Vorteil großer Netzwerke liegt in der optimalen Nutzung der umfangreichen Beobachtungs- und Analysekapazitäten der außeruniversitären Einrichtungen durch universitäre Partner. Schließlich müssen sich die deutschen geowissenschaftlichen Fachgesellschaften koordinieren und institutionell mit einer Stimme auftreten, um in der Öffentlichkeit und von den Stakeholdern stärker wahrgenommen zu werden.

1 Wissenschaft für unseren Planeten im Wandel

1.1 Die Ära der Geowissenschaften

Viele der wichtigsten Herausforderungen, mit denen die Menschheit heute konfrontiert ist, fallen in den Bereich der Geowissenschaften.¹ Der Klimawandel, der wachsende Bedarf an natürlichen Ressourcen und die zunehmende Vulnerabilität der menschlichen Zivilisation, ihrer Infrastruktur und der globalen Wirtschaft sind ins Zentrum des öffentlichen Bewusstseins gerückt. Überflutungen, Meeresspiegelanstieg, Boden-degradation, Dürren, extreme Wetterereignisse, und Ressourcen- und Wassermangel sind nur einige der vielen Herausforderungen der Menschheit. Die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen und gleichzeitig die Folgen dieser Ereignisse zu bewältigen, sind Aufgaben für die Zukunft der Menschheit.

Diese Erkenntnis wird durch einen Paradigmenwechsel in den Geowissenschaften begleitet, hin zu einer modernen Sichtweise der Erde als dynamisches System interaktiver physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse.² Das Konzept der Erdsystemwissenschaft stärker in Forschung und Ausbildung zu verankern, ist das Anliegen dieses Zukunftsreports.

Der Mensch ist zu einer wirksamen Kraft im Erdsystem geworden. Diese Tatsache mündete in der Definition eines neuen geologischen Zeitalters, dem Anthropozän.³ Dieses neue Paradigma erfordert ein starkes Engagement der Geowissenschaften: Die 17 UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs)⁴ zielen darauf, die weltweite Armut zu beenden, die öffentliche Gesundheit und Bildung zu verbessern und die Ungleichheit zu verringern – und das alles bei gleichzeitiger Bekämpfung des Klimawandels und der Erhaltung unserer Meeres- und Landökosysteme. Fünf der SDGs haben einen unmittelbar geowissenschaftlichen Kern: sauberes Wasser, saubere Energie, Klimaschutz, Leben unter Wasser und Leben an Land. Im Wesentlichen fordern die SDGs, die Ressourcen der Erde zu nutzen, ohne die Bedürfnisse künftiger Generationen zu gefährden.

Die Geowissenschaften in Deutschland sind in einer exzellenten Position, um eine tragende Rolle bei der Bewältigung dieser Herausforderungen des planetaren Wandels zu spielen und zu dringend benötigten Lösungen beizutragen. Dabei profitieren sie von einer modernen Forschungsinfrastruktur und international hochsichtbaren Forschungsinstitutionen. Dennoch muss man sich fragen, ob die deutschen Geowissenschaften ihr Potenzial derzeit voll ausschöpfen. Angesichts der Herausforderungen und Chancen

1 Geowissenschaft ist die Wissenschaft von der Erde, einschließlich ihres tiefen Inneren, der Kontinente, der Ozeane, der Atmosphäre, der Magnetosphäre, der Flüsse, des Grundwassers, der Gletscher und der Böden. Die Geowissenschaften umfassen auch Organismen, die mit der Erde interagieren, einschließlich des Menschen.

2 Lenton (2016), National Science Foundation (2022).

3 Crutzen & Stoermer (2000).

4 United Nations (2015a).

sollte man erwarten, dass die Geowissenschaften insgesamt auf Augenhöhe mit den anderen Naturwissenschaften sind und von der Öffentlichkeit als prägende Wissenschaft wahrgenommen werden. Ein Indikator dafür, dass dies derzeit nicht der Fall ist, ist eine große Gruppe hochmotivierter junger Menschen, die sich um die Zukunft unseres Planeten sorgt, deren gestiegenes Interesse an Klima- oder Nachhaltigkeitsthemen sich jedoch nicht in steigenden Studierendenzahlen der Geowissenschaften widerspiegelt.

Ziel dieses Berichts ist es, die Hintergründe, die Perspektiven, das Potenzial, die Möglichkeiten und die Herausforderungen der Geowissenschaften im Kontext einer umfassenden Erdsystemwissenschaft aufzuzeigen.

1.2 Die Fragmentierung der Geowissenschaften

Fragmentierung in geowissenschaftliche Subdisziplinen

Ein Merkmal der Organisation der Geowissenschaften an deutschen Universitäten ist die sehr kleinteilige Unterteilung in Disziplinen und Subdisziplinen. Diese reichen von den einzelnen Wissenschaften der festen Erde und des Planetensystems (Geologie, Mineralogie, Geo- und Kosmochemie, Paläontologie, Geophysik) über die Wissenschaften der Erdoberfläche (Physische Geographie, Bodenkunde, Geoökologie, Hydrologie und Umweltwissenschaften), die Ozeanographie, den Wissenschaften der Atmosphäre und der Kryosphäre (Meteorologie, Glaziologie; oft als Subdisziplinen der Physik angesiedelt) bis hin zu Disziplinen, die sich mit der Vermessung und Abbildung unseres Planeten befassen (Geodäsie und Fernerkundung, Geoinformatik), sowie der Humangeographie. Problematisch ist zudem, dass die Subdisziplinen unterschiedlichen Fakultäten zugeordnet sind. In angelsächsischen Ländern hingegen sind diese Disziplinen häufig in größeren Fakultäten der Geowissenschaften oder der Erdsystemwissenschaft als eine der Naturwissenschaften vereint.

Die einzelnen Studienabschlüsse spiegeln diese Fragmentierung wider, wobei es hier in den letzten zwei Jahrzehnten durchaus Fortschritte gab. So wurde inzwischen an den meisten Standorten ein vereinheitlichtes geowissenschaftliches Curriculum geschaffen, das vor allem die Subdisziplinen der „festen Erde“ vereint: Geologie, Mineralogie, Geo- und Kosmochemie, Paläontologie, Geophysik und die jeweiligen angewandten Bereiche. Immer mehr spezialisierte Studiengänge bewegen sich bereits zwischen den traditionellen Grenzen der Disziplinen. Abschlüsse in „Klimasystemwissenschaft“ oder „Erdsystemwissenschaft“, die für die betroffene Generation möglicherweise interessant wären, sind jedoch noch immer kaum vorhanden.

Fragmentierung der Fachgesellschaften

Die Fragmentierung der akademischen Subdisziplinen der Erdsystemwissenschaft zieht wiederum eine noch größere Fragmentierung der Fachgesellschaften nach sich – diese sind in Deutschland in etwa 25 Gesellschaften organisiert. Das hat zur Folge, dass die deutschen Geowissenschaften – anders als die Physik oder Chemie, deren Subdisziplinen jeweils unter dem Dach nur einer Fachgesellschaft organisiert sind – nicht mit einer Stimme sprechen und öffentlich nicht wahrgenommen werden können.

Aufteilung in universitäre und außeruniversitäre Forschung

Ein strukturelles Problem, das alle wissenschaftlichen Disziplinen in Deutschland gemeinsam haben und das daher auch die Geowissenschaften betrifft, ist die Tatsache,

dass sowohl an Universitäten als auch in außeruniversitären Forschungseinrichtungen (z. B. Max-Planck- und Leibniz-Institute und Helmholtz-Zentren) sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und den Landesämtern für Geowissenschaften Forschung mit unterschiedlicher Ausrichtung und geringer Koordination betrieben wird. Da die Universitäten der Hoheit der Bundesländer unterliegen, existiert kein rechtlicher Rahmen zur Kooperation. Zudem sind die außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Museen mit Bezug zu den Geowissenschaften überwiegend von der Bundesregierung finanziert, organisiert im Rahmen der Max-Planck-Gesellschaft, der Helmholtz- oder der Leibniz-Gemeinschaft sowie Regierungsbehörden wie der BGR. Synchronisierung von umfassenden Forschungsanstrengungen und koordinierten Projekten ist kein wesentliches Merkmal dieser Organisationsstruktur; die Aktivitäten dieser Einrichtungen sind oft nicht auf die universitäre Forschung abgestimmt, und umgekehrt. Daher werden die Möglichkeiten, die diese – insgesamt sehr erfolgreiche – Organisationsstruktur bietet, bisher weder von Universitäten noch von außeruniversitären Forschungseinrichtungen in dem Maße ausgeschöpft wie etwa in der Physik.

Vielfältiger Arbeitsmarkt

So vielfältig das Fächerspektrum ist, so divers sind auch der aktuelle deutsche Arbeitsmarkt und das Spektrum an Branchen und Arbeitgebern für Absolventinnen und Absolventen geowissenschaftlicher Studiengänge. Neben Regierungsbehörden stellen Geo- und Ingenieurbüros einschließlich freiberuflicher Beraterinnen und Berater, die Rohstoffindustrie und Wirtschaftsunternehmen sowie fachnahe und fachfremde Wirtschaftsunternehmen die wichtigsten Arbeitsmärkte für Absolventinnen und Absolventen der Geowissenschaften dar. Nur etwa 10 Prozent der Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sind an Universitäten und in Forschungseinrichtungen angestellt.⁵ Neue Herausforderungen – vor allem durch die Energiewende und das EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 – machen sich jedoch bereits bemerkbar. Der Ausbau erneuerbarer Energien geht einher mit einem Stellenabbau im Bereich der Erkundung fossiler Energiequellen. Ein Wiederaufleben der Rohstoffkunde mit Schwerpunkt auf kritischen Metall-Ressourcen für erneuerbare Energien und Speichertechnologien, rasche technologische Fortschritte bei Beobachtungs- und Analysemethoden, Politikberatung und die zunehmende Bedeutung von „Big Data“ verändern den Arbeitsmarkt von Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern bereits jetzt deutlich.

Herausforderungen für die Geowissenschaften

Angesichts dieser Situation ist es nicht verwunderlich, dass sich die Geowissenschaften in einer Debatte über ihre zukünftige Ausrichtung befinden. Dabei geht es im Wesentlichen um drei Themen:

- 1) Die momentan angebotenen geowissenschaftlichen Studienabschlüsse haben keinen klaren Fokus, bieten kein eindeutiges Tätigkeitsprofil und kaum fachorientierte Karriereaussichten.
- 2) Die Wahrung einer soliden Basis der durch Neugier motivierten Grundlagenforschung ist essenziell für den Fortschritt der Wissenschaft. Die Wissenschaft muss sich aber zunehmend mit der Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der sich stark wandelnden Erde auseinandersetzen. Beobachtungen zu präzisieren, Probleme zu erkennen und zu charakterisieren, reicht nicht aus.

⁵ Merschel et al. (2020).

- 3) Die komplexen Herausforderungen, mit denen sich die Geowissenschaften heute konfrontiert sehen, können von den traditionellen Einzeldisziplinen allein nicht gelöst werden.

Die Erdsystemwissenschaft kann der interdisziplinäre Rahmen sein, der die geowissenschaftlichen Subdisziplinen zusammenfügt und sie so befähigt, effektiv zur Lösung der globalen Herausforderungen beizutragen. Gleichzeitig werden die Kerndisziplinen der Geowissenschaften und ihre fundamentale Rolle in der Erforschung unseres Planeten gestärkt.

1.3 Der Erdsystem-Ansatz

Das Erdsystem umfasst fünf Sphären (oder Subsysteme): Geosphäre, Hydrosphäre (einschließlich der Kryosphäre), Atmosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre. Der zentrale Ansatz der Erdsystemforschung besteht darin, die Material- und Energieflüsse zwischen diesen Sphären in einem integrativen Ansatz zu betrachten (Abb. 1). Die Rückkopplungen und Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen zeigen charakteristische Eigenschaften komplexer Systeme. Sie haben auf der Erde Bedingungen geschaffen, die die Entwicklung von Leben auf unserem Planeten im Verlauf von Milliarden Jahren ermöglichten.

Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen den Sphären der Erde

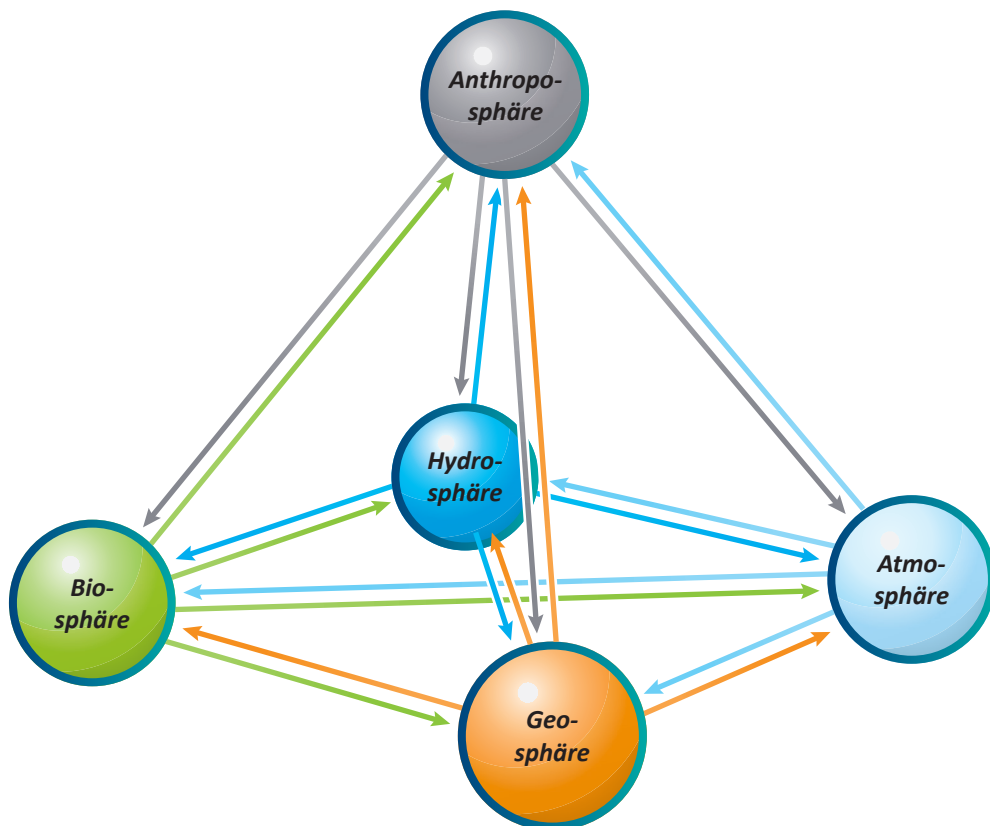


Abbildung 1. Alle Sphären des Erdsystems sind durch Wechselwirkungen in alle Richtungen miteinander verbunden.

Erdsystemwissenschaft ohne enge disziplinäre Grenzen

Die Erdsystemwissenschaft verbindet die Disziplinen der Geowissenschaften miteinander und beseitigt Hindernisse, die der gemeinsamen Betrachtung der Subsysteme im Wege stehen. Ihr Ziel ist es, sowohl die Grundlagenforschung als auch die Entwicklung von Prognosen und die Suche nach Lösungen für eine Welt im Wandel zu verbessern. Viele der heutigen komplexen und dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems können bereits durch direkte und aktuelle Beobachtung erfasst werden. Dies ist für die unzugänglichen Bereiche der tiefen Erde oder im Hinblick auf die Prozesse in der geologischen Vergangenheit noch nicht in gleichem Umfang möglich. Bislang sind Befunde und Beobachtungen aus geologischen Archiven unvollständig oder nicht in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung zugänglich.

Eine erhebliche Hürde für eine integrierende Erdsystemwissenschaft ist die Überwindung dieser Datenlücken über die gesamte zeitliche Entwicklung des Erdsystems, von der Entstehung der Erde bis zu ihrem heutigen Zustand. Die Evolution der Erde und ihres Klimas umfasst viele unterschiedliche Zeitskalen – von Millionen von Jahren, in denen Gebirge, Kontinentalplatten und Vulkane Material zwischen der tiefen Erde, ihrer Oberfläche und der Atmosphäre ausgetauscht haben, über Veränderungen, die sich über zehntausende Jahre erstrecken, bis hin zu klimatischen, jährlichen oder saisonalen Zeitskalen der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre.

Der Mensch stellt heute eine so mächtige Einflussgröße im Erdsystem dar, dass sozio-ökonomisches Verhalten und globale Veränderungen der Umwelt durch Wechselwirkungen miteinander verwoben sind. Will man beispielsweise die Überschreitung unerwünschter Klima-Kipppunkte oder den unmäßigen Verbrauch natürlicher Ressourcen vermeiden, ist ein schneller, gesellschaftlicher Wandel erforderlich. Soziale Kipppunkte, also schnelle Veränderungen in gesellschaftlichem Denken oder Handeln, können einen solchen Wandel möglicherweise – bewusst oder unbeabsichtigt – auslösen oder verstärken, sie können andererseits aber auch durch spürbare Veränderungen der Umwelt selbst ausgelöst werden. Gesellschaftliche Entscheidungen, beispielsweise die Abkehr von fossilen Brennstoffen als primäre Energiequelle, werden daher ein zentrales Element der künftigen Entwicklung des Erdsystems sein.

1.4 Entdeckung, Diagnose, Lösungen – die Leitmotive dieses Berichts

Mit diesem Bericht schlagen wir vor, die Erdsystemwissenschaft als übergeordnetes Leitbild für die Grundlagenforschung über die Entstehung und Bewohnbarkeit unseres Planeten und die Suche nach Antworten zur Sicherung unserer künftigen Lebensgrundlagen im Anthropozän zu entwickeln. Die verbundenen Leitmotive hierfür sind wissenschaftliche **Entdeckungen**, die **Diagnose** des Zustands des Systems Erde und Vorschläge für **Lösungen**.

Wissenschaftliche Entdeckungen vorantreiben

Neugier und Freude am Entdecken werden immer die Basis für die Erforschung der Erde sein.⁶ Wie sich z. B. unser Planet bildete oder wie und wann erstmals Leben entstanden ist und sich zur heutigen Biosphäre weiterentwickelt hat, sind Fragen, die die Mensch-

⁶ Zu den Ergebnissen einer internationalen Umfrage unter Forschenden siehe Der Spiegel (2009).

heit schon immer fasziniert haben und dies angesichts methodischer Fortschritte auch weiterhin tun werden. Forschung in diesen Bereichen ermöglicht auch, zu erkennen, wie sich Organismen durch ihren Stoffwechsel auf die Entwicklung der Erde insgesamt auswirken. Die Erforschung extrasolarer Körper und der Zusammensetzung ihrer Atmosphären werden Hinweise darauf liefern, ob auch auf Planeten außerhalb unseres Sonnensystems Leben existieren könnte – also eine Antwort auf die Frage liefern, ob wir alleine sind im Universum. Unsere zunehmend verbesserten Beobachtungsmöglichkeiten in anderen Bereichen machen uns deutlich, wie eng die Vorgänge der **tiefen Erde** miteinander und mit den Vorgängen auf der **Erdoberfläche** in Verbindung stehen. So wird zwar die Plattenbewegung durch die Materialeigenschaften der tiefen Erde und die Wärmeströme des Erdinneren gesteuert, gleichzeitig beeinflussen diese Plattenbewegungen jedoch auch die Bedingungen auf der Erdoberfläche, die Gebirgsbildung und die Entstehung von Erdbeben und Vulkaneruptionen. Eine Hypothese besagt, dass die mit den tektonischen Bewegungen verstärkte Gesteinsverwitterung über den geologischen Kohlenstoffzyklus mit dem Erdklima rückgekoppelt ist.

Eine präzise Diagnose des Zustands der Erde erstellen

Sedimentäre Archive und die darin enthaltenen chemischen Signale und Fossilien zeigen, dass es in der Erdgeschichte lange Phasen klimatischer Stabilität gab, aber auch abrupte Änderungen. Diese Klimaarchive geben Hinweise auf die Wirkung kritischer Schwellenwerte; die Befunde aus der Vergangenheit sind für entscheidende Fragen zu Wirkungsweise des heutigen Ozean-Atmosphäre-Kryosphäre-Systems wichtig: Wo im Ozean und wie schnell wird das anthropogen erzeugte CO₂ gespeichert? Wie verändert sich das Wetter im Zusammenhang mit dem Klima? Und wie beeinflusst das Klima die globalen Habitate, sowohl an Land als auch im Meer? Den Zustand der Erdoberfläche und der Meere, die Ursachen und die Folgen der mannigfaltigen Veränderungen zu diagnostizieren und ihren zukünftigen Verlauf zu prognostizieren, ist für all diese Fragen von größter Bedeutung.

Lösungen bereitstellen

Die Erdsystemwissenschaft muss Lösungen zur Abschwächung des Klimawandels und anderer globaler Umweltveränderungen für Entscheidungen und Anpassungsmaßnahmen anbieten, dazu gehört auch die Entwicklung von Resilienz gegenüber Naturgefahren wie Erdbeben, Vulkanausbrüchen und Extremwetterereignissen. Eine weitere Aufgabe für die angewandte Forschung ist die Formulierung von Strategien für eine nachhaltige Exploration, Produktion und Wiederverwertung von Ressourcen, die für die Dekarbonisierung der Energiegewinnung und Mobilität, die Bereitstellung von Rohstoffen und die ausreichende Verfügbarkeit von Wasser erforderlich sind. Eine umfassende Gewinnung, Archivierung und Analyse von Daten ist essenziell, um die Entwicklung der Erde, ihrer Habitate und Ökosystemleistungen zu prognostizieren. Hochaufgelöste Daten sowie das Monitoring des Erdsystems über lange Zeiträume und die Erstellung von Prognosemodellen bilden die Grundlage für die Beratung der Politik und für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Sie bieten zudem essenzielle Dienstleistungen für kommunale oder kommerzielle Informationsplattformen und geotechnische Anwendungen.

1.5 Von der Erdbeobachtung zur Modellbildung

Um die Leitmotive der Erdsystemwissenschaft – Entdeckung, Diagnose, Lösung – als tragfähiges Konzept zu etablieren, ist die Entwicklung und Anwendung verschiedener Werkzeuge, Methoden und Maßnahmen erforderlich. Dieser Bericht will Impulse für deren Etablierung und die langfristige Nutzung der Konzepte geben.

Das Monitoring des Erdsystems auf verschiedenen räumlichen Skalen ist entscheidend für das Erfassen von Zustandsveränderungen und das Erkennen von Kipppunkten. Für eine Vorhersage der Auswirkungen menschlichen Handelns auf das Klima und die Biodiversität und um bestimmen zu können, wie nahe wir bereits an den Schwellenwerten eines sicheren Handlungsraums für die Menschheit stehen, müssen neue Sensorsysteme entwickelt und die aktuellen Netzwerke zur Erdbeobachtung für das Monitoring und die Modellbildung ausgeweitet und auf die wachsende Datenmenge vorbereitet werden.

Die gewonnenen Daten ermöglichen es, komplexe Modelle zu entwickeln, mit denen das Prozessverständnis vertieft und das Erdsystem verlässlich abgebildet werden kann (Abb. 2). Damit sind diese Modelle Voraussetzung für die Prognose künftiger Entwicklungen des Erdsystems. Wichtig sind hierbei Aussagen darüber, wie robust und genau solche Simulationen der realen Welt sind. Das erfordert höhere Kapazitäten für die Speicherung, Verarbeitung und Auswertung der riesigen Datenmengen, eine hochleistungsfähige Recheninfrastruktur, einen einfachen Datenzugang und Werkzeuge für die Datenanalyse.

Beobachtungen und Modelle im Erdsystem

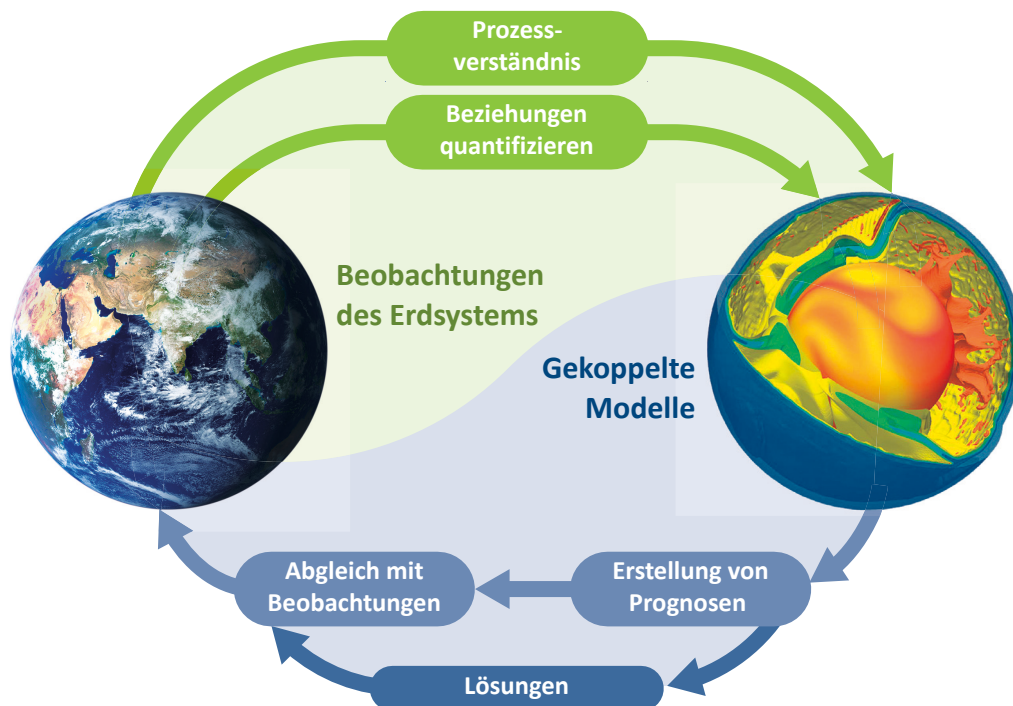


Abbildung 2. Erdbeobachtungen können genutzt werden, um Erkenntnisse über die Prozesse und Prozessraten abzuleiten sowie die wechselseitigen Beziehungen zwischen Beobachtung, Modell und Vorhersage zu quantifizieren. Diese gekoppelten Modelle können dann wiederum dazu verwendet werden, die Genauigkeit der Modelle und ihre Eignung für Prognose und Lösungsansätze zu verbessern. Bilder: NASA, Crameri et al. (2012).

1.6 Für die Zukunft ausbilden

Um die Leitmotive Entdeckung, Diagnose und Lösung langfristig zu etablieren, ist die Ausbildung an den Universitäten anzupassen. Zusätzlich zur grundlegenden akademischen Ausbildung im gesamten Spektrum der Geowissenschaften sollte die nächste Generation von Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern über Grundkenntnisse in der Wissenschaft komplexer Systeme und der Entwicklung und Anwendung moderner Beobachtungs-, Analyse- und Labormethoden verfügen. Gleichzeitig werden die Entwicklung und Anwendung komplexer Software für Data Science, Modellierung, Simulation und Visualisierung zunehmend an Bedeutung gewinnen und sollten daher Bestandteil der Ausbildung sein. Darüber hinaus ist es essenziell, Lösungsoptionen klar gegenüber der Öffentlichkeit zu kommunizieren. Dafür ist sozial- und wirtschaftswissenschaftliche Expertise notwendig – entsprechende Fähigkeiten sollten in der Ausbildung vermittelt werden.

1.7 Aufbau und Ziele dieses Berichts

Ziele dieses Berichts sind: 1) die Diskussion in den geowissenschaftlichen Disziplinen im Hinblick auf ihre zukünftige wissenschaftliche und organisatorische Entwicklung in Deutschland anzustoßen und 2) den Beteiligten Empfehlungen für wichtige dafür notwendige Maßnahmen zu geben.

Dieser Report richtet sich an alle Ebenen der Hochschulverwaltungen, Politikerinnen und Politiker in den Bereichen Wissenschaft, Technologie und Bildung sowie an Fachgesellschaften, Forschungsorganisationen, Förderer von Forschung und Technologie, Lehrkräfte in Schulen und Universitäten und all diejenigen, die sich mit der Rolle der Wissenschaft auf einem Planeten im Wandel befassen. Eine besonders wichtige Rolle wird die geowissenschaftliche Gemeinschaft in Ausbildung, Forschung und Anwendung spielen.

Der Report gliedert sich in fünf weitere Kapitel: Kapitel 2 liefert eine Einführung in die Konzepte der Erdsystemforschung, einschließlich einer kurzen Übersicht mit Begriffsdefinitionen. Kapitel 3 stellt sieben große Herausforderungen und Forschungsfragen der Erdsystemwissenschaft vor: (i) Dynamik der tiefen Erde, (ii) Koevolution von Erde und Leben, (iii) Ozean, Atmosphäre und Kryosphäre, (iv) Klimaveränderungen in der Vergangenheit, (v) Anthropozän, (vi) Extremereignisse und Risiken und (vii) Natürliche Ressourcen der Erde. Kapitel 4 widmet sich den Herausforderungen im Hinblick auf die rasant ansteigenden Datenmengen der Erdsystemwissenschaft und Kapitel 5 skizziert mögliche Maßnahmen für die akademische Ausbildung im Bereich der Erdsystemwissenschaft. Am Ende des Berichts folgen in Kapitel 6 Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger und die wissenschaftliche Gemeinschaft.

Die in diesem Bericht dargelegte Vision ist mit vielen Chancen und Vorteilen verbunden, aber auch mit großen Herausforderungen. So bietet die moderne Erdsystemwissenschaft eine breitere Perspektive als die traditionellen Einzeldisziplinen, was ihre Attraktivität für potenzielle Studierende erhöhen sollte. Verbesserte und erweiterte Forschungsstrukturen, Kooperationen zwischen verschiedenen Forschungsbereichen und eine starke Verbindung von universitären und außeruniversitären Einrichtungen werden die Sichtbarkeit stärken und es Universitäten ermöglichen, sich um große Forschungs- und Infrastrukturprogramme zu bewerben. Unser Ziel ist es, die Geowissenschaften in Deutschland so weiterzuentwickeln, dass sie den heutigen und künftigen Herausforderungen in der Forschung besser gerecht werden kann.

2 Die Erde als System

Keines der fünf Subsysteme oder Sphären unseres Planeten – Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Geosphäre und Anthroposphäre – kann isoliert betrachtet werden. Die Subsysteme beeinflussen sich durch den Austausch von Energie und Materie gegenseitig, und Rückkopplungen zwischen ihnen sorgen dafür, dass das Erdsystem über Jahrtausende hinweg stabil bleibt. Manche Subsysteme haben jedoch mehrere stabile Zustände, und eine ausreichend große Störung eines Teils kann das System insgesamt in einen neuen selbststabilisierenden Zustand bringen, wenn ein sogenannter Kipppunkt überschritten wurde. Mit dem Eintreten der Menschheit als neue Einflussgröße im Erdsystem droht nun mehreren Teilsystemen der Erde die Überschreitung ihrer Kipppunkte.

Seit den 1980er-Jahren wuchs bei Wissenschaftlern und politischen Entscheidungsträgern die Einsicht, dass die Erde ein integriertes System aus interagierenden Komponenten ist, zu denen auch der Mensch gehört. In einem bahnbrechenden NASA-Bericht aus dem Jahr 1986 heißt es dazu: „Diese Erkenntnis hat den Weg für einen umfassenderen und einheitlicheren Forschungsansatz geebnet, die Erdsystemwissenschaft.“⁷ Das 1987 ins Leben gerufene und 2015 abgeschlossene Internationale Geosphären-Biosphären-Programm (IGBP) führte die globale Wissenschaftsgemeinschaft dazu, die Erde als Ganzes zu begreifen. Seitdem hat sich die Erdsystemwissenschaft zum Leitparadigma für die Betrachtung der Erde entwickelt und ermöglicht damit die Bewertung der durch menschliche Aktivitäten verursachten Risiken.⁸

Zentrale Elemente der Erdsystemwissenschaft

Das Erdsystem ist durch verschiedene zentrale Elemente gekennzeichnet (Abb. 3). Bei diesen Mechanismen handelt es sich um Regulierungen und Rückkopplungen – im Grunde eine komplexe Kette aus Ursachen und Wirkungen (Abb. 3). In der Geschichte der Erde hat es in Milliarden von Jahren immer wieder Veränderungen gegeben: Die Rückkopplungen wurden aufgehoben, was zu „Revolutionen“ in der Art und Weise führte, wie die Erde und das Leben funktionieren. Das Anthropozän, das Zeitalter, in dem der Mensch gleichzeitig mehrere Komponenten des Erdsystems auf bislang beispiellose Weise strapaziert, wird mit großer Wahrscheinlichkeit ebenso wie die „Revolutionen“ der Vergangenheit durch kritische Kipppunkte und Kettenreaktionen der Ozean-Atmosphäre- und Land-Atmosphäre-Wechselwirkungen gekennzeichnet sein.

⁷ NASA (1987).

⁸ Schellnhuber (1999), Steffen et al. (2020).

Das Erdsystem

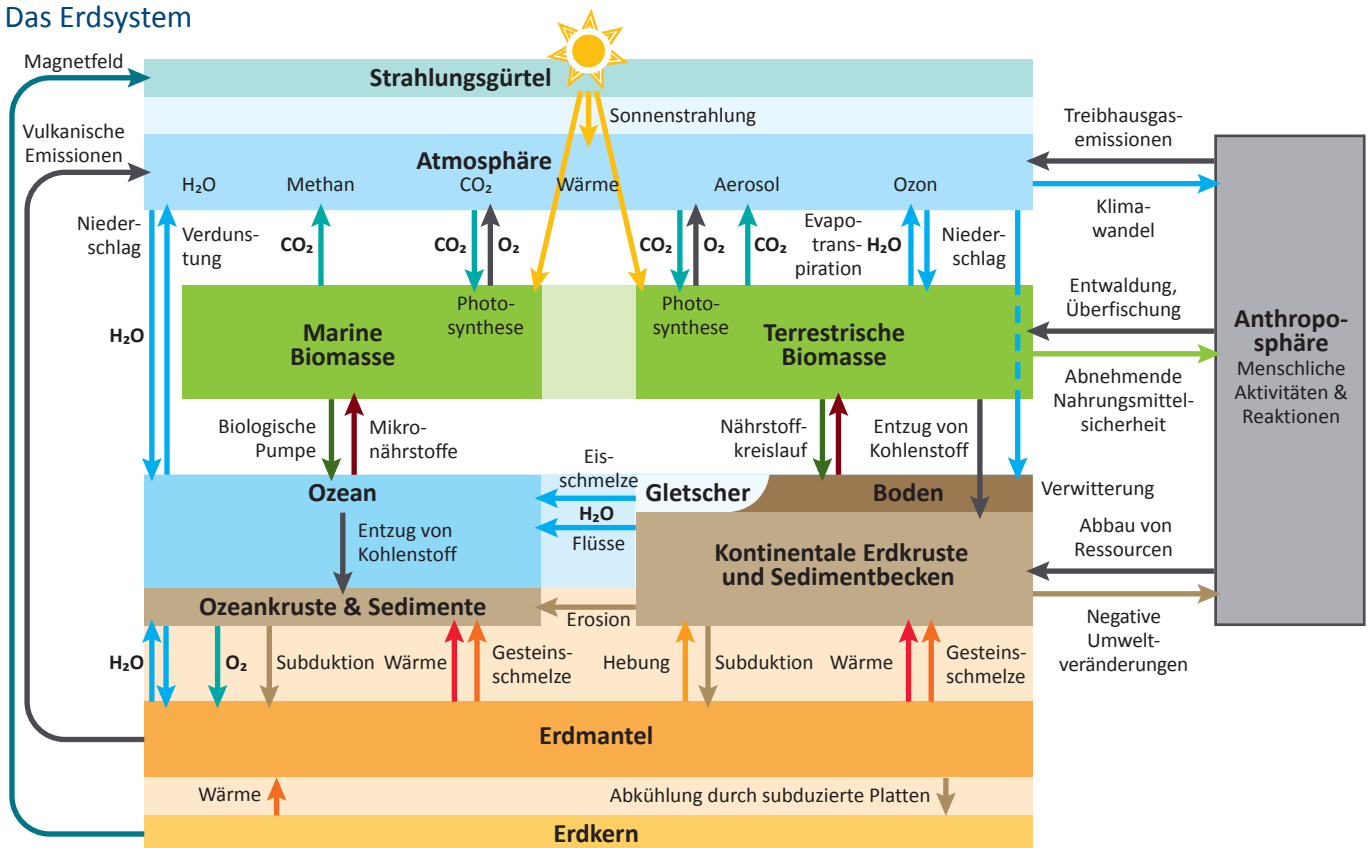


Abbildung 3. Kompartimente des Erdsystems vom Erdkern bis zur oberen Atmosphäre und dem Strahlungsgürtel. Die Pfeile zeigen den Transfer von Masse, Wärme und Strahlung oder Kräfte zwischen den Kompartimenten. Pfeile in beide Richtungen bedeuten, dass die Kompartimente durch Rückkopplungen miteinander verbunden sind. Pfeile, die nur in eine Richtung führen, stehen für externe Antriebe, die auf das Kompartiment einwirken, d. h. die Eigenschaften des Systems reagieren auf den Einfluss, ohne dass die Einflussquelle selbst beeinflusst wird. Das Erdsystem umfasst dabei ein gewaltiges Spektrum von Zeitskalen: von Milliarden Jahren für den Erdmantel bis hin zu Jahren oder weniger für Gase in der Atmosphäre. Antriebe durch menschliche Aktivitäten sind auf der rechten Seite dargestellt. Die moderne Systemtheorie besagt, dass das menschliche Verhalten durch Rückkopplungen mit dem Erdsystem beeinflusst wird. Diese Wechselwirkung ist hier dargestellt.

Dieses Systemkonzept wird in allen Abschnitten dieses Berichts aufgegriffen und umfasst alle Komponenten vom Erdmantel bis zur obersten Stratosphäre. Auch das Leben ist ein wesentlicher Bestandteil dieses dynamischen Systems. So beeinflusst fossile Biomasse die Zusammensetzung der atmosphärischen Gase, die wiederum mit Gesteinen reagieren. Manche Organismen erstellen selbst in großer Masse Gesteine.

Grenzen der Subsysteme

Wenn wir die Interaktionen eines Systems in Modellen abbilden möchten (Abb. 4), müssen wir dessen Grenzen definieren. Was liegt innerhalb und was außerhalb? Diese Definition ist wichtig, da eine Komponente außerhalb der Grenze das System beeinflussen kann, dabei selbst aber nicht beeinflusst wird – sie wirkt auf das System ein, interagiert aber nicht über Rückkopplungsmechanismen mit dem System. Ein Beispiel: Der obere Rand der Atmosphäre und die Magnetosphäre bilden zusammen die äußere Grenze unseres Planeten. Die äußere Grenze wird durch die Sonneneinstrahlung und die Konvektion des flüssigen äußeren Erdkerns beeinflusst, die Sonne liegt außerhalb des Erdsystems. Sie ist unsere Hauptenergiequelle, wird aber durch das, was innerhalb des Erdsystems passiert, nicht beeinflusst. Wo wir die innere Grenze ziehen sollen, ist

weniger eindeutig. Dies hängt von der Perspektive und auch von der Zeitskala ab. Von der Erdoberfläche aus betrachtet, hat das Erdinnere seine eigene Wärmequelle, die zu Mantel-Konvektion, Vulkanaktivität und Plattentektonik führt. Das Erdinnere wiederum wird durch Prozesse beeinflusst, die auf der Erdoberfläche über Zeiträume von hunderttausenden von Jahren stattfinden. Im Gegensatz hierzu lassen Klimamodelle, die z. B. Gletscherschmelzen oder die Ozeanzirkulation über Jahrzehnte oder Jahrhunderte analysieren, das Erdinnere außer Acht. Auf dieser Zeitskala kann das Erdinnere das Klima immer noch in Form von Vulkanausbrüchen beeinflussen, bei denen beispielsweise Schwefeldioxid in die obere Atmosphäre ausgestoßen wird, wodurch sich die Albedo der Erde erhöht. Diese Ereignisse stellen eine externe Beeinflussung dar, da das Erdinnere auf dieser kurzen Zeitskala nicht von der daraus resultierenden Klimaänderung betroffen ist. Die Wechselwirkungen zwischen dem Erdinneren und der Erdoberfläche treten am deutlichsten in den großen Zeiträumen zutage, in denen sich Ozeanbecken bilden, Kontinente kollidieren, Gebirge entstehen und verwittern und Material in den Erdmantel zurückgeführt wird. Auf dieser Zeitskala werden die Vorgänge im Erdinneren zu einem integralen Bestandteil des Klimasystems und beeinflussen sogar die Häufigkeit und Verteilung von Arten und deren Evolution.

Erdsystemdynamik und Systemtheorie: ein kurzer Thesaurus

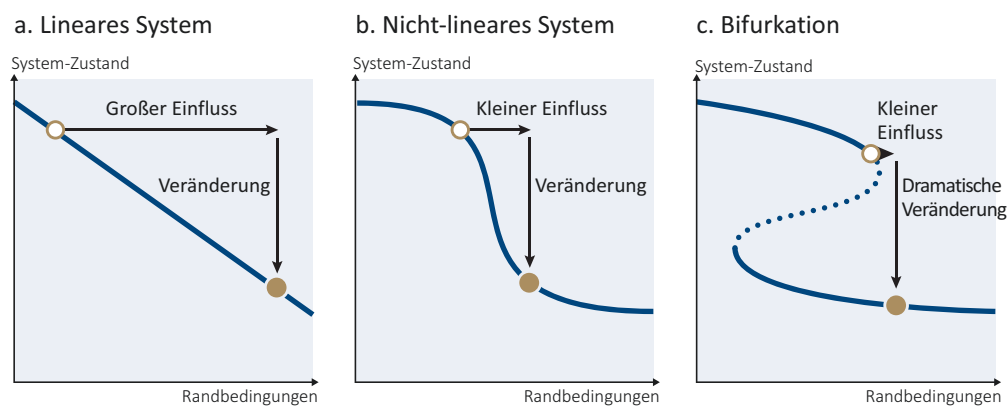


Abbildung 4. Wie reagiert der stabile Zustand eines Systems auf sich verändernde Grenzbedingungen (wie ansteigende Temperaturen, Kräfteinwirkungen oder den Zustrom von Masse)? Ein System, das gestört wurde, neigt immer dazu, sich wieder in Richtung eines stabilen Zustands zu bewegen, wie die Pfeile darstellen. a) In einem linear reagierenden System führt ein großer Antrieb zu einer linearen Reaktion im Systemzustand, wobei das Ausmaß durch den Koppelkoeffizienten bestimmt wird. Diese Reaktion ist reversibel. b) In einem nicht-linearen System kann bereits ein geringer Antrieb ausreichen, um eine starke und möglicherweise abrupte Reaktion in Form einer Veränderung des Systemzustands auszulösen (der steile Teil der Kurve stellt dabei eine nichtkatastrophale Schwelle dar). c) Wenn sich ein System einem „Bifurkationspunkt“ nähert, kann eine winzige Veränderung der Bedingungen zu großen Veränderungen im gegenüberliegenden Zweig führen. Diese Bifurkationspunkte sind sogenannte Kippunkte, an denen bereits geringste Störungen große Veränderungen verursachen können, die irreversibel sind. Frühwarnsignale treten in der Regel auf, wenn sich Systeme einem Bifurkationspunkt nähern. Nach Scheffer et al. (2009).

Sozioökologische Rückkopplungen

Im Zentrum des Konzepts des Anthropozäns, dem Kapitel 3.5 gewidmet ist, steht die Erkenntnis, dass der Mensch zu einer im Erdsystem wirksamen Größe geworden ist und dies bis hin zur Ebene der planetaren Entwicklung von Bedeutung ist. Der Mensch ist jetzt ein Akteur „innerhalb“ des Erdsystems. Er wirkt auf die Subsysteme der Erde ein und passt sein Verhalten entsprechend den Veränderungen an, die er selbst verursacht hat (Abb. 3). Diese Art von Wechselwirkungen wird als „sozioökologische Rück-

kopplung“ bezeichnet. Die in diesem Bericht vorgeschlagene Vorgehensweise in der modernen Erdsystemwissenschaft orientiert sich an diesen Prinzipien.

Bei der Entwicklung von Lösungen für die Gesellschaft hat fast alles, was wir vorschlagen, Konsequenzen für andere Teile des Erdsystems. So verstärkt die Notwendigkeit neuer Technologien zur Erzeugung regenerativer Energien den Bedarf und Abbau von kritischen Metallen (z. B. Lithium, Cobalt oder Seltene Erden) mit potenziell weitreichenden Folgen für die lokalen terrestrischen und Tiefsee-Ökosysteme. Jede vorgeschlagene Lösung ist zum Scheitern verurteilt, wenn ihre Akzeptanz in der Gesellschaft scheitert oder weitgehende Folgen nicht prognostiziert wurden.

Die Schlussfolgerung aus diesen Überlegungen ist, dass die Konzeptualisierung der Erde als komplexes System im Mittelpunkt jeder strategischen Entwicklung der Geowissenschaften stehen muss.

Erdsystemdynamiken und Systemtheorie – eine kurze Begriffsübersicht

System = Ein System besteht aus Komponenten, die durch Energie-, Material- und Kraftflüsse miteinander verbunden sind und durch Rückkopplungsmechanismen interagieren. Ein System hat definierte Grenzen, jenseits derer es keine bidirektionale Interaktion und Rückkopplung mehr gibt, aber es kann zu einer Beeinflussung von außerhalb des Systems ohne Rückkopplung kommen.

Subsystem = Jedes System kann aus kleineren Teilsystemen bestehen, in denen Rückkopplungen innerhalb des Systems, aber auch mit anderen Teilsystemen bestehen. Die Grenzen der Subsysteme sind flexibel und hängen von den betrachteten räumlichen und zeitlichen Skalen ab.

Forcing/Antrieb = Ein Faktor, der Veränderungen in einem dynamischen System bewirkt; er beeinflusst das System, wird aber selbst durch das System nicht beeinflusst. Ein gutes Beispiel für einen Klimasystemantrieb ist die Sonneneinstrahlung. Die Dynamiken des Erdmantels und sein sich veränderndes Konvektionsregime sind weitere Beispiele eines Antriebs für das Klima. Sie beeinflussen das Klima über ihre Rolle beim Wachstum von Kontinenten und der Schaffung von marinen Habitaten in flachen Kontinentalmeeren oder bei der wiederholten Bildung und Erosion von großen Gebirgsketten, die bei der Regulierung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre eine bedeutende Rolle spielen.

Rückkopplung = Ein Prozess, bei dem die Veränderung einer Größe eine zweite Größe verändert, und die Veränderung der zweiten Größe wiederum die erste verändert. Positive (oder verstärkende) Rückkopplungen verstärken die Veränderung der ersten Größe, während negative (oder ausgleichende) Rückkopplungen die ursprüngliche Veränderung wieder abschwächen. Ein Beispiel für eine negative Rückkopplung ist die Rolle der Silikatverwitterung bei der Regulation des langfristigen atmosphärischen globalen CO₂-Haushalts. Hierbei führt eine steigende atmosphärische CO₂-Konzentration zur Erwärmung und somit durch einen beschleunigten hydrologischen Kreislauf zu verstärkter Verwitterung, durch die CO₂ gebunden wird, was wiederum zu einer Abkühlung führt.

Kritische Schwelle = Ein Grenzwert, dessen Überschreitung zu großen und oft irreversiblen Veränderungen im Zustand des Systems führt. Zum Beispiel bricht eine Verwerfung, wenn ein kleiner Anstieg der Differentialspannung die Festigkeitsschwelle der Gesteine überschreitet und ein Erdbeben auslöst.

Kippelement = Eine Komponente des Erdsystems, die eine qualitative Veränderung erfahren kann, sobald bei einer Steuerungsvariablen eine kritische Schwelle überschritten wird, d. h. die mindestens einen Kippunkt hat, z. B. der Westantarktische Eisschild oder der Amazonas-Regenwald.

Kippunkt = Eine kritische Schwelle bei einem Steuerungsparameter, jenseits derer sich ein System reorganisiert. Die Veränderung kann irreversibel sein, da positive Rückkopplungen dominieren und das System sich in Richtung eines anderen Attraktors bewegt (z. B. einem alternativen stabilen Zustand). Als Beispiel dient hier das Tauen von Permafrostböden: Oberhalb einer bestimmten Temperatur kommt es zu einem Auftauen des Permafrosts in der nördlichen Hemisphäre. Dies setzt wiederum CO₂ und Methan frei, was zu einer weiteren Erwärmung und zum Verlust des Permafrosts führt. Diese Veränderungen sind selbst bei einer Rückkehr zu den ursprünglichen Bedingungen über den gleichen Zeitraum irreversibel.

Abrupte Veränderung = Eine Veränderung, die deutlich schneller ist als die historische Veränderungsrate. Ein Beispiel wäre die Konvektion im äußeren Erdkern, die das Erdmagnetfeld erzeugt, das über zehntausende Jahre relativ stabil bleibt, in unregelmäßigen Abständen jedoch sehr schnell seine Polarität umkehren kann.

Irreversibilität = Wenn eine Änderung des Antriebs den Zustand eines dynamischen Systems stört, wird es als irreversibel auf einer bestimmten Zeitskala definiert, wenn es keine Erholung von diesem Zustand gibt oder wenn die Erholung wesentlich länger dauert als die interessierende Zeitskala.

Bifurkation = Eine (Sattel-, Knoten- oder Falten-) Bifurkation in einem dynamischen System tritt dann auf, wenn ein bestimmter Parameter im System, der sich Beobachtungen zufolge über einen gewissen Zeitraum beständig in eine bestimmte Richtung bewegt hat, letztlich ein kritisches Niveau überschreitet. An diesem Punkt findet eine Bifurkation oder Gabelung statt, an dem ein stabiler Zustand seine Stabilität verliert. Befindet sich ein System nahe eines Bifurkationspunktes, kann eine winzige Veränderung der Bedingungen zu einem großen Wechsel in den gegenüberliegenden Zweig führen. Ein Bifurkationspunkt kann als eine Form eines Kippunktes betrachtet werden.

3 Die großen Herausforderungen der Erdsystemwissenschaft

In den folgenden Abschnitten werden einige der Themen beleuchtet, in denen die Interaktionen und Rückkopplungen im Erdsystem eine herausragende Rolle spielen. Wir setzen sie in den Kontext einer modernen Erdsystemwissenschaft.

3.1 Dynamik der tiefen Erde und ihre Verbindung mit der Erdoberfläche

Unsere immer umfangreicheren Beobachtungsmöglichkeiten geben Aufschluss darüber, wie eng die zugrunde liegenden Vorgänge in der tiefen Erde miteinander und mit den Vorgängen auf der Erdoberfläche in Verbindung stehen. Die Bewegung der Kontinentalplatten ist durch die thermischen und mechanischen Eigenschaften der festen Erde selbstorganisiert, verursacht gleichzeitig aber auch Rückkopplungen mit der Erdoberfläche, die das globale Klima und geochemische Kreisläufe über die gesamte Erdgeschichte hinweg beeinflusst und stabilisiert haben. Was wir brauchen, sind neuartige, vollquantitative Erdmodelle, die die Wissenschaft komplexer Systeme einbeziehen, die auf Echtzeit-Erdbeobachtungen und Deep Learning zur Analyse großer Datenmengen, auf Experimenten mit Erdmaterialien und auf einer verstärkten Entschlüsselung gekoppelter Prozesse in Natur und Labor beruhen.

Stand der Wissenschaft

Vor nur 50 Millionen Jahren – einer kurzen Zeitspanne angesichts von 4.570 Millionen Jahren Erdgeschichte – sah unser Planet noch ganz anders aus. Der Atlantik war schmal, ein großer Ozean trennte Afrika von Eurasien, und die Himalaya-Tibet-Region begann sich zur heute größten Hochebene zu erheben. Die Erde war im Durchschnitt 6 °C bis 8 °C wärmer als heute, es gab kein Eis an den Polen, und andere Tier- und Pflanzenarten bewohnten unsere Welt. Die tiefgreifenden Veränderungen, die seither stattgefunden haben – einschließlich der Evolution des Menschen –, verdanken wir den Kräften des Erdinneren, vom Kern bis zu den Kontinentalplattenbewegungen.

Bereits im Jahr 1915 stellte Alfred Wegener die Hypothese auf, dass sich die Kontinente bewegen. Doch erst die während des Zweiten Weltkriegs beginnenden technologischen Fortschritte lösten die Plattentektonik-Revolution der 1960er-Jahre aus. Sonarsysteme lieferten Daten, mit denen die Meeresböden detailliert kartiert werden konnten, Seismologinnen und Seismologen ermittelten abtauchende Plattengrenzen anhand der Lage von Erdbeben, Fortschritte in der radiometrischen Datierung bestätigten das junge Alter des Meeresbodens im Vergleich zum hohen Alter der Kontinente, und Geophysikerinnen und -physiker erkannten, dass die wechselnde Magnetisierung in Gesteinen vom Meeresboden bedeutete, dass an den mittelozeanischen Rücken fortwährend neue ozeanische Kruste entsteht und durch Subduktion in den Mantel an konvergenten Plattengrenzen „recycelt“ wird. Dank der Theorie der Plattentektonik betrachten wir unseren Planeten heute als dynamisches System sich bewegender Platten auf einem konvektierenden Mantel (Abb. 5). Die Verteilungsmuster von Erdbeben und Vulkanen, die

Hebung von Gebirgsketten und die Lage von Mineralvorkommen und fossilen Brennstoffen stehen allesamt mit den inneren Kräften unseres Planeten in Zusammenhang. Diese Kräfte formen auch die Oberfläche der Erde und ermöglichen somit langfristige Klimastabilität, die Evolution von Leben und die Bewohnbarkeit unseres Planeten.

Beobachtung der Erddynamik

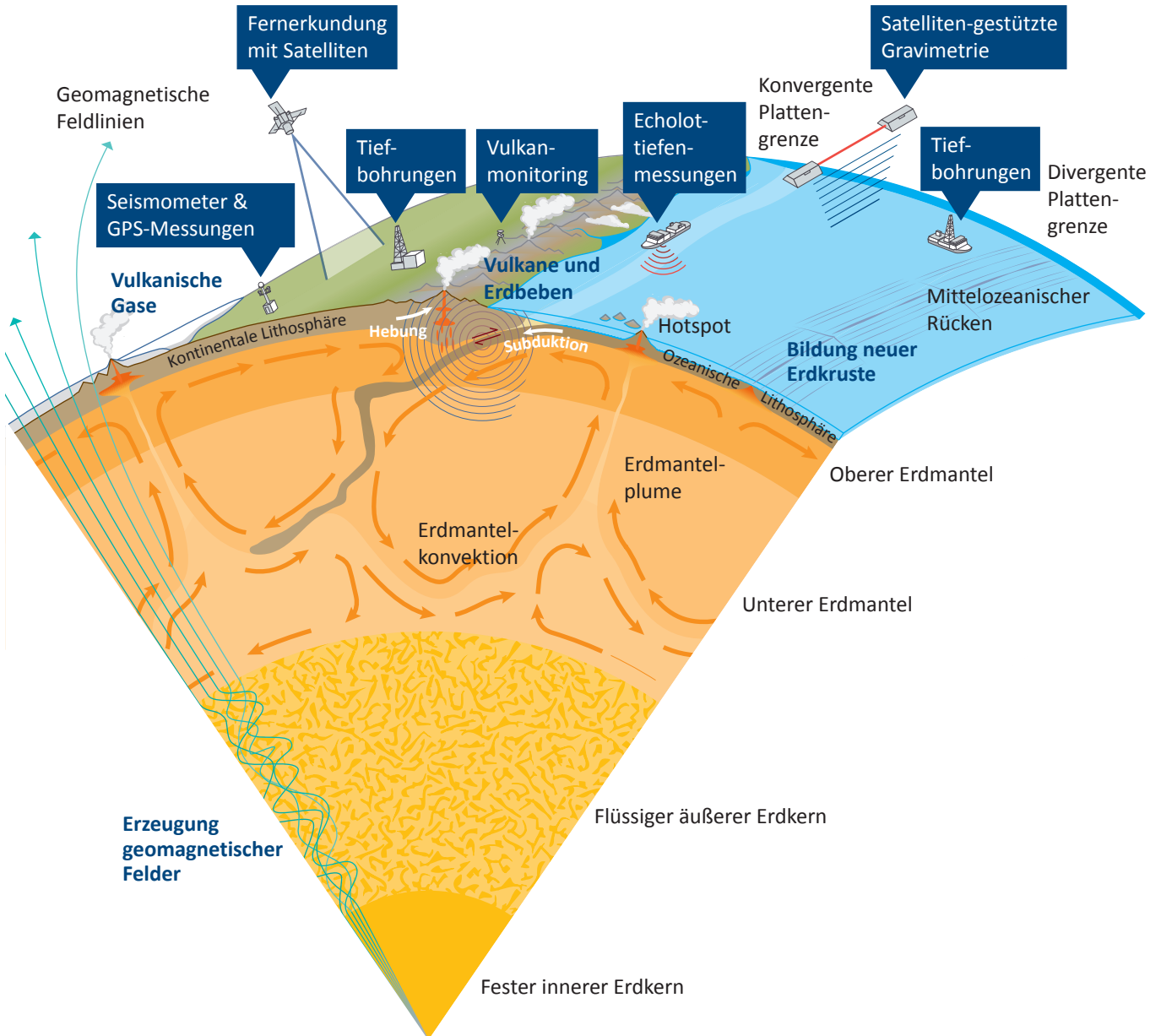


Abbildung 5. Vorgänge im tiefen Inneren der Erde – vom konvektierenden äußeren Kern, der das Magnetfeld der Erde erzeugt, bis zum konvektierenden Mantel (unterer und oberer Mantel in Orangetönen), der die Plattenbewegung antreibt – bestimmen die Oberfläche der Erde und die Evolution ihrer Habitate. Vorgänge im tiefen Inneren der Erde wie die Subduktion von Ozeanplatten, die an den mittelozeanischen Rücken gebildet werden, treiben im geologischen Zeitverlauf das Wachstum der Kontinente, die Evolution der Atmosphäre und sich verändernde Oberflächenbedingungen an. Die dadurch entstehenden langsamen bis schnellen Veränderungen an der Oberfläche und die dafür verantwortlichen Prozesse – z. B. Erdbeben, Gebirgsbildung, Erosion, Vulkanismus, relative Änderung des Meeresspiegels usw. – sind direkt zugänglich für boden- und weltraumgestützte Beobachtungstechnologien und belegen multiple Rückkopplungen zwischen den Vorgängen im tiefen Inneren der Erde, dem Klima und der sich verändernden Biosphäre. Die Dicke der ozeanischen und kontinentalen Lithosphäre (braun) und die Topographie sind nicht maßstabsgetreu dargestellt.

Durch technologische Fortschritte können wir heute die Dynamik des Erdsystems vom Kern bis zur Oberfläche mit Daten von immer höherer Auflösung und oft sogar in Echtzeit aufzeichnen. Diese Daten zeigen, wie die Subsysteme der Erde miteinander gekoppelt sind:

- 1) Die digitale Überwachung der Oberfläche, des Inneren und der Bewegungen der Erde mithilfe verschiedener Bildgebungstechniken und geophysikalischer Sensoren am Boden, in der Luft und im Weltall liefert quantitative Bilder des Erdsystems mit außergewöhnlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung.
- 2) Fortschrittliche Simulationen mittels leistungsstarker Computer und Software-Programme ermöglichen immer realitätsgetreuere Modelle der Struktur und Bewegung des konvektierenden Erdmantels und Erdkerns.
- 3) Mithilfe von Isotopen und kosmogenen Nukliden, die auf radioaktivem Zerfall basieren, bestimmen wir die „Raten und Alter“ von Erdprozessen, vom Wachstum der Kontinente über die Gebirgsbildung und der Erosion der Landoberfläche bis zur Sedimentablagerung oder dem Aufstieg von Magma.
- 4) Nanometergenaue Mineralanalysen und die experimentelle Simulation von Materialien der tiefen Erde offenbaren die Gesetze, die das Verhalten der Erdmaterialien und die Umverteilung chemischer Elemente im Erdkörper bestimmen.
- 5) Organische und anorganische geochemische Isotopensignaturen ermöglichen es, Schwankungen des Klimas und der Gesteinsverwitterung in der Erdgeschichte zu rekonstruieren, sodass abgeleitet werden kann, wie die Erdoberfläche – auf der wir leben – durch die Dynamik des Erdinneren und das gleichzeitig wirkende Klima geprägt wird.

Die Fülle an Daten und Informationen, die diese geowissenschaftlichen Ansätze und Methoden bereitstellen, ist ein Meilenstein für Prognosemöglichkeiten in vielen wichtigen Bereichen. Welche Bedeutung das hat, zeigt sich u. a. bereits bei der verbesserten Vorhersage von Naturgefahren oder der zuverlässigen Erkundung von geologischen Ressourcen. Um diese Möglichkeiten in vollem Umfang nutzen zu können, ist jedoch eine weitere Revolution im Bereich der Erddynamikwissenschaften erforderlich. Wir benötigen quantitative mechanistische Prozessmodelle als Werkzeuge zur Erkennung von Systemabhängigkeiten und Schwellen, deren Überschreiten das Erdsystem in einen neuen Zustand versetzen kann.

Klimasteuerung durch Silikatverwitterung und Karbonatbildung

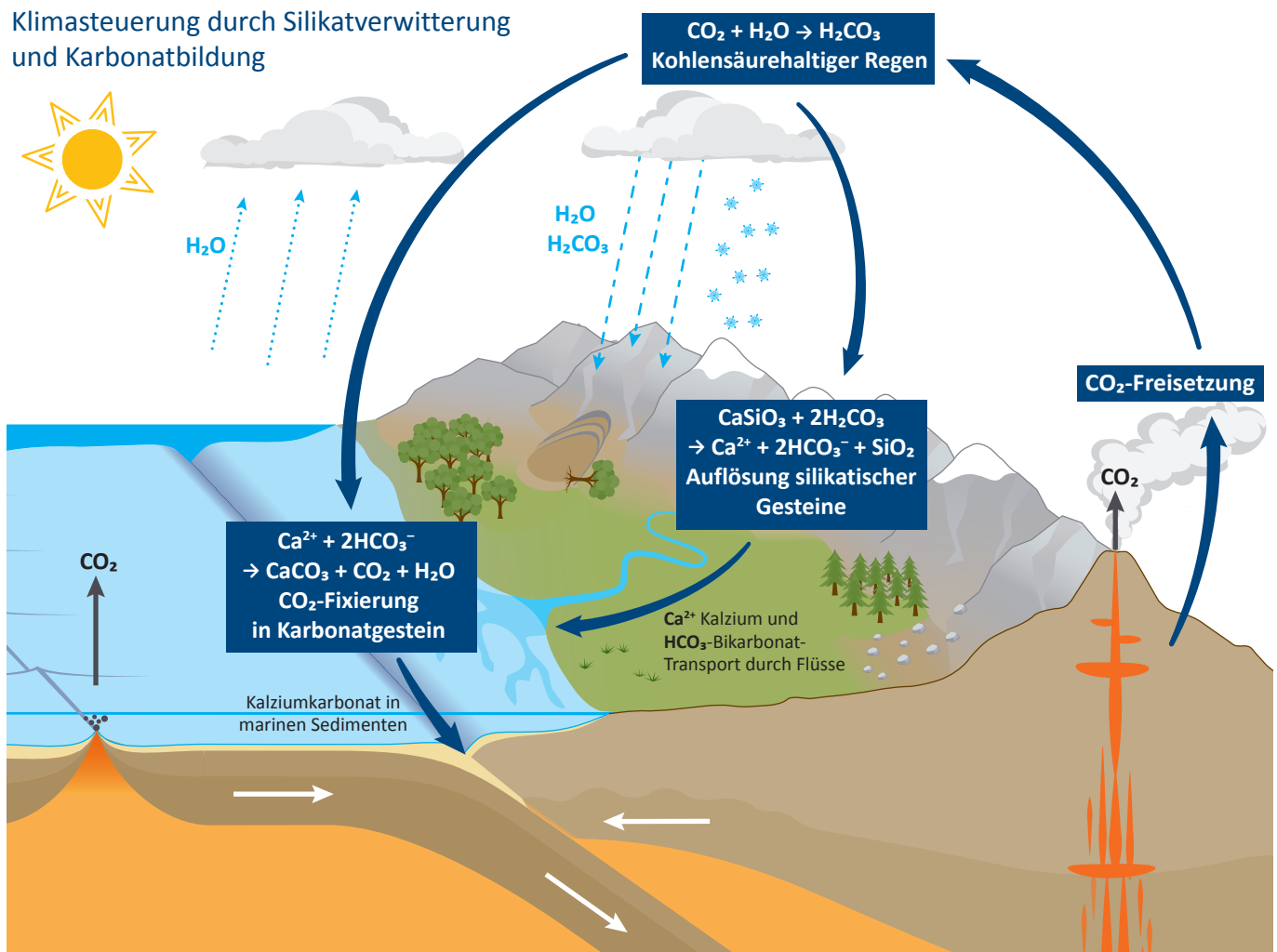


Abbildung 6. Nach der Rückkopplungshypothese der Silikatverwitterung werden die CO₂-Emissionen von Vulkanen durch die Reaktion von CO₂ mit Mineralen während der Verwitterung ausgeglichen, gefolgt von der Einlagerung in Karbonatsedimenten, die sich in flachen Meeresbecken nahe den Kontinenten bilden. Die Bildung der Topographie durch Kräfte im Erdinneren, gefolgt von Erosion und Verwitterung, steuert somit den Kohlenstoffkreislauf der Erde und die Stabilität der Oberflächentemperaturen im Laufe der Erdgeschichte auf Zeitskalen von Millionen von Jahren.

Schlüsselfragen

Einige der wichtigsten Herausforderungen und Fragen im Kontext der Dynamik der tiefen Erde sind:

Was treibt die Plattentektonik auf unserem Planeten an?

In unserem Sonnensystem ist die Erde derzeit der einzige Planet mit Plattentektonik. Die Plattentektonik ist nach aktuellem Kenntnisstand über Gesteinsplaneten die Voraussetzung für die Entwicklung höherer Lebensformen. Wie, warum und wann auf der Erde – im Gegensatz zu Planeten mit stagnierender Oberflächendynamik wie Mars oder Venus – die Plattentektonik eingesetzt hat, ist Gegenstand einer langjährigen Debatte. Wie wird Subduktion gestartet, und welche Kombination von Prozessen braucht es zur Stabilisierung der derzeitigen Geodynamik der Erde? Wie hängen die vergangenen Eishaus- und Treibhausphasen der Erdoberfläche mit größeren Veränderungen der plattentektonischen Aktivität zusammen? Vermutlich kontrolliert die bedeutende mechanische und chemische Rolle von Wasser die Materialeigenschaften des Er-

dinneren und beeinflusst letztlich auch ihre thermische Entwicklung. Tatsächlich gilt die Rolle wassergesättigter Sedimente, die in feuchten Klimazonen mobilisiert und in die Tiefseegräben transportiert werden, wo sie die Plattengrenzflächen „schmieren“ und schwächen, seit Kurzem als Schlüsselfaktor, der die Plattentektonik ermöglicht. In Bezug auf die Mantelkonvektion, die teilweise durch den Wärmeverlust des Erdkerns angetrieben wird, agieren zwei kürzlich entdeckte langlebige geophysikalische Anomalien an der Basis des unteren Mantels scheinbar als Keimzellen für aufwärtsgerichtete Mantelströme. Deren Ursprung und Komposition sind aber weiterhin unklar. Die Subduktion und mineralogische Veränderung hydratisierter Ozeanplatten spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewegung der tektonischen Platten, und subduziertes Ozeanwasser wird in Mantelmineralien eingelagert, verringert die Mantelviskosität und beeinflusst die Mantelkonvektion. Doch noch immer wissen wir nicht, wo mehr Wasser gespeichert wird – im Ozean oder im Erdmantel?

Wie instabil sind die Deformationsprozesse der Erde?

Erdbeben sind der offensichtlichste Ausdruck des mechanischen Versagens von Gesteinsmaterial. In den letzten 20 Jahren haben neue satellitengestützte Verfahren zur Entdeckung der sogenannten „langsamen Erdbeben“ geführt, die bislang unbemerkt geblieben waren. Die neuen Beobachtungen zeigten Stunden bis Jahre transientser Beschleunigung der Bewegung und Kriechvorgänge in der Lithosphäre. Heute ist es mit geodätischen und gravimetrischen Methoden möglich, damit zusammenhängende transiente, beschleunigte Kriechbewegungen an Plattenrändern in Tiefen bis zu mehreren 100 Kilometern zu erkennen. Dass Veränderungen von Gesteinseigenschaften, möglicherweise in Verbindung mit Fluiden, eine Rolle für dieses instabile Verhalten spielen, wird vermutet, ist aber im Detail ebenso unklar wie die Frage der Vorhersagbarkeit solcher Verschiebungen oder ihrer Beziehung zu Erdbeben. Eine andere Reihe von Beobachtungen zeigt uns, dass Fluide, die im Rahmen des Hydrothermal-Engineerings in Lagerstätten injiziert werden, lokale Erdbebenschwärme auslösen können, selbst in Regionen, die im Allgemeinen nicht seismisch aktiv sind. Bedeutet dies, dass die Erdkruste sich nahezu überall an der Versagensgrenze befindet? All diese Entdeckungen stellen eine Herausforderung für unser Verständnis von der Art und Weise dar, wie die äußerste Hülle der Erde, die Lithosphäre, auf Belastungsänderungen und oft geringfügige Veränderungen ihres physikalischen Zustands reagiert. Wir müssen die physikalischen Ursachen für dieses Verhalten ermitteln und herausfinden, was solche Reaktionen für die Nutzung des Untergrunds für technische Infrastrukturen, für Lagerung oder Ressourcengewinnung bedeuten.

Was löst Vulkanausbrüche aus?

Untersuchungen aktiver Vulkane aus der Luft, geophysikalische Vermessungen unterirdischer Magmareservoire und die Modellierung magmatischer Prozesse haben unser Verständnis der Architektur magmatischer Aufstiegswege und Prozesse in der Tiefe, die Vulkanismus begünstigen und auslösen, revolutioniert. Heute gehen wir davon aus, dass Eruptionen durch eine Kombination externer Auslöser sowie interner Prozesse und Rückkopplungen in den Übergangssystemen der Aggregatzustände (fest, flüssig und gasförmig) gesteuert werden. Die kritischen Schwellen, die zur Aktivierung der Aufstiegswege und zu einer Eruption führen, scheinen empfindlich gegenüber kleinsten Veränderungen der physikalisch-chemischen Bedingungen im magmatischen Reservoir zu sein. Die Herausforderung besteht darin, die Schwellenwerte in der Magmaspeicherung zu ermitteln, die Eruptionen auslösen. Dies können wir erreichen, indem wir die Zustände der einzelnen Systemkomponenten quantifizieren und feststellen, wie

sie miteinander und mit den Oberflächenbedingungen gekoppelt sind. Mit diesem Wissen wollen wir den Zeitpunkt, das Ausmaß und die Art der Eruption bestimmen und herausfinden, ob es möglich ist, geophysikalische Echtzeitsignale mit magmatischer Unruhe in der Tiefe vor dem Magmenaufstieg und der Eruption zu verbinden. Dies dient dem Ziel, Anzeichen kommender Vulkanausbrüche verlässlicher interpretieren zu können.

Welche Rückkopplungen zwischen der tiefen Erde und der Oberfläche machen unsere Erde bewohnbar?

Kräfte im Erdinneren beeinflussen die Vorgänge an der Oberfläche und damit unsere Umwelt. Beispielsweise könnte die Sauerstoffanreicherung in der Atmosphäre unseres Planeten durch Redox-Reaktionen im Erdmantel ausgelöst worden sein. Plattentektonische Vorgänge können durch Bildung neuer Habitats biologische Evolution ermöglichen, aber auch zu globalen Aussterbeereignissen beitragen. So haben z. B. Flutbasalt-Eruptionen wiederholt vor Millionen Jahren das globale Klima vermutlich abgekühlt, das Ozeanwassers chemisch verändert und damit die Bewohnbarkeit unseres Planeten beeinträchtigt. Die stärkste Wechselwirkung zwischen Plattentektonik und Klima stellt jedoch die Hypothese der Rückkopplung durch Silikatverwitterung und anschließender Karbonatbildung dar (Abb. 6): Sich hebende Gebirge bieten durch Erosion eine reaktive Landoberfläche, das Gestein beginnt zu verwittern. Die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen stabilisierten das Klima während der Erdgeschichte, indem sie das von Vulkanen und dem heißen Inneren von Gebirgsgürteln emittierte atmosphärische CO₂ ausglich. Durch die Bildung von Kalkstein im Meer wurde der atmosphärische Kohlenstoff gebunden und in geologischen Speichern über viele Millionen Jahre eingeschlossen. Dieser Mechanismus hat dazu beigetragen, dass die Oberflächentemperatur der Erde im Verlauf der Geschichte größtenteils erstaunlich stabil geblieben ist. Bedeutende Störungen dieser Rückkopplung während kurzer Phasen in der Erdgeschichte haben jedoch zu einer vereisten Erde („Snowball Earth“) oder einer „Treibhaus-Erde“ geführt. Diese Rückkopplungen, ihre Stabilität und die kritischen Schwellen im Erdsystem sind entscheidend für Klimaveränderungen über Zeitskalen von Tausenden bis Hunderttausende von Jahren. Solche Forschungsarbeiten könnten auch die Suche nach Leben auf anderen Planeten in unserem Sonnensystem und auf Exoplaneten im angrenzenden Universum unterstützen. Im Gegenzug wird die Forschung zu Exoplaneten Erkenntnisse zur besseren Definition der Grenzen der Bewohnbarkeit von Planeten liefern, was in vielerlei Hinsicht eine Suche nach einem Planeten mit Plattentektonik und Verwitterungsrückkopplung bedeutet.

Was wird benötigt?

In diesen Schlüsselfragen lassen sich mehrere wiederkehrende Themen erkennen: die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Prozessen über nahezu alle Kompartimente hinweg; die Koppelung sehr unterschiedlicher Prozesse über ein breites Spektrum von Zeitskalen und Entfernungen hinweg; schnelle und unerwartete Übergänge von vermeintlich stabilen in instabile Zustände und zurück; und deren augenscheinliche Steuerung durch die Dynamik der Materialien unserer Erde fern vom Gleichgewicht. Wie bei der Revolution der Plattentektonik erwarten wir den nächsten Wissenssprung durch unsere Fähigkeit, die Natur, die Stabilität und die Balance dieser Wechselwirkungen zu entschlüsseln. Wir müssen uns der kritischen Schwellenwerte und ihrer Skalenabhängigkeit bewusst sein und diese erkennen – sowohl zeitlich als auch räumlich durch neue Beobachtungen mit innovativen Technologien.

Neue Strategien werden Experimente zur Aufstellung von Gesetzen transienten Verhaltens über alle Skalen hinweg als Grundlage für mechanistische Modelle beinhalten. Wir benötigen hochauflösende Beobachtungszeitreihen, die auf instrumenteller Zeitskala betrachtete Prozesse (d. h. heutige Messungen) mit geologischen Archiven verknüpfen, die die Langzeitentwicklungen (z. B. über Hunderte bis Millionen von Jahren hinweg) enthalten. Um die erhebliche Zunahme hochauflösender Daten nutzen zu können, müssen wir den Bereich Data Science mit neuen Technologien wie Deep Learning voranbringen. Wo die Auflösung der Beobachtungen nicht ausreicht, um Mechanismen detailliert genug zu ergründen, wird die numerische Modellierung entscheidend sein, um Hypothesen zu entwickeln, diese zu testen und so unsere Wissenslücken zu füllen und bessere mechanistische Modelle der Erddynamik zu entwickeln.

Schlussendlich werden die Ergebnisse dieser Forschung auch die Grundlage sein für Werkzeuge und Lösungen, die es ermöglichen: 1) die Nutzung des Untergrunds sowohl zur Lagerung bzw. Speicherung von Abfällen, Materie oder Energie als auch für die sichere Gewinnung natürlicher Ressourcen nachhaltig zu optimieren, und 2) die von der Dynamik der festen Erde ausgehenden Gefahren wie z. B. Erdbeben, Vulkanausbrüche und Oberflächenmassenbewegungen zuverlässiger als bislang vorherzusagen.

Technologische Entwicklungen sind jedoch nicht alles. Diese neuen Beobachtungen müssen mit einem wachsenden Bewusstsein einhergehen, dass nahezu alle Prozesse, die das Erdsystem antreiben, eng miteinander verbunden sind und charakteristische Eigenschaften komplexer Systeme aufweisen. Daher werden Strategien und Methoden aus der Wissenschaft komplexer Systeme zentrale Elemente künftiger Studien zur tiefen Erde sein, ähnlich der Entwicklung, die die Klimaforschung vorantreibt. All dies wird revolutionieren, wie wir die Erde betrachten. Wir werden in der Lage sein zu dokumentieren, wie sich der Planet als Reaktion auf geologische Prozesse entwickelt hat und wie Prozesse in der Tiefe der Erde die Erdoberfläche formen. Vor allem aber werden wir die Auswirkungen menschlichen Handelns auf diese Systeme entschlüsseln.

3.2 Koevolution von Erde und Leben

Das Leben auf der Erde und ihre Atmosphäre und Hydrosphäre haben sich zeitgleich mit der Erde entwickelt. Hundert Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde vor 4,56 Milliarden Jahren waren die für die Entwicklung von Leben notwendigen Bausteine vorhanden: festes Gestein, Wasser, eine Atmosphäre und frei verfügbarer Kohlenstoff. Wie sich die ersten Organismen entwickelt und zur heutigen Biosphäre diversifiziert haben, ist ein hochaktuelles Forschungsthema. Spuren früher Lebensformen sind in den ältesten erhaltenen Gesteinen der Erde in Form von Isotopen- und Spurenelementsignaturen, molekularen Biomarkern und Mikrofossilien auffindbar. Durch die Analogie zu Befunden potenzieller Biosignaturen auf der Erde können Planetenbeobachtung und Modellierung indirekte Hinweise darauf liefern, ob auch auf anderen Planeten Leben existiert oder ob wir allein sind im Universum. Ein wichtiges Feld der Erdsystemforschung ist die „tiefe Biosphäre“ – riesige Ökosysteme, die in völliger Dunkelheit tief unter der Erdoberfläche existieren. Unser Wissen über die Beziehungen zwischen der Geosphäre und der Biosphäre ist heute der Schlüssel zur Suche nach Lösungen, die es der Erde ermöglichen, innerhalb der Grenzen der Ökosystemstabilität zu bleiben, die das menschliche Leben ermöglicht.

Stand der Wissenschaft

Die Entwicklung der festen Erde und ihrer Hydrosphäre und Atmosphäre ist eng mit der Entwicklung des Lebens verbunden (Abb. 7). Doch die inneren Kräfte, die die Erde ständig umgestalten, haben die Spuren ihrer „Geburt“ und „Kindheit“ sowie der Entstehung der ersten Organismen verborgen oder ausgelöscht. Die isotopische Datierung von Meteoriten deutet darauf hin, dass das Sonnensystem vor 4,568 Milliarden Jahren und die Erde wahrscheinlich nur 30 Millionen Jahre später entstanden sind. Durch die Kollision der Erde mit einem etwa Mars-großen Schwester-Planeten (Gaia/Theia, vor 4,530 Milliarden Jahren), die zur Entstehung des Mondes geführt hat, entstand im Inneren der Erde ein tiefer Magma-Ozean, aus dem während der Kristallisierung des Erdinneren die Atmosphäre und der Ozean ausgasen. Schnell kam es dann zur Abkühlung und zumindest teilweisen Stabilisierung einer frühen Erdkruste. Ausgehend von Zirkon-Sauerstoffisotopen-Daten war vermutlich schon vor etwa 4,4 Milliarden Jahren flüssiges Wasser vorhanden. Zweihundert Millionen Jahre nach der Entstehung des Sonnensystems waren die feste Erde, der Mond, der Ozean, eine Proto-Atmosphäre und die Kerne der ersten Kontinente vorhanden und bildeten die physikalischen und chemischen Voraussetzungen für Leben.

Der Oxidationsgrad des Erdinneren stieg nach der Abtrennung seines metallischen Eisenkerns rapide an, was ausschlaggebend war für die Entwicklung einer kohlendioxidreichen und wasserstoffarmen Atmosphäre durch vulkanische Ausgasung. Bereits vor 4 Milliarden Jahren könnte erstmals Leben entstanden sein, während oder möglicherweise sogar vor dem sogenannten „Großen Bombardement“ der Erde durch Asteroiden vor 3,8 Milliarden Jahren. Die ersten Hinweise auf Leben finden sich in Isotopen- und Spurenelementsignaturen in den ältesten erhaltenen Sedimenten. Mikrobielle Sedimentstrukturen, sogenannte Stromatolithen, und ähnlich alte organische Überreste, die die vermutlich ältesten prokaryotischen Mikrofossilien darstellen, sind die ersten direkten und eindeutigen Hinweise auf die Existenz von Leben vor etwa 3,5 Milliarden Jahren.

Die Umgebungen, in denen sich Leben entwickelt hat, wurden stark durch Sonneneinstrahlung, eine frühe Form der Plattentektonik sowie die physikalischen und chemischen Bedingungen für Austauschreaktionen zwischen Wasser und Mineralen in Gesteinen beeinflusst. Diese Bausteine waren nur auf bestimmte Umweltischen beschränkt. Fotosynthetische Mikroorganismen waren wahrscheinlich bereits seit mehr als einer Milliarde Jahren aktiv, bevor die Freisetzung von freiem Sauerstoff in die Atmosphäre schließlich dessen Bindung im Meer und in oxidierten Eisenablagerungen überstieg. Dies führte zum sogenannten „Großen Oxidationsereignis“ vor ca. 2,45 Milliarden Jahren, als sich Sauerstoff erstmals in der Atmosphäre anzureichern begann.

Ein weiterer großer Sprung in der Koevolution von Atmosphärenchemie und Leben fand vor 540 Millionen Jahren, während der sogenannten „kambrischen Explosion“ statt, als innerhalb eines kurzen Zeitraums alle grundlegenden Tierstämme in den geologischen Archiven auftauchten. Dieser Anstieg der Zahl der Tierarten könnte durch eine verstärkte Anreicherung von Sauerstoff im Meerwasser ausgelöst worden sein, die wiederum durch evolutionäre Veränderungen bei kohlenstoffbindenden Organismen entstanden sein könnte. Die steigende Sauerstoffkonzentration hatte auch Einfluss auf die Mineralogie und Geochemie der Erdoberfläche. Mehr als 95 Prozent des in der Erdgeschichte jemals durch Fotosynthese produzierten Sauerstoffs ist heute in Sedimenten und Gesteinen gebunden. Wird er durch plattentektonische Prozesse in den Erdmantel subduziert, kann er dessen physikalischen Eigenschaften verändern.

Ko-Evolution des Lebens und der Erd-Subsysteme

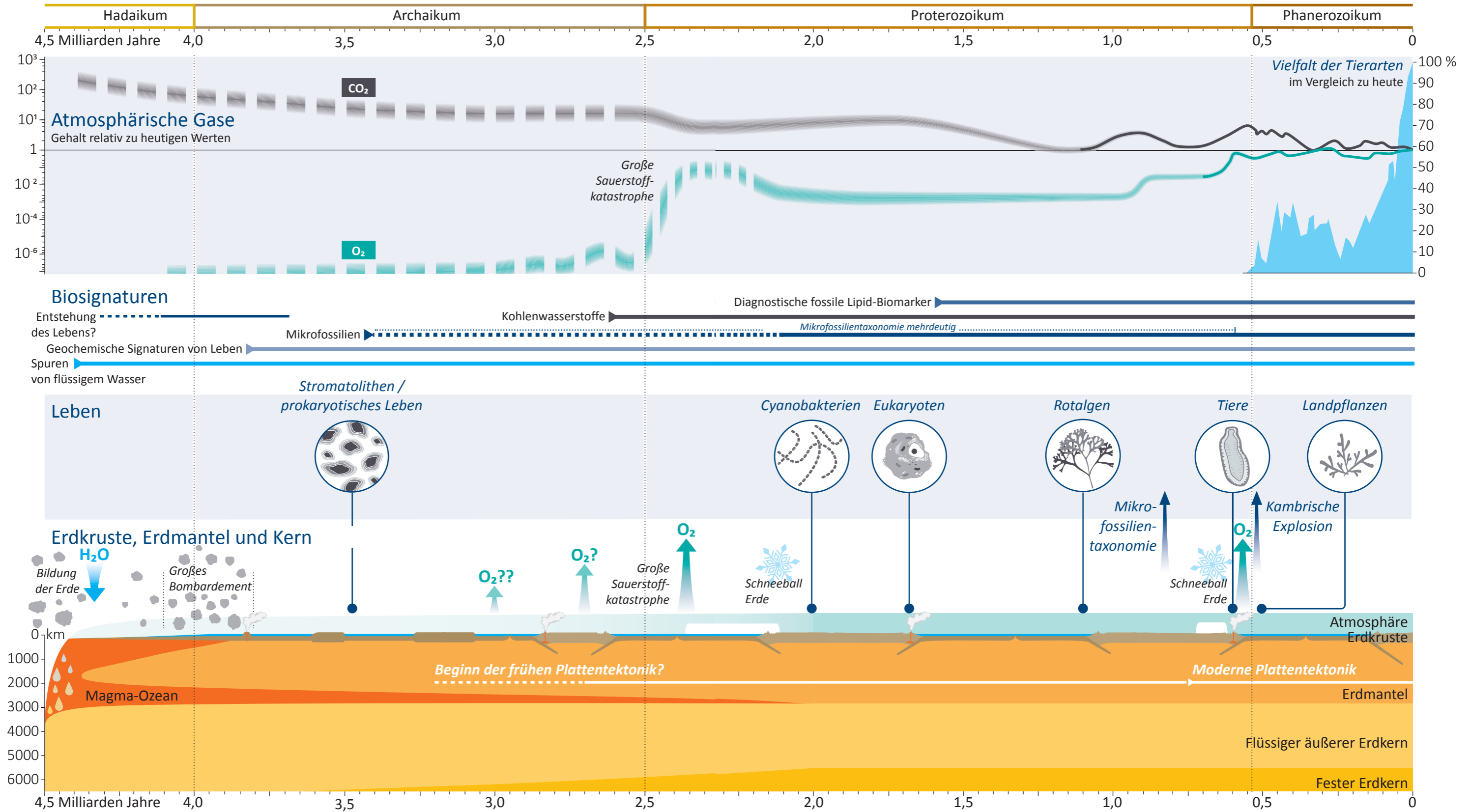


Abbildung 7. Das Leben und die feste Erde haben sich in allen Subsystemen der Erde gemeinsam und in gegenseitiger Abhängigkeit entwickelt: Der physikalische Zustand des Erdmantels (untere Grafik) ist durch Plattentektonik mit der Dynamik der Erdoberfläche und der Entwicklung von Leben verknüpft und war im zeitlichen Verlauf entscheidend für die Bestimmung und Regulierung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre (obere Grafik). Organismen haben durch Photosynthese Sauerstoff gebildet und dadurch atmosphärisches CO₂ in organische Materie umgewandelt, die sich im

Sediment abgelagert hat. Lebensformen haben also in Kombination mit der Rückkopplung der Silikatverwitterung, die wiederum durch Plattentektonik und Gebirgsbildung angetrieben wurde, die atmosphärische Temperatur stabilisiert. Zu sehen sind auch neue Biosignaturen, die es ermöglichen, die Evolution und Diversifikation von Organismen auf der Erde und – möglicherweise – auch auf anderen Planeten zu rekonstruieren. Quellen: Raup & Sepkoski (1982), Lyons et al. (2014), Catling & Zahnle (2020), Hallmann, GFZ, (pers. Mitteilung).

Ohne Leben würde die Erde ganz anders aussehen. Ihre Atmosphäre wäre frei von Sauerstoff. Ohne Transpiration der Pflanzen wäre der Wasserkreislauf völlig anders, mit entsprechenden Konsequenzen für das Klima und die kontinentale Erosion. Pflanzenwurzeln stabilisieren den Boden und schützen ihn vor Erosion. Dies führt zu Landformen, die sich erheblich von abiotischen Äquivalenten unterscheiden. Das Leben an Land und in den Meeren ist Bestandteil eines gewaltigen „organischen“ Kohlenstoffzyklus, über den jährlich 150 Milliarden Tonnen Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre, Pflanzen an Land und Meeresbiota ausgetauscht werden. Doch auch der „geologische“ Kohlenstoffzyklus, der Vulkanemissionen durch Verwitterung von Silikatmineralien ausgleicht und so das Erdklima stabilisiert, findet letztlich eine biologische Senke in marinen Karbonatsedimenten.

Andererseits wurde die biologische Evolution im gesamten Verlauf der Erdgeschichte stark durch die Plattentektonik beeinflusst und sogar angetrieben – durch die ständigen Veränderungen der Oberflächenbedingungen und -umgebungen.

Schlüsselfragen

Obwohl in den Geowissenschaften schon lange die Bedeutung der eng verwobenen Koevolution der tiefen Erde und des Lebens erkannt wurde, erlauben uns neue und immer empfindlichere Nachweismethoden, die Einzelheiten und die Komplexität dieser Verbindungen, deren gegenseitige Abhängigkeiten und ihre Geschichte während der Evolution der Erde immer genauer aufzuschlüsseln. Daraus ergeben sich stetig neue Fragen. Die wichtigsten Fragen in diesem Zusammenhang sind:

Wo und wie ist erstmals Leben entstanden?

Die Oberflächenumgebungen und geochemischen Kreisläufe der jungen Erde dürften sich erheblich von den heutigen unterscheiden haben. Bereits vor dem Großen Bombardement, d. h. vor ca. 4 Milliarden Jahren, könnte Leben in hydrothermalen Systemen entstanden sein. Darauf deuten Analysen mithilfe der molekularen Uhr und die Extrapolation von Erbinformationen erhaltener Biota auf Ur-Proteine indirekt hin. Über die Wege der präbiotischen organischen Synthese, die die Grundsteine für das Leben gelegt haben, wissen wir nicht viel. Die „Panspermie“-Hypothese, laut der Kometen und Meteoriten als Vehikel Leben von anderen kosmischen Orten auf die Erde transportiert haben, ist sehr umstritten. Dennoch enthalten solche extraterrestrischen Materialien bekannterweise diverse Nukleinbasen und Aminosäuren. Der genaue Prozess, wie aus chemischen Reaktionen ein selbstreplizierendes Zellsystem wurde, kann als die gemeinsame Kernfrage der Biologie und der Geowissenschaft betrachtet werden. Die Urgesteine, die möglicherweise Zeugen der Biogenese waren, auf der Erde aber nicht mehr existieren, sind auf dem Mars, auf dessen Oberfläche es früher flüssiges Wasser gegeben hat und dessen tektonisches System seit etwa 4 Milliarden Jahren ruht, noch immer vorzufinden. Wenn die Entwicklung von Leben – mit oder ohne Eintrag organischer Substanzen durch Meteorite – nicht auf die Erde beschränkt war, könnte der Mars den entscheidenden Hinweis darauf liefern, wie das Leben entstanden ist. Dies unterstreicht die besondere Relevanz der Erforschung fossiler, möglicherweise biologischer organischer Materie über unseren eigenen Planeten hinaus.

Sind wir allein im Universum?

Die Entdeckung von bisher etwa 5000 Exoplaneten (Stand Juni 2022) wirft die faszinierende Frage auf, ob auch anderswo in der Galaxie Leben existieren könnte. Die Suche nach Hinweisen auf außerirdisches Leben entwickelt sich deshalb zu einem be-

deutenden Forschungsfeld. Eine verbreitete Annahme ist, dass ein bewohnbarer Planet der Erde ähneln muss: nicht zu heiß und nicht zu kalt, sodass flüssiges Wasser bestehen kann. Dieses enge Temperaturfenster gibt es nur innerhalb einer bestimmten Distanz vom Mutterstern und auf einem Planeten, der – wie die Erde – über Plattentektonik und damit über eine Temperaturregelung durch die Silikatverwitterung verfügt, die die Temperatur der Atmosphäre stabilisiert. Astrobiologinnen und -biologen suchen nach „Bewohnbarkeit“: der optimalen Planetengröße, der idealen Entfernung zum Mutterstern und dem optimalen Planeteninneren sowie nach „indirekten Biosignaturen“ wie der Atmosphärenchemie. In unserem eigenen Sonnensystem können wir *in situ* nach Leben suchen. Ziele sind dabei der Mars und die Eismonde von Jupiter und Saturn. Auf dem Jupitermond Europa bedeckt vermutlich eine mächtige Wassereiskruste eine Schicht aus flüssigem Wasser, während ein Teil des Methans der Geysire auf dem Saturnmond Enceladus von methanbildenden Mikroorganismen, Archaea, stammen könnte. Direkte Hinweise auf die Existenz von Leben, die bei der Suche eingesetzt werden, sind beispielsweise die Wahrscheinlichkeit der Existenz von flüssigem Wasser und organischen Molekülen. Für deren Nachweis werden Methoden der Molekularbiologie, der Isotopengeochemie von Metallen und der Gasgeochemie bei *In-situ*-Messungen oder nach Probenrückführmissionen eingesetzt.

Was stabilisierte die Bedingungen auf der Erdoberfläche, sodass sich Leben entwickeln konnte?

In der frühen Erde lag die Sonneneinstrahlung lediglich bei etwa 70 Prozent des heutigen Niveaus. Überraschenderweise ist die Oberflächentemperatur unseres Planeten jedoch immer innerhalb gewisser Grenzen ähnlich der heutigen geblieben, sodass stets Temperaturbedingungen herrschten, die Wasservorkommen auf der Erdoberfläche und die Evolution von organischem Leben auf Grundlage von Proteinen ermöglichten. Dies steht im Gegensatz zu den anderen Silikatplaneten in der bewohnbaren Zone um die Sonne, Venus und Mars. Auf der jungen Erde war wahrscheinlich ein biologisch aufrechterhaltenes Methantreibhaus dafür verantwortlich, eine unkontrollierbare Vereisung der Erde zu verhindern. Heute ist der Silikatverwitterungskreislauf der temperaturregulierende Schlüsselprozess. Da das Wasser nie völlig verdampfte, war es vor Verdunstung und Verlust aus der Atmosphäre ins Weltall durch Photolyse geschützt. Doch trotz der insgesamt vorhandenen Stabilität des Erdsystems kam es in der Vergangenheit immer wieder zu massiven Destabilisierungen, die z. B. zu langanhaltenden globalen Vereisungen, wie der „Schneeball-Erde“ im späten Proterozoikum, geführt haben. Wie genau die zugehörigen Prozesse und deren Geschwindigkeiten gekoppelt sind, wie solche Destabilisierungen und Restabilisierungen der Oberflächenbedingungen der Erde von globalen Vereisungen oder den „Treibhaus“-Phasen der Kreidezeit erfolgt sind, wie sich dies auf das Leben ausgewirkt hat oder durch das Leben beeinflusst wurde, und wie die Rückkehr zu den stabileren Bedingungen der jüngeren Erdgeschichte möglich war, bleibt weiterhin rätselhaft und eine der am wenigsten geklärten Fragen der Koevolution des Systems Erde – Leben.

Wie kam es zur Diversifikation der Lebensformen?

Das Prinzip der allmählichen Veränderung von Eigenschaften ist eines der Hauptkonzepte der Evolutionstheorie und ermöglicht die Rekonstruktion phylogenetischer Stammbäume auf Grundlage von genetischen und morphologischen Merkmalen. Diese Stammbäume geben jedoch keinen Aufschluss über die absoluten Zeitintervalle zwischen den Verzweigungspunkten. Für die Bestimmung der zeitlichen Abläufe ist eine Korrelation der Verzweigungsstellen mit dem Auftreten bestimmter Fossilien mit be-

kanntem absolutem Alter erforderlich. Das komplementäre Konzept der „molekularen Uhren“ leitet zeitliche Informationen aus Unterschieden in der entsprechenden Erbinformation (DNA-Sequenz) biologischer Makromoleküle ab. Bei der vollen Ausschöpfung des Potenzials der gewaltigen Menge genomischer Daten aus geologischen Archiven werden molekulare Uhren von einer erweiterten Kalibrierung anhand von geologischen Uhren unter Einsatz von Makro-, Mikro- und Molekularfossilien profitieren. Jüngste Fortschritte in der Erforschung fossiler Lipide werden zunehmend besser „lesbare“ Daten ermöglichen. Indem wir unser Verständnis der zeitlichen Abläufe, der örtlichen Gegebenheiten und der solche Evolutionssprünge umgebenden oder bestimmenden Bedingungen verbessern, werden wir irgendwann vielleicht die zugrunde liegenden treibenden Faktoren immer komplexerer Lebensformen nachvollziehen können.

Welche Schlüsselrollen spielen Biota auf der heutigen Erde?

Leben an sich verstärkt und beschränkt Material- und Energieströme auf der Erde und verteilt auch Elemente um, z. B. durch die Bildung von karbonathaltigen Gesteinen wie Kalkstein oder Gesteinen, die reich an organischem Kohlenstoff sind. Diese Rückkopplungen sind entscheidend für die Wahrung der Grenzen, die einen sicheren Handlungsraum für die Menschheit definieren. Neue aktuelle und künftige Fragen in diesem Zusammenhang sind: 1) Welche Rolle spielt die tiefe Biosphäre im Erdsystem? Tief unter der Erdoberfläche in permanenter Dunkelheit befinden sich gewaltige und vielfältige mikrobielle Ökosysteme. Diese bisher wenig erforschte unterirdische Lebenswelt, die auch den tiefen Meeresboden und die terrestrische „Kritische Zone“ der Erde beinhaltet (Abb. 8), enthält organischen Kohlenstoff, Nährstoffe und Redox-Partner und bietet somit die Voraussetzungen für Leben. Mikrobielles Leben in den Zonen verändert diese wiederum stark, indem es Nährstoffe entzieht und Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre abgibt. 2) Wie beeinflussen Biota die Landschaftsform und -entwicklung? Pflanzen, grabende und herbivore Tiere katalysieren die Art, wie das Klima auf Landschaften übertragen wird. Die Erforschung von biophysikalischen Beziehungen und Parametern zur Beschreibung dieser Prozesse wird dabei helfen, vorherzusagen, wie solche bio-geologischen Wechselwirkungen Landformen verändern, wie ein eingeschränkter Sedimenttransport in den Ozean die Küstenlandschaften und die Versorgung von Meeresökosystemen mit Nährstoffen verändern wird, und wie sich globale Veränderungen auf die Ökosystemleistungen auswirken werden, die Landschaften für uns Menschen erbringen. 3) Leben ist ein essenzieller Faktor der Bodenbildung in der Kritischen Zone zwischen Gestein und Atmosphäre. Wie funktionieren mikrobielle, biochemische und physikalische Prozesse im Boden? Wie schnell laufen diese Prozesse ab und wie reagieren sie auf veränderte Klimabedingungen? 4) Wie wird sich der globale Wandel auf die marine Biodiversität und die Ökosystemfunktion auswirken? Faktoren wie die Versauerung der Meere, Ozeanerwärmung, Eutrophierung und Sauerstoffentzug wirken sich allesamt auf die marine Primärproduktivität, auf marine Nahrungsnetze und die mikrobielle Diversität aus. Diese langfristigen Störungen der Meeresumwelt werden möglicherweise Effekte verstärken, die in den kommenden Jahrzehnten bedeutende Auswirkungen auf die Biodiversität, auf die Nahrungsmittelversorgung und die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ haben werden.

Geologisch-biologische Wechselwirkungen in der Kritischen Zone

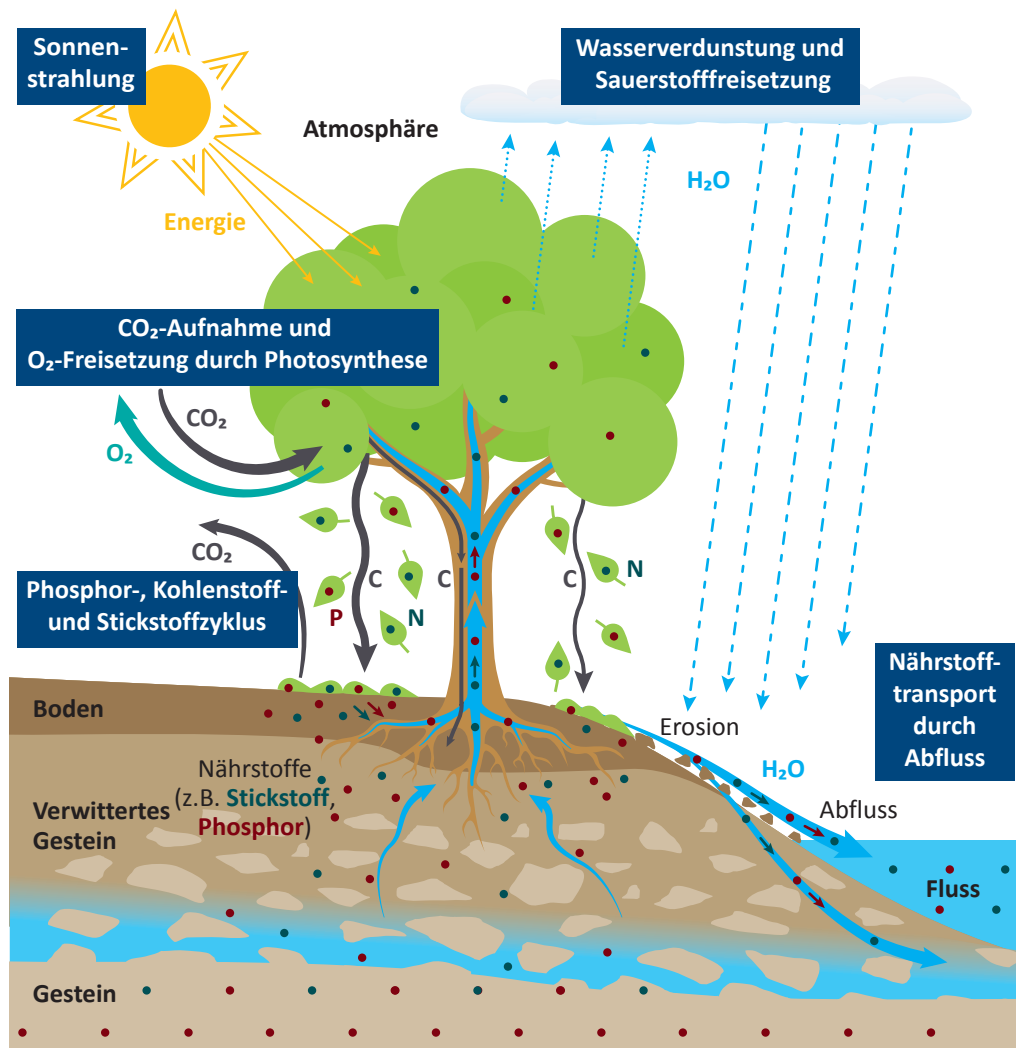


Abbildung 8. Die fragile Wechselwirkung zwischen Lebensformen und den Subsystemen der Erde stellt heute eine fundamentale Säule der Stabilisierung der Oberflächenbedingungen und der Bewohnbarkeit der Erde für Lebensformen dar. Die Abbildung zeigt ein Beispiel der terrestrischen Landoberfläche, auch die „Kritische Zone“ der Erde genannt, wo Pflanzen sich von Mineralstoffen in Gesteinen ernähren, diese zur Wiederverwertung in den Boden zurückführen und atmosphärisches CO₂ durch Fotosynthese in freien Sauerstoff und organische Materie umwandeln. Terrestrische Pflanzen stellen durch Verbrauch und Evapotranspiration einen zentralen Akteur bei der Regulierung des Wasserkreislaufs der Erde dar. Mikroben spielen bei allen Bodenvorgängen eine zentrale Rolle. Nach Uhlig & von Blanckenburg (2019).

Was wird benötigt?

Die oben genannten Beispiele unterstreichen die außergewöhnliche Verflechtung der verschiedenen biologischen und geologischen Komponenten unseres Planeten, die als ein integriertes System untersucht werden müssen. Aber auch die Erforschung der Frage, wie menschliche Aktivitäten das empfindliche Gleichgewicht zwischen den Prozessen der Erde und der Funktionsweise von Leben beeinflussen, wird viele neue Möglichkeiten für Entdeckungen eröffnen, die die Grenzen der traditionellen Disziplinen überschreiten und die Notwendigkeit einer synergistischen Integration der Disziplinen unterstreichen.

Eine solche Integration erfordert Ansätze, bei denen die durch Fernerkundung und molekularbiologische und genetische Werkzeuge gewonnenen gewaltigen Datenmengen effektiv genutzt werden. Um erforschen zu können, wie Leben in der tiefen Bio-

sphäre gedeihen kann, sind sowohl terrestrische als auch marine Bohrkampagnen für die Durchführung empfindlicher molekularbiologischer Analysen (einschließlich Omics) in Verbindung mit mineralogischen und geochemischen Untersuchungen im Nanobereich, einschließlich anorganischer und organischer Molekular- und Isotopenproxys sowie die Entwicklung reaktiver Transportmodelle zur Simulation mikrobieller Dynamiken erforderlich.

Es ist entscheidend zu verstehen, wie plattentektonische Prozesse die Umweltbedingungen auf der frühen Erde geformt haben, um eine präbiotische chemische Synthese zu ermöglichen. Das gilt auch für die Erforschung der Katalyse an Mineraloberflächen und der Geochemie früher hydrothermaler Systeme. Um Unsicherheiten hinsichtlich der biologischen Diversifikation einzuschränken, ist die Korrelation phylogenetischer Verzweigungspunkte mit dem Auftreten bestimmter morphologischer und molekularer Fossilien mit bekanntem absolutem Alter eine zentrale Aufgabe. Für die Suche nach Hinweisen auf frühes Leben auf der Erde müssen wir geochronologische Werkzeuge und Analysen der molekularen Uhr weiterentwickeln, die Geomikrobiologie extremer Umgebungen erforschen und geochemische Fingerabdrücke wie anorganische und organische molekulare Biomarker und die Fraktionierung stabiler Metallisotope, die auf den Stoffwechsel ansprechen, weiterentwickeln.

Die Suche nach Leben an anderen Orten im Sonnensystem wird letztlich die gezielte Rückführung extraterrestrischen Materials beinhalten, das wegen der winzigen Spuren und ihrer eingeschränkten biologischen Diagnostizierbarkeit außerordentlich empfindlich gegenüber Kontamination ist. Diese Ansätze werden von den Erkenntnissen profitieren, die bei der Erforschung der ältesten Kohlenwasserstoffe der Erde gewonnen wurden.

3.3 Gegenwart und Zukunft des Ozeans, der Atmosphäre und der Kryosphäre

Das eng gekoppelte Teilsystem Atmosphäre – Ozean – Kryosphäre spielt eine zentrale Rolle in der Dynamik des Erdsystems. Es reguliert die Temperatur der Erdoberfläche, die Verfügbarkeit von Süßwasser an Land und den Kohlenstoffkreislauf zwischen Atmosphäre und Ozean. Dieses Subsystem steuert nicht nur viele Prozesse, die einen bewohnbaren Planeten ermöglichen, sondern spielt auch eine entscheidende Rolle für eine nachhaltige Nahrungsmittelversorgung. Dieses System ist zwar durch Stabilität gekennzeichnet, kann aber durchaus sprunghafte Änderungen seines Zustands und der damit verbundenen Lebensbedingungen auf der Erde zeigen. Dies erfordert die Schaffung umfassender Erdbeobachtungskapazitäten und vollständig gekoppelter Erdsystemmodelle, die alle Teilsysteme der Erde einschließlich des menschlichen Bereichs abbilden. Nur gemeinsame, interdisziplinäre Anstrengungen erlauben eine Bewertung der künftigen Chancen und Risiken für die Menschheit.

Stand der Wissenschaft

Die Atmosphäre, der Ozean und die Kryosphäre der Erde stellen ein eng verflochtenes Teilsystem dar, das fundamentale Funktionen im gesamten Erdsystem steuert. Jedes Element dieser Teilsysteme reagiert seinerseits sehr empfindlich auf externe Einflüsse und ist über komplexe Rückkopplungen mit den anderen Teilen des Erdsystems verbunden (Abb. 9). Jahrzehntelange wissenschaftliche Forschung hat das Zusammenspiel dieser drei Teilsysteme beleuchtet und gezeigt, wie sie das Klima im Laufe der Erdgeschichte regulieren, selbst auf Veränderungen reagieren und wie sie sich zukünftig entwickeln.

Die **Atmosphäre** spielt eine zentrale Rolle im Wärmehaushalt der Erdoberfläche. Aufgrund der teilweisen Undurchsichtigkeit der Atmosphäre im mittleren Infrarot-Spektralbereich erwärmt sie die Erdoberfläche um etwa 33 °C im Vergleich zu einem hypothetischen Planeten mit derselben Albedo, aber ohne Atmosphäre. Diese Funktion der Atmosphäre geht im Wesentlichen auf ihre Anteile an Wasserdampf, Methan und Kohlendioxid zurück und ist der natürliche Treibhauseffekt der Erde, der sie bewohnbar macht. Die Atmosphäre erhöht durch Wolken- und Dunstbildung jedoch auch die Albedo der Erde, wodurch der Energiehaushalt der Erde zusätzlich erheblich verändert wird. Der atmosphärische Wärme- und Feuchtigkeitstransport wirkt direkt auf die Meeres- und Landbiosphäre ein – von mittleren Klimawerten und saisonalen Zyklen bis hin zu Extremereignissen wie Überflutungen und Dürren, Hitzewellen, Kältewellen sowie Wirbelstürmen und verändertem oder ausbleibendem Monsun.

Auch der **Ozean** spielt eine entscheidende Rolle bei der Regulierung des globalen Klimas und dem Klimawandel. Der Ozean dämpft den anthropogenen Temperaturanstieg in der Atmosphäre durch die Aufnahme von mehr als 90 Prozent der Wärme, die durch den verstärkten Treibhauseffekt infolge der Emission von CO₂, CH₄ und anderen Stoffen entsteht. Der Ozean absorbiert bislang auch ca. 1/4 bis 1/3 des gesamten Kohlendioxids, das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in der Atmosphäre freigesetzt wird. Der Ozean ist ein entscheidender Schrittmacher für die Klimavariabilität auf vielen zeitlichen und räumlichen Skalen – einschließlich jahrzehntelanger Megadürren, jahrhundertelanger Kälteperioden und Jahrtausendelanger globaler Eiszeit-Zyklen. Der Ozean beherbergt die größte vernetzte Biosphäre auf dem Planeten mit einer noch zu entdeckenden Artenvielfalt. Über evolutionäre Zeitskalen hinweg steht die marine Biosphäre in Wechselwirkung mit der Biosphäre an Land und den geologischen Pro-

zessen der Plattenverschiebung. Heute spielt die marine Biosphäre eine wichtige Rolle für die Nahrungsmittelsicherheit in Küstenregionen und die biologisch gesteuerten Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe. Insbesondere der tiefe Ozean ist einer der letzten noch unerforschten Bereiche unseres Planeten.

Der Einfluss erhöhter Treibhausgaskonzentrationen auf Kryosphäre und Ozean

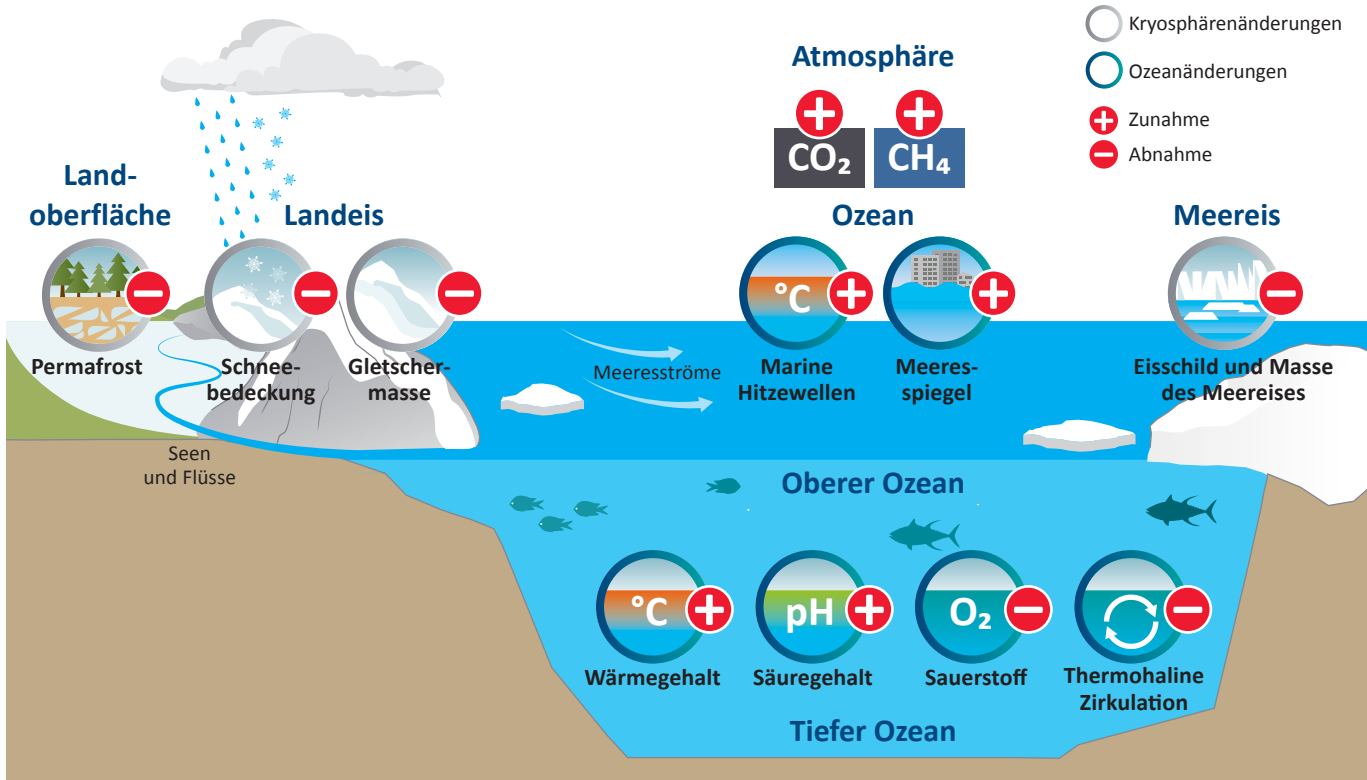


Abbildung 9. Schematische Darstellung des sich verändernden Ozean-Kryosphäre-Systems und seiner Reaktion auf veränderte Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Nach IPCC (2019).

Die Kryosphäre, vor allem die beiden polaren Eisschilde Grönlands und der Antarktis, speichern derzeit zusammen das Äquivalent von einem etwa 120 Meter hohen globalen Meeresspiegel. Aufgrund einer ungebremsten anthropogenen Erwärmung wäre davon in nur 200 Jahren ein Meeresspiegelanstieg um bis zu 7 Meter zu erwarten. Terrestrische Gletscher sorgen jährlich für die Bereitstellung von Wasserressourcen für mindestens eine Milliarde Menschen, eine Leistung, die durch rasche Gletscherschmelze zunehmend bedroht ist. Darüber hinaus beeinflusst die Kryosphäre den Wärmehaushalt der Erdoberfläche durch die sich selbst verstärkende Eis-Albedo-Rückkopplung, die in hohen Breitengraden besonders stark ist.

Heute reagiert dieses System auf die anthropogenen Treibhausgasemissionen und die daraus resultierende globale Erwärmung sowie auf andere großräumige, vom Menschen verursachte Veränderungen wie Landnutzung und die Einbringung einer Vielzahl von Schadstoffen in sämtliche Ökosysteme, die inzwischen weltweit gemessen und dokumentiert worden ist. Aufgrund des durch den Menschen verursachten Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre bewegt sich dieses gekoppelte System auf einen neuen Zustand zu, mit weitgehend unbekannt regionalen und globalen Auswirkungen, Veränderungen in der Verfügbarkeit grundlegender Ressourcen

wie Süßwasser und Störungen der Gesundheit der Ökosysteme und deren für den Menschen lebensnotwendigen Dienstleistungen. Kurz gesagt, diese weitreichenden Veränderungen in der Kryosphäre bedrohen die Bewohnbarkeit unseres Planeten für unsere hochentwickelte menschliche Zivilisation.

Mit der anthropogenen Erwärmung der Atmosphäre und der Ozeane haben die schneebedeckte Fläche und das Eisvolumen der Erde abgenommen. Der Klimawandel hat zu einem Anstieg der atmosphärischen Temperaturen und des Wärmehalts der Ozeane und damit zum Anstieg des Meeresspiegels, zu Hitzewellen im Meer, zur Korallenbleiche und zu einem dramatischen Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde auf Grönland und der Antarktis geführt. Weitere indirekte Auswirkungen des Klimawandels sind wachsende Sauerstoffminimumzonen in tieferen Ozeanschichten. Außerdem wird erwartet, dass sich die globale Umwälzbewegung des Ozeans, die thermohaline Zirkulation, in Zukunft verlangsamen wird. Während die globale Erwärmung den Wasserkreislauf insgesamt beschleunigen dürfte, werden die Niederschläge in vielen Regionen vermutlich deutlich seltener werden und in ihrer Menge abnehmen, während sie in anderen Regionen zunehmen. Veränderungen in beide Richtungen stellen lokal und regional die Bevölkerung der Erde vor erhebliche Anpassungsprobleme. Mit dem sich ändernden Klima erwarten wir auch Veränderungen beim Wetter, einhergehend mit einer größeren Häufigkeit von Extremereignissen wie Stürmen, Hitzewellen, Überschwemmungen und Dürren. Um deren Auswirkungen auf unsere Zivilisation abzumildern, müssen wir vorhersagen können, wie sich die Häufigkeit und Stärke dieser Ereignisse im Zuge des Klimawandels entwickeln wird. Wir müssen die Extremwetterprognosen verbessern und ableiten, welche konkreten Anpassungsmaßnahmen und Lösungsansätze sich aus diesen Vorhersagen ergeben.

Schlüsselfragen

Die Erdsystemwissenschaft im Bereich Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre erarbeitet Szenarien und Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung von Klima und Wetterereignissen. Hierzu zählen sowohl langsame globale Klimaveränderungen als auch Prognosen zur Häufigkeit von Wetterextremereignissen und die Frage, wie nah sich einzelne Elemente des Klimasystems bereits an Kipppunkten befinden. Um hierzu Aussagen treffen zu können, nutzt die Erdsystemwissenschaft 1) Gesteins-, Eis- und Sediment-Archive der geologischen Vergangenheit, 2) vielfältige Beobachtungsdaten, die in nie gekannter Auflösung zur Vermessung und Analyse des Ozeans, der Atmosphäre und an Land gewonnen werden, und 3) hoch entwickelte Erdsystemmodelle. Zusammengefasst liefert dieses Instrumentarium der Erdsystemwissenschaft grundlegende Daten, die zur Entwicklung und Verbesserung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und zur Abmilderung seiner Entwicklung genutzt und für Entscheidungen in Politik, Verwaltung und Infrastrukturentwicklung eingesetzt werden können. In diesem Zusammenhang sind dies einige der dringendsten Fragen:

Welche Auswirkungen haben atmosphärische Spurengase und Aerosole auf das Klima?

Trotz ihres äußerst geringen Anteils (~ 0.0001 Prozent) an der Gesamtmasse der Atmosphäre haben viele Spurenbestandteile entscheidenden Einfluss auf das Verhalten der Atmosphäre. So steuern beispielsweise Ozon und freie Radikale (wie das Hydroxyl-Radikal, OH) viele Prozesse in der Atmosphäre, einschließlich ihrer Oxidationskapazität, und somit die Geschwindigkeit, mit der andere Gase wie Methan, Kohlenwasserstoffe oder Stickstoffoxide aus der Atmosphäre entfernt werden. Das Leben auf der

Erde ist äußerst empfindlich gegenüber bestimmten atmosphärischen Bestandteilen, einschließlich Ozon, Stickoxiden und Partikeln, die in Anteilen von zehn Billionsteln (parts per trillion, ppt) nahe der Oberfläche vorkommen. In städtischen Zentren finden sich diese Luftschadstoffe (und viele andere giftige Substanzen) in erhöhten Konzentrationen. Schätzungen zufolge führen die kombinierten Effekte von Luftschadstoffen weltweit zu einer Übersterblichkeit von 9 Millionen Menschen im Jahr.⁹ Eine weitere Klasse der atmosphärischen Bestandteile bilden Aerosole. Aerosolpartikel dominieren häufig die Strahlungseigenschaften der Atmosphäre, entweder direkt durch Absorption von Strahlung (z. B. durch Ruß-Aerosole) oder Reflexion (z. B. durch Sulfat-Aerosole) oder indirekt durch Beeinflussung der Nebel- und Wolkenbildung. Außerdem können Aerosole für die menschliche Gesundheit gefährlich sein.

Um zu klären, wie sich Spurengase und Aerosole auf das Klima auswirken, müssen wir die Fähigkeit entwickeln, die Selbstreinigungsfähigkeit der Atmosphäre zu quantifizieren und die Luftqualität in Bezug auf schädliche Gase und Aerosole zu analysieren. Insbesondere muss die Rolle mikrophysikalischer Prozesse im Zusammenhang mit Aerosolen und Wolken (einschließlich Eisvermehrung), der Konvektion und der Eigenschaften von Zirruswolken untersucht werden.

Eine weitere zentrale Herausforderung besteht darin, die Rolle zunehmender Mengen von Wasserdampf für den Energiehaushalt und die Dynamiken in der Atmosphäre und ihre Bedeutung für die Wechselwirkungen zwischen Stratosphäre und Troposphäre zu entschlüsseln. Zur Untersuchung der Gas- und Partikelzusammensetzung in der Atmosphäre wird heute ein großes Spektrum analytischer Verfahren angewendet, einschließlich der chemischen Ionisations-Massenspektroskopie und der optischen Spektroskopie. Besonders Letztere ermöglicht sowohl *In-situ*-Messungen als auch die Möglichkeit, die globale atmosphärische Zusammensetzung mit Fernerkundungsmethoden von Satelliten aus zu untersuchen. Fernerkundungsmethoden wie die „Multi-axis differential optical absorption spectroscopy“ oder das dreidimensionale Laserscanning ermöglichen es, die Atmosphäre routinemäßig vollständig zu erfassen. Satellitengestützte Sensoren liefern außerdem täglich globale Karten einer ganzen Reihe von atmosphärischen Spurengasen in einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer.

Neben diesen Beobachtungen werden atmosphärische Prozesse und die Dynamik der Atmosphäre auch mithilfe immer präziserer physikalischer Modelle erforscht. Diese schließen die Fluidynamik der Atmosphärenströmung, die Phasenübergänge von Wasser sowie Strahlungsprozesse wie die von kurzwelliger einfallender Strahlung und ausgehender langwelliger Wärmestrahlung, die Prozesse, die zu Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel) führen und die Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und Oberfläche (z. B. Trockendeposition von Aerosolen und Gasen) mit ein. Die Kombination von Beobachtung und Modellierung hat die Entwicklung von Zukunftsszenarien im Zuge des anthropogenen Klimawandels ermöglicht. Die heutigen Klimamodelle erlauben eine deutlich robustere Vorhersage nicht nur von globalen Klimaveränderungen, sondern auch von regionalen Veränderungen im Hinblick auf zahlreiche Parameter wie Temperatur, Niederschlag und Insolation und deren saisonale und längerfristige Entwicklung. Auch die verlässlichere Zuordnung einzelner Wetterereignisse zum Klimawandel auf Grundlage von soliden Wahrscheinlichkeitsanalysen wird damit zunehmend realisierbar. Darüber hinaus sind solche Modelle inzwischen auch zu einem

⁹ Fuller et al. (2022).

wichtigen wirtschaftlichen Werkzeug geworden, da sie die Minderung, Begrenzung und Vermeidung von Katastrophenrisiken ermöglichen.

Wie wirken sich die Aufnahme von Treibhausgasen durch den Ozean und andere Klimaveränderungen auf die biologischen und chemischen Kreisläufe im Ozean aus?

Seit der industriellen Revolution führen steigende Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre und die damit einhergehende Langwellenstrahlung zur Erwärmung des Ozeans.

In den letzten Jahrzehnten wurde als Folge davon ein erheblicher Anstieg des Wärmehalts im oberen Teil des Ozeans beobachtet, der inzwischen auch schon in den tiefsten Schichten gemessen wurde. Das Meerwasser dehnt sich aus, wenn sich der Ozean erwärmt. Dies bewirkt einen wesentlichen Anstieg des Meeresspiegels. In den letzten Jahren hat zusätzlich das beschleunigte Abschmelzen der Gletscher an Land und der beiden polaren Eisschilde dazu beigetragen, dass sich der beobachtete Anstieg des Meeresspiegels – derzeit mehr als 3 Zentimeter pro Jahrzehnt – insgesamt fast verdoppelt hat. Seit 1982 hat die globale Erwärmung auch zu einer Intensitätszunahme und einer Verdoppelung der Häufigkeit von Hitzewellen im Meer geführt. Die Erwärmung der Ozeane hat (i) zu einer Zunahme der Windstärke und der Niederschläge tropischer Wirbelstürme, (ii) zu einer Zunahme extremer Hitzewellen und (iii) in Verbindung mit dem relativen Anstieg des Meeresspiegels zu einer stärkeren Überflutung und Erosion der Küsten geführt. Hiervon sind Milliarden von Menschen betroffen, vor allem die, die an den Küsten und auf den vielen tief liegenden Inseln, insbesondere im Pazifik, leben. Höhere CO_2 -Gehalte in der Atmosphäre führen direkt zu steigenden Mengen von gelöstem CO_2 in den oberen Ozeanschichten, was wiederum eine Veränderung der Ozeanchemie mit einem Absinken des pH-Werts verursacht. Dieser Vorgang ist auch als Versauerung der Meere bekannt. Es wird geschätzt, dass der Ozean etwa 30 Prozent des gesamten CO_2 absorbiert hat, das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe seit der Industrialisierung in die Atmosphäre emittiert wurde. Darüber hinaus hat die Oberflächenerwärmung in Verbindung mit einer stärkeren Schichtung des oberen Ozeans in den letzten 50 Jahren zu einer Verringerung des im Ozean gelösten Sauerstoffs um 2 Prozent geführt.

Infolge der zahlreichen Veränderungen im Ozean haben einige marine Spezies ihre geografischen Verbreitungsgebiete und saisonalen Aktivitäten verlagert – meist in Richtung der Pole – und sich damit schon teilweise an die Ozeanerwärmung, die Verringerung der Meereisbedeckung und biogeochemische Veränderungen ihrer Habitate (wie Versauerung und Sauerstoffverlust) angepasst. Die veränderten Wechselwirkungen zwischen den Spezies haben kaskadenartige Auswirkungen auf Nahrungsnetze und die Struktur und Funktionsweise der Ökosysteme. In vielen marinen Ökosystemen haben die kombinierten Belastungen durch Klimawandel, Übernutzung, Zerstörung von Habitaten sowie die Verschmutzung zu dramatischen Veränderungen geführt, die noch nicht gut dokumentiert sind. Um die Ökosystemleistungen der Ozeane für künftige Generationen zu sichern, müssen entscheidende Maßnahmen gegen den Klimawandel ergriffen werden. Eine vorrangige Aufgabe besteht darin, zu klären, wie biogeochemische Kreisläufe – insbesondere der Kohlenstoffkreislauf – mit den Komponenten des Klimasystems interagieren und wie sie mit den Kohlenstoffsenken an Land und im Meer, der Zusammensetzung der Atmosphäre und dem Klimawandel zusammenhängen.

Wie viel mehr CO₂ zukünftig noch vom Ozean aufgenommen werden kann und ob sich die meridionale Umwälz-Zirkulation verlangsamen oder gar zum Stillstand kommen wird, ist nur unzureichend verstanden. Dazu gehört auch die Rolle, die der biologische CO₂-Abbau spielt, der aufgrund einer Reihe von gegenläufigen Prozessen ebenfalls unklar bleibt. Die Kopplung von Ozeanmodellen mit umfassenden biogeochemischen Modellen verbessert die Untersuchungen der komplexen Wechselwirkungen des Ozean-Klimasystems auf jährlichen bis tausendjährigen Zeitskalen.

Wie hoch ist der potenzielle Eisverlust über die besonders gefährdeten Eisströme in Grönland und der Antarktis?

Obwohl die Gletscher auf der ganzen Welt naturgemäß lokal und heterogen sind, ermöglichen neue Daten und Modellierungen der letzten Jahrzehnte nun eine globale Quantifizierung der Masse und ihrer Veränderungen im Laufe der Zeit. Eine Voraussetzung für diese Quantifizierung war die Einführung der Satellitenbeobachtungen in den späten 1970er-Jahren. So ergab sich nach und nach ein globaler Überblick über den Zustand und die Veränderungen der Kryosphäre. Die Satellitenaltimetrie ermöglicht heute eine genaue Beobachtung von Höhenveränderungen auf den grönländischen und antarktischen Eisschilden. Dieses Monitoring gibt Hinweise auf saisonale Veränderungen, Fluktuationen im Jahresvergleich und langjährige Entwicklungen, die mit den größeren globalen Veränderungen in Verbindung gebracht werden können. Die Laser-Interferometrie liefert Informationen über die Bewegung der großen Eisschilde im Kilometermaßstab. Die Entwicklung der Satellitengravimetrie stellt einen Durchbruch dar, der es heute erlaubt, die Veränderungen der Eisschildmasse mit beispielloser Präzision und saisonaler Auflösung aufzuzeichnen. Diese Daten sind unerlässlich, um den Meeresspiegelanstieg als Folge schmelzender Eisschilde berechnen zu können. Eine wichtige Grundlage für diese Berechnungen sind Beobachtungen an der Schnittstelle zwischen Eisschild und Ozean, wo Ozeanströmungen mit der Grundlinie der vom Kontinent auslaufenden Eisströme am Meeresboden interagieren. Durch Kombination dieser neuen Informationen mit den paläoklimatischen Rekonstruktionen aus geologischen Befunden wurde klar, dass in der Vergangenheit der Klimageschichte unseres Planeten große, irreversible und plötzliche Veränderungen aufgetreten sind. Daher muss man davon ausgehen, dass auch künftig solche schnellen Veränderungen auftreten können. Diese Beobachtungen bilden außerdem die Grundlage für ein besseres, detaillierteres Verständnis der polaren Ozeanographie. Die Wassermassen in hohen Breiten bestimmen die Eigenschaften des tiefen Ozeans und haben daher langfristige Auswirkungen auf die globale Zirkulation und Verteilung der Wassermassen global.

Da Eisschildmodellierungen heute mit einer räumlichen Auflösung im Kilometermaßstab zur Verfügung stehen, sind Simulationen in der Lage, die Dynamik der Eisströme realistisch abzubilden. Dies hat zwar die Fähigkeit verbessert, die Lage der dynamischen „Hotspots“ auf den Eisschilden zu lokalisieren, hat aber auch gezeigt, dass detailliertere Daten zur Topographie des Eisuntergrunds und bessere Kenntnisse über die Physik an der Kontaktfläche zwischen Eisschild und seinem Untergrund erforderlich sind. Die nächste Herausforderung ist die Kopplung dieser Eisschildmodelle an hochauflösende dynamische Ozeanmodelle und die Darstellung von Vorgängen unter dem Schelfeis.

Was wird benötigt?

Im Folgenden werden drei Elemente vorgeschlagen.

Wir benötigen ein fortschrittliches **Beobachtungssystem**, das Echtzeitdaten des Zustands und der Veränderungen der Atmosphäre, des Ozeans und der Kryosphäre umfassend integriert. Es würde die weltraumgestützten Ozeanbeobachtungen durch ein globales *In-situ*-Beobachtungssystem ergänzen, das die zunehmend autonomen Roboterplattformen wie passive Schwimmsonden („floater“ und „drifter“) und aktive Gleiter nutzt, um die hochpräzisen Messungen von Forschungsschiffen zu ergänzen, und den vollständigen Tiefenbereich des gesamten Ozeans abdecken. Dieses Beobachtungssystem wäre in der Lage, bei der Analyse der entstehenden großen Beobachtungsdatensätze Deep-Learning-Techniken einzusetzen. Ein solches Beobachtungssystem würde es uns ermöglichen, die Datengrundlagen zu schaffen, die für das Verständnis der Prozesse im Erdsystem, für die Bewertung der vergangenen und gegenwärtigen Zustände der Systeme und für die Entwicklung von Zukunftsszenarien erforderlich sind.

Darüber hinaus werden Beobachtungsdaten zum Erdsystem in **Modelle** integriert, um die Dynamik gekoppelter Prozesse in der Natur besser abbilden und entschlüsseln zu können. Modelle der Atmosphäre, des Ozeans und der Kryosphäre in eigenständiger und gekoppelter Form haben in den letzten Jahrzehnten rasche Fortschritte gemacht. Um jedoch das volle Potenzial dieser Modelle ausschöpfen zu können, müssen diese in vollumfänglich gekoppelte Erdsystemmodelle integriert werden, die sämtliche Subsysteme, einschließlich der menschlichen Domäne, abbilden. Für das Design und die Architektur dieser Modelle werden konzeptuelle, statistische und innovative numerische Ansätze – einschließlich „digitaler Zwillinge“, die im Folgenden noch näher beleuchtet werden – genutzt (Siehe 4.4 „Data Science“). Die Modellierung des Erdsystems erfordert auch einen Quantensprung in der Darstellung komplexer nicht-linearer physikalischer Prozesse wie der Wolkenbildung in der Atmosphäre, des Ozeanwetters einschließlich der Extreme oder der dynamischen und thermodynamischen Prozesse an der Schnittstelle zwischen Eisschild und Ozean. Ein weiterer Quantensprung ist erforderlich hinsichtlich der Auflösung dieser umfassenden Modelle mit einem Rechenaufwand, der die Kapazitäten der derzeitigen Modellierungszentren um Größenordnungen übersteigt. Um potenzielle Überraschungen im Klimasystem einschätzen zu können, bedarf es kombinierter Überwachungs- und Modellierungsanstrengungen in der Erdsystemwissenschaft.

Beobachtung, Modelle und das neue Konzept der „Digitalen Zwillingen“ der Erde spielen eine bedeutende Rolle bei der Erkundung von **Lösungsansätzen** für Probleme, die durch die zunehmende Belastung des Erdsystems durch menschliche Aktivitäten verursacht werden. Solche Interventionsmöglichkeiten sind dringend erforderlich und benötigen ein robustes Gleichgewicht zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung. Beispiele für Lösungsansätze für zentrale Probleme sind: 1) Prognosen zum regionalen und lokalen Anstieg des Meeresspiegels in den nächsten 50 bis 100 Jahren; 2) Planung von Schutz-, Rückzugs- und Umsiedlungsmöglichkeiten für bewohnte Regionen und Infrastruktur sowie Bereitstellung von Informationen zu Anpassungsmaßnahmen wie Deichen und Sandbarrieren; 3) naturbasierte Lösungen für den CO₂-Entzug aus der Atmosphäre; 4) Vorhersagemöglichkeiten für saisonale bis interdekadische Klimavariabilität unter Berücksichtigung der gesamten Erdsystemdynamiken und 5) umfassende Evaluierung der Folgen von Ingenieurstechniken und Maßnahmen im Bereich der öffentlichen Gesundheit zur Abschwächung von und Anpassung an die Folgen der globalen Erwärmung.

3.4 Klimaveränderungen in der Erdgeschichte als Fenster in die Zukunft

Bevor der Mensch anfing, Treibhausgase in die Atmosphäre zu emittieren, veränderte sich das globale Klima in den letzten 10.000 Jahren kaum. Jetzt steht das Klima der Erde möglicherweise an der Schwelle zu einem raschen Wandel und dem Überschreiten kritischer Grenzen. Die Klimageschichte der Erde zeigt zahlreiche Beispiele für stabilisierende Rückkopplungen, allmähliche Veränderungen, Überschreitungen kritischer Schwellen und Klimaschwankungen. Die detaillierte Rekonstruktion dieser Geschichte mithilfe sogenannter Klimaproxy's aus verschiedenen geologischen Archiven wird uns die Analyse ermöglichen, wie die Komponenten des Erdsystems in kritischen Klimaintervallen in der geologischen Vergangenheit interagierten. Immer bessere Analysemethoden und Proxydaten werden in Kombination mit modernen Erdsystemmodellen, Netzwerktheorien und dynamischen Systemansätzen die Unsicherheit bei Vorhersagen künftiger Klima- und globaler Umweltbedingungen verringern.

Stand der Wissenschaft

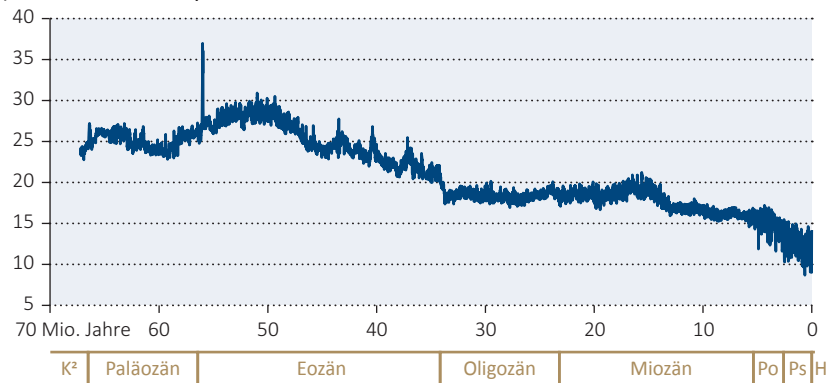
Einige Folgen von Treibhausgasemissionen und globaler Erwärmung wie der Anstieg des Meeresspiegels oder häufigere und stärkere Überflutungen und Dürren sind – innerhalb der Grenzen der Unsicherheit – mithilfe von Klimamodellen vorhersagbar. Die weitreichenderen Folgen, die durch positive Rückkopplungen im Erdsystem oder die mögliche Überschreitung kritischer Schwellen verursacht werden könnten, sind jedoch deutlich schwerer vorherzusagen. Dies liegt an den nicht-linearen, manchmal kaskadenartigen Effekten, die komplexe Systeme wie das Klimasystem der Erde kennzeichnen. Phasen mit schnellen oder abrupten Klimaveränderungen in der Erdgeschichte liefern uns wichtige Informationen, die Aufschluss über den Ablauf und die Dynamik solcher Wechselwirkungen zwischen essenziellen Komponenten des Erdsystems geben. Aufzeichnungen vergangener Klima- und Umweltveränderungen über viele Millionen von Jahren finden sich in den vom Meeresgrund geborgenen Sedimentkernen, jüngere Abschnitte der Paläoklimaentwicklung sind in terrestrischen Archiven wie Seesedimenten und Speläothemen archiviert und (über die letzten 2,7 Millionen Jahre) in Eiskernen. In diesen Archiven der Klimageschichte werden indirekte biogene und/oder (isotopen-)geochemische Anzeiger (Proxy) analysiert, die für bestimmte Klimazustände charakteristisch sind.

Die geologischen Aufzeichnungen enthalten zwar Hinweise darauf, dass das globale Klima während der gesamten 4,5 Milliarden Jahre alten Erdgeschichte schwankte, doch die detailliertesten Beobachtungen zur Klimageschichte stammen aus dem Känozoikum, das vor etwa 66 Millionen Jahren mit einem Massenaussterben begann, die Vorherrschaft der Dinosaurier beendete und das Zeitalter der Säugetiere einläutete (Abb. 10). Im Verlauf des Känozoikums hat sich das Klima deutlich abgekühlt. Noch im frühen Känozoikum gab es selbst an den Polen noch Laubbäume und Reptilien. Vor etwa 50 Millionen Jahren begannen sich die Pole abzukühlen, und vor 35 Millionen Jahren wurde die Antarktis rasch mit Eisschilden überdeckt, die bis heute vorhanden sind. Weltweit wichen die Wälder den Graslandschaften, was eine Veränderung der Tierwelt und schließlich das Aufkommen aufrecht gehender Primaten zur Folge hatte. Vor 2,7 Millionen Jahren begann auch in der nördlichen Hemisphäre die ausgedehnte Vergletscherung, die mit der Entwicklung von Eiszeitzyklen bedingt durch zyklische Variationen in den orbitalen Parametern der Erde zusammenfiel. Was diese Abkühlung ausgelöst hat, ist nicht bekannt. Die meisten aktuellen Erklärungsansätze beziehen sich auf eine Steigerung der Effizienz der Silikatverwitterung – ein Prozess, der CO_2 aus der

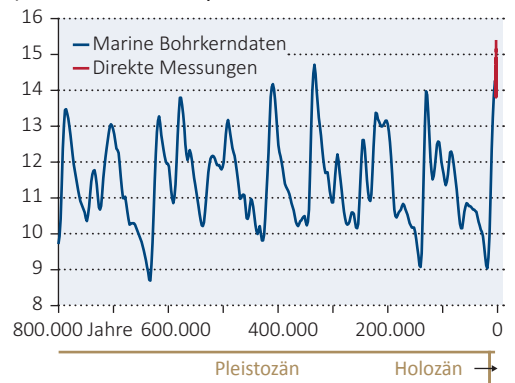
Atmosphäre entzieht und der verstärkt wurde durch die Kollision von Kontinenten und der darauffolgenden Gebirgsbildung.

Globaler Verlauf von Temperatur und CO₂

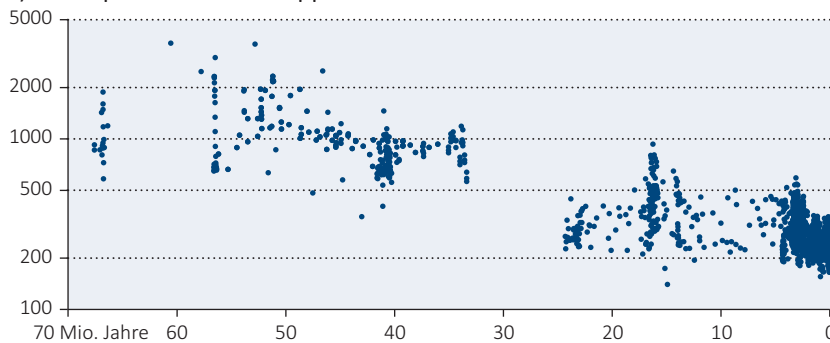
a) Oberflächentemperatur in °C



b) Oberflächentemperatur in °C



c) Atmosphärisches CO₂ in ppm



d) Atmosphärisches CO₂ in ppm

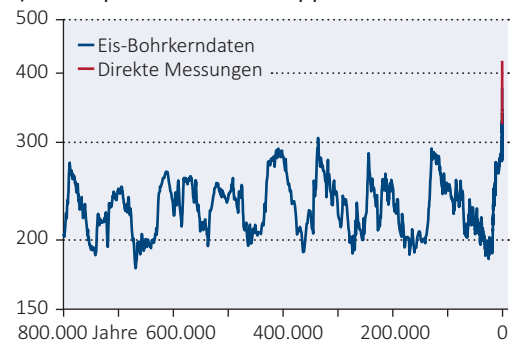


Abbildung 10. (a) Die aus Proxys rekonstruierte globale Temperaturentwicklung im Känozoikum, abgeleitet aus stabilen Sauerstoff-Isotopen in Foraminiferenschalen (letzte 70 Millionen Jahre), und (b) die glazialen Zyklen in den vergangenen 800.000 Jahren des Pleistozäns und Holozäns, abgeleitet aus stabilen Sauerstoff-Isotopen in Eiskernen. Instrumentelle direkte Messungen aus den letzten 100 Jahren sind rot dargestellt. Die heutige Erwärmung übersteigt bereits die maximale Temperatur der letzten 800.000 Jahre während der glazialen Zyklen im späten Quartär. Darunter: Rekonstruierte atmosphärische CO₂-Konzentrationen für die gleichen Zeiträume. (c) Abgeleitet aus stabilen Boro-Isotopen-Daten, gemessen in den Schalen planktischer Foraminiferen. (d) Abgeleitet aus Luftpfeinschlüssen in Eiskernen. In Rot: die in den letzten 100 Jahren direkt in der Atmosphäre gemessenen CO₂-Werte. Quelle: <https://paleo-co2.org/>, Lüthi et al. (2008), Westerhold et al. (2020), Keeling et al. (Scripps CO₂ Program Data).

Vor dem Hintergrund der allgemeinen globalen Abkühlung im Känozoikum wurden auch Phasen einer (manchmal raschen) Klimaerwärmung festgestellt. So war z. B. das Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum (PETM) eine Phase der abrupten Erwärmung, die vor 56 Millionen Jahren plötzlich aufgetreten ist und zu einem Temperaturanstieg um bis zu 9 °C gegenüber der Hintergrundtemperatur geführt hat. Diese Phase dauerte nur etwa 100.000 Jahre. Man geht davon aus, dass das PETM von der Freisetzung massiver Mengen kohlenstoffhaltiger Treibhausgase (Kohlendioxid und/oder Methan) gekennzeichnet war. Die heutigen jährlichen anthropogenen CO₂-Emissionen liegen allerdings im Vergleich noch deutlich höher.

In anderen Phasen dauerte die Erwärmung deutlich länger. Dies betrifft z. B. das sogenannte Klimaoptimum des mittleren Miozäns vor rund 15 Millionen Jahren. Als Ursache dieses Ereignisses wird eine kontinuierlich erhöhte CO₂-Freisetzung aus Vulkanen angenommen. Selbst die schnellsten dieser natürlichen Anstiege des atmosphärischen

CO₂ waren im Vergleich zu den heutigen, rapide anwachsenden CO₂-Emissionen durch fossile Brennstoffe immer noch langsam und moderat. Und doch sind deren tiefgreifende Auswirkungen auf das Klima unverkennbar in den geologischen Aufzeichnungen dokumentiert.

Während des Känozoikums hat das Erdsystem mehrmals Schwellenwerte erreicht und überschritten, die einen neuen Klimazustand einleiteten. Die Vergletscherung der Antarktis und der Kontinente der nördlichen Hemisphäre vor 35 bzw. 2,7 Millionen Jahren gehören zu den zahlreichen Anzeichen dafür, dass das Erdklima Schwellen überschreiten kann, die zu dramatischen und plötzlichen globalen Umweltveränderungen führen. Die Eiszeitzyklen der letzten 2,7 Millionen Jahre, die durch die zu- und abnehmende Vergletscherung der nördlichen Hemisphäre (Eiszeiten und Zwischeneiszeiten) gekennzeichnet sind, zeigen die Bedeutung verstärkender Rückkopplungen im Klimasystem. Zyklische Veränderungen der orbitalen Parameter der Erde sind eindeutig die Auslöser dieser Eiszeitzyklen, obwohl orbitale Veränderungen selbst nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die Intensität der Wärmeeinstrahlung auf die Erde haben. Daher müssen die orbitalen Zyklen sensible interne Rückkopplungen im Klimasystem der Erde bewirken, damit diese geringfügigen orbitalen Effekte die beobachteten dramatischen Veränderungen des Klimas und die Verbreitung des Landeises hervorrufen. Zwei zentrale Rückkopplungen sind das Reflexionsvermögen (Albedo) der Erdoberfläche, beeinflusst durch Eis- bzw. Schneebedeckung und Veränderungen der Landvegetation, sowie die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre, gesteuert durch die CO₂-Speicherung in den Tiefen des Ozeans. Beide Rückkopplungen reagieren ausreichend schnell und spielen somit bei der durch den Menschen fortwährend verursachten Erwärmung eine Rolle. Unsere Fähigkeit, das Verhalten dieser Rückkopplungen in der Vergangenheit zu rekonstruieren, ist wichtig für Vorhersagen zur Zukunft des Klimas. Denn in der Vergangenheit der Erde gab es mehrere Beispiele für Erdsystemkomponenten, bei denen durch geringe Einflüsse verstärkende Rückkopplungen ausgelöst wurden, die zu abrupten und möglicherweise irreversiblen Veränderungen geführt haben, nachdem eine kritische Schwelle der Klimaantriebe überschritten wurde. Mögliche Kandidaten für diese sogenannten Kippelemente, die das globale Klima in der Zukunft erheblich stören könnten, sind die Stabilität der Polareisschilde, die globale thermohaline Ozeanzirkulation und große Biosphärenkomponenten wie der Amazonas-Regenwald (Abb. 11).

Im Rahmen der Erdsystemwissenschaften kommt der genauen Rekonstruktion der oben geschilderten Klimainstabilitäten der Vergangenheit mitsamt ihren Rückkopplungen und eventuellen Kippunkten eine Schlüsselrolle zu: So lassen sich aus diesen Daten Hypothesen für die Entwicklung komplexer Klimasystemmodelle ableiten, deren Ziel wiederum die Abschätzung der Klimatrajektorien der Zukunft ist. Zugleich können hochaufgelöste Daten der Vergangenheit dazu dienen, die Zuverlässigkeit von Klimamodellen zu testen, also inwieweit sie a) bekannte vergangene Ereignisse oder auch b) die Gegenwart aus Daten der Vergangenheit korrekt prognostizieren können. Auch wenn die Erdsystemwissenschaft stark von den wachsenden Möglichkeiten dieser Modellentwicklung und der zunehmenden Menge und Qualität der Proxydaten aus geologischen Archiven zur Rekonstruktion der Klimageschichte der Vergangenheit profitiert, bleiben dennoch weiterhin Unsicherheiten. Diese betreffen unter anderem die Nähe des Erdsystems zu den jeweiligen Kippschwellen und – noch wichtiger – die Wechselwirkungen zwischen Kippelementen, die möglicherweise zu Kippkaskaden bzw. sogenannten „Dominoeffekten“ führen könnten.

Schlüsselfragen

Was trieb Veränderungen im Känozoischen Klima an?

Können wir die Klimazustände des Känozoikums und die Übergänge zwischen Zuständen mit dem, was wir aus den geologischen Archiven über die Klimaerwärmung in dieser Zeit wissen, simulieren? Rekonstruktionen des atmosphärischen CO₂ und des Klimas im Verlauf des Känozoikums stützen im Allgemeinen den Treibhauseffekt als einen der wichtigsten Prozesse, die das Klima beeinflussen. Genauer betrachtet gibt es jedoch zahlreiche Fälle, in denen CO₂- und Klimaschwankungen unabhängig voneinander auftraten. Sind diese Diskrepanzen real, und wenn ja, was bedeutet das für unser Verständnis der Klimadynamik? Unterschätzen wir die Bedeutung von Veränderungen wichtiger Komponenten des Klimasystems, z. B. Veränderungen in der Wolkendecke der Erde?

Kippelemente und globale Temperaturszenarien

Zunahme der Temperatur im Vergleich zu vor-industriellen Zeiten in °C

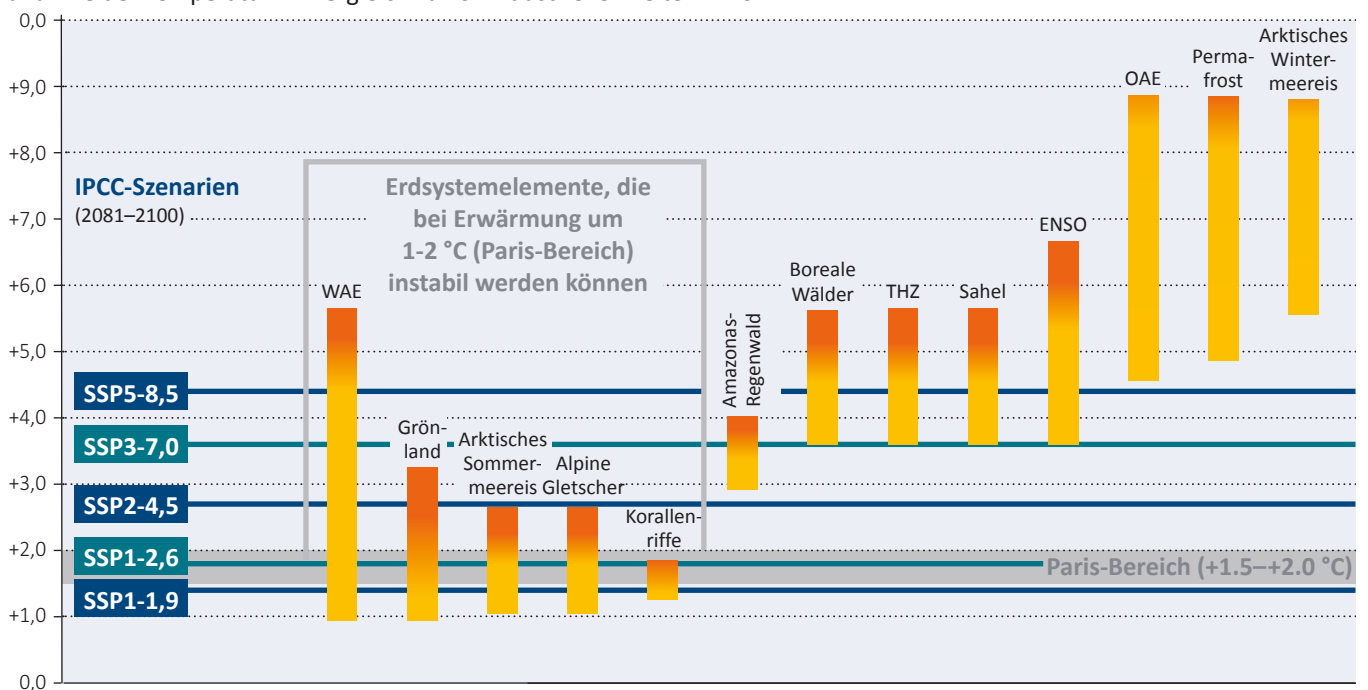


Abbildung 11. Die kritischen Schwellen für Kippunkte in Bezug auf das Pariser Klimalimit (Begrenzung der globalen Erwärmung auf einen Temperaturanstieg von unter 1,5 °C bis 2,0 °C). Bei Überschreiten dieser kritischen Schwellen könnte das gegenwärtige Klimasystem grundlegend destabilisiert werden. Innerhalb der Balken stellen unterschiedliche Farben die Wahrscheinlichkeit einer signifikanten Veränderung dar (gelb = mittlere Wahrscheinlichkeit, rot = hohe Wahrscheinlichkeit). Die sozioökonomischen IPCC-Szenarien zeigen mögliche globale Temperaturentwicklungen, angefangen von niedrigen Emissionsszenarien (SSP1) mit geringer Temperaturzunahme (1,9 °C) bis hin zu einem „Worst-Case-Szenario“ (SSP5) mit einer Zunahme um 8,5 °C. Die derzeitigen Emissionsvereinbarungen deuten darauf hin, dass die Menschheit mindestens den SSP2-Pfad einschlagen wird. Das bedeutet, dass die Erde die Eismasse der westantarktischen und grönländischen Eisschilde, des arktischen Meereises und der Berggletscher verlieren wird. Außerdem werden die Korallenriffe rapide abnehmen und möglicherweise wird der Regenwald des Amazonas seinen Kippunkt erreichen. THZ: thermohaline Zirkulation; ENSO: El Niño–Südlichen Oszillation; EAIS: Ostantarktisches Eisschild; WAIS: Westantarktisches Eisschild. Nach Schellnhuber et al. (2016).

Sind Klimazustände in der Erdgeschichte wiederholbar?

Wie stark und wie schnell wird sich die Erdatmosphäre in einer bestimmten Konfiguration von Steuermechanismen erwärmen? Eine Möglichkeit, diese Frage zu beantworten, ist die Ableitung potenzieller künftiger Zustände des Erdsystems anhand von

Klimarekonstruktionen der Vergangenheit. Könnte die künftige Erde in Szenarien mit hohen CO₂-Emissionen beispielsweise das warme Klima des frühen Känozoikums erreichen? Oder gibt es Aspekte der heutigen Erde (z. B. die Verteilung der Kontinente und Ozeane und die Vielzahl der anthropogenen Triebkräfte), die dies verhindern würden? Wenn Klimazustände wiederholbar sind, kann eine „Gleichgewichtsklimasensitivität“, d. h. der mittlere globale Oberflächentemperaturanstieg pro Verdopplung des atmosphärischen CO₂, anhand von paläoklimatischen Proxys rekonstruiert und für Prognosen der Zukunft verwendet werden. Über den langen Zeitraum, den diese Rekonstruktionen aus geologischen Archiven abdecken, können wir davon ausgehen, dass sich der Ozean und die Ökosysteme den sich ändernden Einflüssen anpassen. Im warmen Pliozän-Zeitalter (vor ca. 5,3 bis 2,6 Millionen Jahren), als der Meeresspiegel 12 bis 32 Meter höher lag als heute, war die globale mittlere Temperatur den geochemischen Isotopenproxys zufolge etwa 3 °C höher als im präindustriellen Holozän bei CO₂-Konzentrationen um 450 ppm. Daraus folgt eine langfristige Klimasensitivität – der Anstieg der mittleren globalen Temperatur pro Verdopplung des atmosphärischen CO₂ – von 3,0 °C bis 4,4 °C. Im Gegensatz dazu liegt die „effektive Klimasensitivität“ – also ohne die Berücksichtigung längerfristiger Rückkopplungen – bei 1,8 °C bis 5,6 °C pro CO₂-Verdopplung. Dies besagen die Ergebnisse dutzender Klimamodellrechnungen¹⁰ für die moderne Erde, die durch die gegenwärtige, transiente Reaktion der Ozeane auf die aktuelle Erwärmung der letzten Jahrzehnte dominiert sind.

Wo liegen die Grenzen der Kohlenstoffspeicherkapazität?

Wird die terrestrische Biosphäre weiterhin fossilen Kohlenstoff absorbieren, und wenn ja, in welchem Ausmaß und bis zu welcher maximalen Kapazität? Die Antwort hängt davon ab, wie künftige Ökosysteme auf Veränderungen der CO₂-Konzentration und Temperatur reagieren und wie sich die Niederschlagsmuster im Zuge der globalen Erwärmung verändern werden. Das Känozoikum und insbesondere die letzten 10 Millionen Jahre liefern viele Beispiele für Veränderungen der terrestrischen Biosphäre durch Wechselwirkungen mit dem Klima. Dazu zählt beispielsweise die variierende Stärke der asiatischen und afrikanischen Monsunsysteme. Ähnlich bedeutend ist die Menge an Kohlenstoff und Wärme, die vom Ozean aufgenommen wird. Man vermutet, dass die Umwälzbewegungen in den Polarmeeren des Nordatlantiks und des Südpolarmeer der Antarktis eine entscheidende Rolle für Veränderungen der Karbonatchemie und die marine Biosphäre spielen. Es gibt auch starke Anzeichen für große Veränderungen der tiefen Ozeanzirkulation im Laufe der glazialen Zyklen der letzten 2,7 Millionen Jahre, was deren Untersuchung für die Zukunft mit einer möglicherweise schnellen und starken globalen Erwärmung besonders relevant macht.

Wie können wir kritische Schwellen und Kipppunkte im Erdsystem sicher identifizieren?

Die Kombination aus geologischen Proxydaten, Systemtheorie und Erdsystemmodellierung bietet die Möglichkeit, kritische Schwellen zu erkennen und Frühwarnindikatoren zur Einschätzung des Risikos nahender Kipppunkte zu entwickeln. Jüngste Fortschritte in der Theorie der dynamischen Systeme haben beispielsweise neue Methoden hervorgebracht, die für bestimmte Teile des Klimasystems als Indikator dafür genutzt werden können, dass wir uns einem Kipppunkt nähern. Darüber hinaus hat sich die Aufnahme von Daten in Erdsystemmodelle als nützliches Instrument erwiesen, die sogenannten „Emergent Constraints“, um Unsicherheiten in Klimawandelprognosen

¹⁰ Meehl et al. (2020).

durch Ermittlung empirischer Beziehungen zwischen langfristigen Klimareaktionen in einem Modell und beobachtbaren Kennzahlen einzuschränken.

Wie wirkt sich die Wechselwirkung zwischen Kippelementen auf die Gesamtstabilität des Erdsystems aus?

Wie groß ist die Gefahr von Kippkaskaden bzw. Dominoeffekten im Erdsystem? Gibt es angesichts unseres Wissens über geophysikalische und biosphärische Rückkopplungen planetare Schwellen, jenseits derer eine Stabilisierung der mittleren globalen Temperaturen auf mittlerem Niveau nicht mehr möglich wäre? Obwohl ein solcher planetarischer Schwellenwert in der Erdgeschichte des Känozoikums ohne Beispiel wäre, könnten frühere Perioden, in denen großflächige Vulkanausbrüche erhebliche Mengen an Kohlendioxid in die Atmosphäre emittierten, Extremszenarien zum Vergleich mit den Änderungen in der Gegenwart liefern. Zu solchen Perioden gehören die Permo-Trias-Grenze vor etwa 250 Millionen Jahren oder das Neoproterozoikum, als die Bedingungen einer „Schneeball-Erde“ zwischen etwa 750 und 600 Millionen Jahren mindestens dreimal auftrat.

Was wird benötigt?

Fortschritte in der Erdsystemwissenschaft hängen entscheidend von der Verfügbarkeit relevanter Proxydaten und von der modellgestützten Interpretation der Daten ab. Kontinuierliche Verbesserungen von Proxys und Modellen werden zu Klimarekonstruktionen führen, die eine immer bessere zeitliche und räumliche Auflösung, räumliche Abdeckung und Genauigkeit aufweisen. Zu den weiteren Verbesserungen gehört die Erweiterung des Spektrums an klimarelevanten Parametern, die in den Rekonstruktionen verwendet werden, wie z. B. Temperatur, Salzgehalt, pH-Wert und Nährstoffkonzentrationen der Vergangenheit. Solche Rekonstruktionen werden datengestützte Hinweise nicht nur auf die Geschichte des Klimas, sondern auch auf dessen Steuerung, Folgen und Rückkopplungen liefern.

Das physikalische Verständnis der Klimadynamik ist eines der Ziele der Erdsystemwissenschaft. Daher müssen Proxydaten vergangener Klimaveränderungen mithilfe von Modellen des Klimasystems interpretiert werden, die auf den Grundgesetzen der Energie- und Materieströme und semiempirischen Gesetzen der Ökosystemprozesse beruhen. Im Gegenzug können Proxydaten zur Evaluierung von Erdsystemmodellen und Validierung von Klimaprognosen für die Zukunft verwendet werden. Neue Fortschritte im Bereich des Hochleistungsrechnens und der Computerwissenschaft haben das Potenzial, unsere Fähigkeit zu revolutionieren, vergangene Klima- und Umweltveränderungen zur Bewertung möglicher Zukunftsszenarien zu nutzen, um alternative Pfade des globalen menschlichen Verhaltens und wirtschaftlicher Entwicklungen zu bewerten.

In Anbetracht unseres Wissens über vergangene rasche oder abrupte Veränderungen im Erdsystem und des aktuellen beispiellosen anthropogenen Einflusses auf das Klima müssen wir dringend die Kippelemente ermitteln und die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von Kippunkten sowie das Risiko des Auslösens von Kippkaskaden in der Zukunft einschätzen. Zu diesem Zweck müssen wir neue Ansätze aus der Theorie der dynamischen Systeme, der Netzwerktheorie und des maschinellen Lernens zusammenbringen, um die Fülle an Erdsystemdaten aus Modellierungen und Rekonstruktionen auszuwerten.

3.5 Das Anthropozän

Die aktuelle Phase beispiellos schneller Veränderungen des Erdsystems, auch als die „Große Beschleunigung“ bezeichnet, kennzeichnet den Beginn des Anthropozäns. In dieser neuen geologischen Epoche stellt die Menschheit die größte Antriebskraft für Veränderungen auf der Erde dar. Der Mensch verursacht und hinterlässt Veränderungen im Erdsystem, die signifikant und messbar sind und Schwellen überschreiten könnten, die die Stabilität des Erdsystems in einem Tempo gefährden, das schneller ist, als die menschliche Zivilisation sich anpassen kann. Dennoch fehlt uns ein tieferes Verständnis der gesellschaftlichen Herausforderungen des Anthropozäns, um potenzielle Lösungen und Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen bzw. deren Vermeidung oder Minderung zu entwickeln. Daher brauchen wir eine stärkere transdisziplinäre Perspektive und neue Ansätze, um physikalische, ökologische und gesellschaftliche Schwellen zu ermitteln. Somit können wir deren Überschreiten verhindern und eine Zukunft gestalten, in der auch die nächsten Generationen prosperieren können.

Stand der Wissenschaft

Der zunehmend dominierende Einfluss menschlicher Aktivitäten auf das Erdsystem war für den Nobelpreisträger Paul Crutzen und den Biologen Eugene Stoermer 2000 Anlass, eine neue geologische Epoche, das **Anthropozän**, vorzuschlagen.¹¹ Das Klima der Erde bleibt innerhalb der Grenzen der pleistozänen Warmzeiten. Allerdings übertrifft der Einfluss durch die Menschen inzwischen in Tempo und Ausmaß die Erschütterungen und Belastungen, die durch natürliche Prozesse wie Sonneneinstrahlung, Erdbeben, Vulkanausbrüche und andere Ereignisse verursacht werden, die die klimatischen Schwankungen auf der Erde zwischen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten reguliert haben. Das Anthropozän ist damit Ausdruck neuer Belastungen und wirksamer Antriebe für das Erdsystem durch den Menschen. Es ist noch keine Manifestation der Überschreitung einer Schwelle, die das Erdsystem in einen neuen Zustand versetzen würde. Jedoch existieren Anzeichen dafür, dass die Erde einen Weg einschlägt, der uns jenseits relativ stabiler interglazialer, Holozän-ähnlicher Bedingungen führen könnte. Wenn sich die globale Erwärmung fortsetzt und die Erde ihre Klimaresilienz verliert, könnten kritische Klimaschwellen überschritten werden. Diese könnten die Erde in einen neuen Zustand versetzen und selbstverstärkende Rückkopplungen und potenzielle kaskadierende Wechselwirkungen auslösen.

Der Beginn des Anthropozäns wird in den 1950er-Jahren angesetzt, als nicht nachhaltige menschliche Aktivitäten von einem linearen zu einem exponentiellen Anstieg menschlicher Einflüsse auf das Erdsystem übergingen. Dies wird als „Große Beschleunigung“ bezeichnet (Abb. 12). Die wichtigsten Triebkräfte der Großen Beschleunigung sind das schnelle Wachstum moderner industrialisierter und auf fossilen Brennstoffen beruhender Wirtschaftssysteme in Verbindung mit einer schnell wachsenden Weltbevölkerung. Dabei profitiert jedoch nur eine Minderheit der Weltbevölkerung von den Vorteilen stetigen wirtschaftlichen Wachstums. Zu den Folgen der Großen Beschleunigung für das Erdsystem zählen unter anderem Verlust der Biodiversität, globale Entwaldung, Übernutzung globaler Fischvorkommen, Stickoxid-Emissionen und der Klimawandel. Die wohlhabenden Weltregionen mit stagnierendem Bevölkerungswachstum sind für den Großteil vergangener und gegenwärtiger Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die Bereitstellung grundlegender Funktionen, Leistungen und

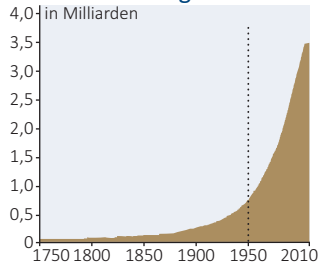
¹¹ Crutzen & Stoermer (2000).

Ressourcen der Natur, die für das Wohlergehen der globalen Gesellschaft und einer bis 2050 auf vermutlich 10 Milliarden Menschen wachsenden Erdbevölkerung notwendig sind, erfordert eine schnelle Transformation wichtiger menschlicher, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Verhaltensweisen.

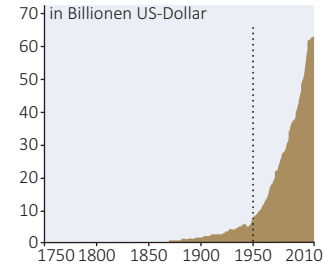
Das Holozän war bisher eine ungewöhnlich stabile interglaziale Klimaphase, in der die Menschen Landwirtschaft, Stadtkulturen und unsere modernen Gesellschaften, die auf fortschrittlichen Technologien beruhen, entwickeln konnten. Die Temperaturen auf der Erde pendelten in den letzten 10.000 Jahren mit nur ± 1 °C um die globale mittlere Oberflächentemperatur von 13 °C bis 14 °C. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die veränderte Landnutzung sind die globalen mittleren Temperaturen bereits um 1,2 °C gestiegen. Das bedeutet, dass wir nun die höchste Temperatur überschritten haben, die jemals in den letzten 10.000 Jahren seit der letzten Eiszeit erreicht wurde. Klimamodelle prognostizieren, dass, wenn die weltweiten Bemühungen zur Eindämmung des Klimawandels scheitern, der durchschnittliche Anstieg der globalen Temperatur in den nächsten Jahrzehnten 2 °C überschreiten wird. Damit käme es zu einer globalen mittleren Temperatur, die die Erde wahrscheinlich im gesamten Quartär seit 2,5 Millionen Jahren noch nicht erlebt hat. Neben dem Temperaturanstieg wurden schon jetzt auch bei vielen biogeophysikalischen Kreisläufen noch nie dagewesene Veränderungsraten beobachtet. So hat sich beispielsweise durch den Einsatz von synthetischen Düngemitteln in der Landwirtschaft die Menge an reaktivem Stickstoff in den Ökosystemen verdoppelt, wodurch sich der globale Stickstoffkreislauf verändert hat. Ein weiteres Beispiel ist die Versauerung der Meere. Der Ozean hat einen so großen Teil des CO₂-Überschusses in der Atmosphäre aus den Emissionen fossiler Brennstoffe aufgenommen, dass sein pH-Wert messbar gesunken ist und sich dadurch sein chemisches Gleichgewicht verändert hat. Die derzeitige Rate des Artensterbens deutet darauf hin, dass bereits das sechste Massenaussterben (und damit ein extensiver Rückgang der Biodiversität) in der Geschichte der Erde stattfindet. Bald werden eine Million Arten von den 8 bis 9 Millionen bekannten Arten auf der Erde ausgestorben sein, und wir haben seit 1970 durchschnittlich 68 Prozent der Wildtierbestände unseres Planeten verloren. Noch nie in der biologischen Evolution unseres Planeten wurde ein globales Massenaussterben durch eine einzelne Spezies verursacht.

Sozioökonomische Trends

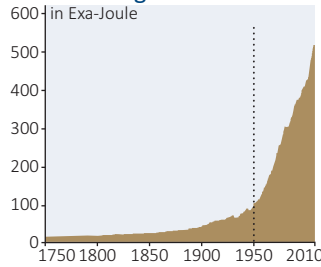
Weltbevölkerung



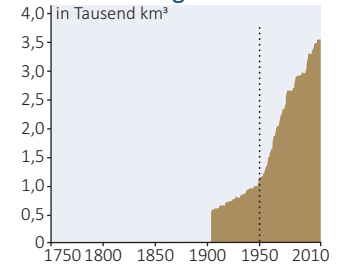
Reales BIP



Primärenergieverbrauch



Wassernutzung



Erdsystemtrends

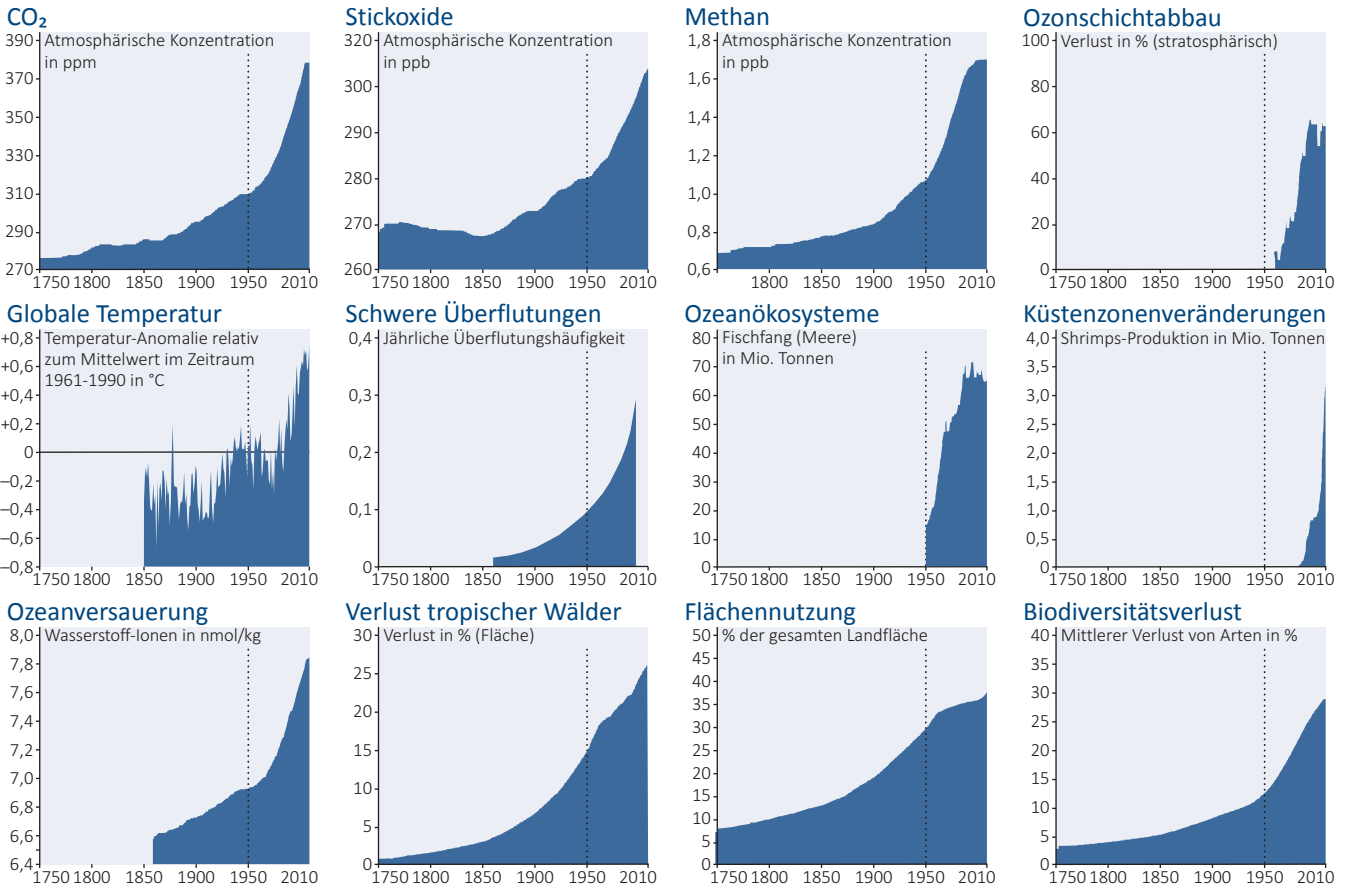


Abbildung 12. Die „Große Beschleunigung“ definiert den Beginn des Anthropozäns in den 1950er-Jahren. Sie zeigt sich in vielen Merkmalen des Erdsystems, die seitdem exponentiell über die relative Stabilität der Holozän-Epoche hinaus angestiegen sind. Auch bei den sozioökonomischen Indikatoren sind ähnliche exponentiell steigende Trends zu beobachten. Quelle: <http://www.igbp.net/globalchange/greatacceleration.4.1b8ae20512db692f2a680001630.html>

Das Konzept der **planetaren Grenzen** bietet einen wissenschaftlichen Rahmen zur Definition der biophysikalischen Systeme und Prozesse, die zur Regulierung des Zustands des Erdsystems beitragen. Für jeden dieser Prozesse versucht das Konzept, einen sicheren Zielwert oder eine sichere Grenze zu quantifizieren, so z. B. für den Wasserkreislauf, die Aerosolbelastung, das Klima, die Biodiversität und Landnutzung oder den biologischen Stickstoff-Phosphor-Kreislauf (Abb. 13). Wenn ein Teil des Erdsystems diese Grenzen überschreitet, besteht ein hohes Risiko, dass Wechselwirkungen und Rückkopplungen ausgelöst werden, die zur Überschreitung von Kippschwellen führen können. In deren Folge können dann nicht-lineare Dynamiken auftreten, die die Stabilität des Erdsystems gefährden und seine Fähigkeit, funktionierende mensch-

liche Zivilisationen zu unterstützen. Nur wenn das Erdsystem innerhalb dieser Grenzen gehalten werden kann, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Regulationssysteme der Erde weiterhin die stabilen interglazialen Bedingungen bleiben.

Planetare Grenzen

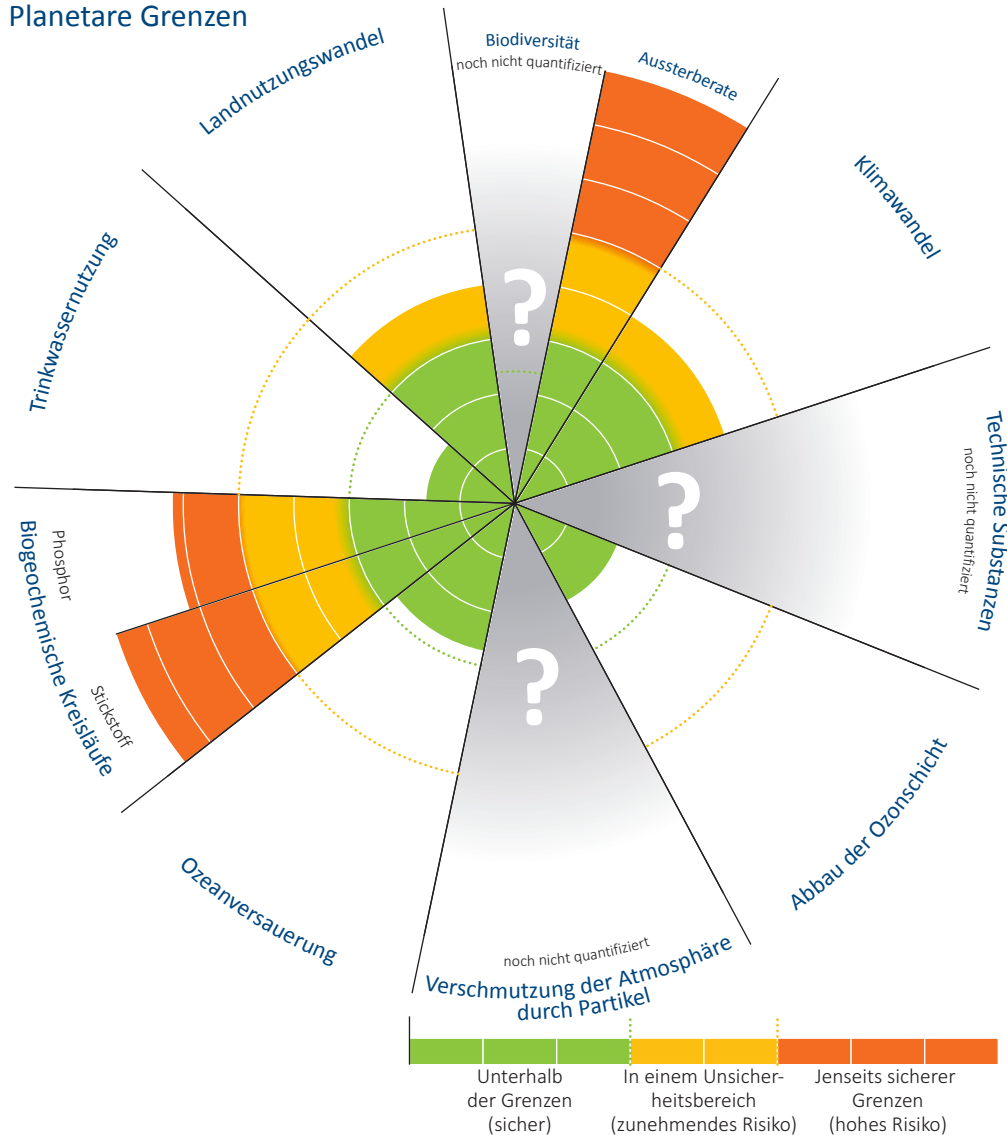


Abbildung 13. Die zehn kritischen planetaren Grenzen, die einen „sicheren Handlungsraum für den Menschen“ definieren. Eine planetare Grenze ist eine Zone, in der sich der Zustand eines Subsystems einem Kipppunkt oder einer Zone mit stark erhöhtem Risiko nähert, sodass bereits eine geringfügige Veränderung zu einer großen und möglicherweise irreversiblen Reaktion führen kann. Der grüne Bereich ist die sichere Zone. Der gelbe Bereich steht für eine unsichere Zone mit steigendem Risiko, und der rote Bereich ist die Hochrisikozone. Diese Zonen werden durch die Schwellen der Systemstabilität eines Subsystems definiert. Prozesse, für die noch keine Grenzen auf globaler Ebene quantifiziert werden können, sind als graue Keile dargestellt. Quelle: Steffen et al. (2015).

Die Überschreitung planetarer Belastbarkeitsgrenzen gefährdet nicht nur die gesellschaftliche Stabilität, die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen. Sie stellt uns auch vor neue Herausforderungen, wie der verbleibende ökologische Raum auf der Erde, darunter Kohlenstoffsinken, sauberes Trinkwasser, Land, mineralische und andere Rohstoffe und Nahrung, auf gerechte Weise unter allen Menschen heutiger und künftiger Generationen geteilt werden kann.

Schlüsselfragen

Wo liegen die kritischen Schwellenwerte der wichtigsten miteinander verbundenen Kippelemente des Erdklimas?

Nach unserem derzeitigen Kenntnisstand scheint die möglichst enge Beschränkung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C die einzige Möglichkeit zu sein, die schädlichen globalen Folgen der Erderwärmung zu minimieren. Die gekoppelte Natur des Erdsystems bedingt die nicht-lineare Klima-Dynamik, deren Schwellenverhalten durch die physikalischen, biogeochemischen und menschlichen Wechselwirkungen Kippunkte überschreiten und Kaskadeneffekte im Erdsystem auslösen kann. Wie solche Kaskaden funktionieren und bei welchem Grad des anthropogenen Einflusses diese ausgelöst werden könnten, stellt jedoch eine der größten Wissenslücken dar (s. auch Kapitel 3.3).

Wie kann ein verantwortungsvoller Umgang mit dem Erdsystem die Risiken vermeiden?

Eine grundlegende Frage betrifft den Punkt, wann lokale soziale Dynamiken zu einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Ort zur Überschreitung kritischer Schwellen in eng verbundenen sozioökologischen Systemen auch an anderen Orten der Welt führen kann. Ein Beispiel hierfür ist die Intensität des internationalen Lebensmittelhandels, der überwiegend von einigen wenigen großen Akteuren wie multinationalen Unternehmen und Finanzinvestoren in Industrieländern kontrolliert wird. Dies kann die lokale Landwirtschaft und Nahrungsmittelvielfalt schwächen und Gesellschaften stärker abhängig machen von einer geringen Anzahl von Produzenten und global gehandelter Nahrungsmittel. Dies trägt wiederum zu weniger resilienten und ungesünderen Ernährungspraktiken bei, die angesichts von klima- und wasserbedingten Extremen wie Dürren, Überflutungen und Übernutzung von Süßwasser schnell zu Problemen führen können. Die Auswirkungen sind schließlich kaskadenartig über Märkte und Regionen hinweg zu spüren und treffen letztlich lokale Agrargemeinschaften besonders hart. Der Klimawandel und die damit einhergehenden Auswirkungen auf Nahrungsmittelpreise und -sicherheit stehen – wie wir inzwischen wissen – auch mit menschlicher Migration und politischen Konflikten in Zusammenhang.

Die Aufgaben, die sich daraus ergeben, bestehen darin, 1) nachhaltige sozial-ökologische und institutionelle Verhaltensweisen und Entscheidungsfindungen zu entwickeln und miteinander in Einklang zu bringen, wie dies in den nachhaltigen Entwicklungszielen der Vereinten Nationen vorgesehen ist, 2) ein globales nachhaltiges Governance-System für die Bewertung und das Management sozial-ökologischer Risiken zu schaffen und 3) disruptive Umweltveränderungen durch technologische und sozioökologische Innovationen zu vermeiden, 4) diese Schritte auf global gerechte Weise durchführen.

Was wird benötigt?

Eine fundierte Diagnose des sozioökologischen Erdsystems sollte die Anthroposphäre berücksichtigen, folgende drei Maßnahmen sind dafür dringend erforderlich:

1) Ein tieferes Verständnis des integrierten Erdsystems erfordert bessere und neuartige Modelle und Prognosen und damit eine stärkere Rechenleistung, eine bessere Parametrisierung kritischer Prozesse und eine bessere Modellkalibrierung mit einer Fülle von Daten, die von einer großen Zahl neuer Beobachtungssysteme nahezu in Echtzeit gesammelt werden. Vollständig skalenübergreifenden Erdsystemmodelle der nächsten Generation werden durch Synthese und Assimilation von großen und vielfältigen Da-

tenmengen getestet und verbessert und erlauben so, Rückkopplungen, Schwellen und Kippunkte besser zu erkennen.

Gegenwärtig sind unsere Erdsystemmodelle noch immer physikalisch unterdeterminiert und nicht vollständig in der Lage, skalenübergreifend (lokal bis global) zu arbeiten. Das liegt hauptsächlich an der Skalenabhängigkeit bereits implementierter Prozesse (z. B. atmosphärische Konvektion und Wolken), aber auch an schlecht parametrisierten oder bisher vollständig vernachlässigten Elementen (z. B. spezifische biologische Prozesse und Funktionsvielfalt in Ökosystemen). Dieses Problem durch die Implementierung von immer mehr physikalischen Submodellen zu lösen, erhöht die Rechenkosten erheblich. Daher brauchen wir neue Generationen hybrider Erdsystemmodelle, die physikalisch basierte Kernmodule mit Werkzeugen für maschinelles Lernen kombinieren. Da maschinelles Lernen-Modelle in Bezug auf Berechnungen deutlich effizienter sein können, würde dies zu einer höheren Genauigkeit und besseren räumlichen und zeitlichen Auflösung bei der Identifizierung von Kippunkten führen. Um die maschinellen Lernen-Modelle zu optimieren, müssen wir dringend unsere derzeitigen Beobachtungsmöglichkeiten verbessern und integrieren. Neue Sensornetzwerke müssen maßstabsübergreifend, völlig autonom und heterogen sein und die derzeit getrennten globalen Sensornetzwerke (z. B. das globale meteorologische Netzwerk) durch lokalisierte Multifunktionssensornetzwerke (wie interdisziplinäre Umweltobservatorien) und Biosensornetzwerke (z. B. intelligente Biosensoren für mikroorganische Luft-, Boden- und Wasserverschmutzung) erweitert werden.

Qualitätsgeprüfte Crowdsourcing-Technologien, die Citizen-Science-Netzwerke nutzen, sind ebenfalls zu berücksichtigen. Diese Beobachtungssysteme sollen als Frühüberwachungs- und -warnsystem für die Annäherung an bevorstehende bekannte und neu entdeckte Kippunkte dienen.

2) Derzeit sind zwei Ansätze zur Abschwächung der globalen Erwärmung vorgesehen: Strahlungsmanagement und Technologien für negative CO₂-Emissionen, zusammen auch als „Geoengineering“ bezeichnet. Wir empfehlen jedoch, diesen Begriff zu vermeiden, da er die Erwartung weckt, das Erdsystem könnte vom Menschen sicher „manipuliert“ werden. Dieser Bericht unterstützt daher weder das Strahlungsmanagement, z. B. das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre, noch die Erhöhung der Albedo durch künstliche Erzeugung von Stratocumuluswolken durch Versprühen von Meerwasser hoch über dem Meer. Konkrete Gründe für diese Haltung sind die kurzfristige Wirkung solcher Maßnahmen, die unbekanntes Risiko für das Erdsystem und das moralische Risiko einer möglichen Erwartung, die Klimakrise könnte einfach durch diese Maßnahmen gelöst werden, anstatt sich auf Maßnahmen zur Emissionsminderung zu konzentrieren. Laut Prognosen des IPCC wird es der Menschheit jedoch wahrscheinlich nicht gelingen, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, wenn nicht erhebliche Mengen CO₂ (etwa 10 Gt/Jahr) aus der Atmosphäre entfernt werden.¹² Daher sollte die Forschung zu Technologien für negative CO₂-Emissionen sehr wohl mit hoher Priorität vorangetrieben werden. Hierzu gehören z. B. direkte Luftabscheidung in Verbindung mit geologischer Kohlenstofffixierung (Direct air capture linked to Geologic Carbon Capture), Biologische CO₂-Fixierung und -speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) und naturbasierte Lösungen wie die Vergrößerung natürlicher CO₂-Senken (z. B. Biokohlebildung und -ausbringung, Verbesserung der

¹² IPCC (2022).

organischen Kohlenstoffspeicherung in Böden, Verstärkung der Silikatverwitterung durch Ausbringen von Basaltpulver auf Ackerflächen, Pflanzung von Seegras). Diese Technologien müssen jedoch fortwährend auf mögliche unerwartete negative Umweltauswirkungen, ethische Probleme (z. B. zunehmende Landnutzung in tropischen Ländern für schnell wachsende Biomasse für BECCS statt für Nahrungsmittelproduktion) und ihren Energieverbrauch hin überprüft werden und sollten in ein Handelssystem mit Emissionszertifikaten eingebettet werden.

3) Große Bedeutung kommt dem Menschen als bedeutendem Akteur im Anthropozän zu. Gesellschaftliche Kippelemente, die einen schnellen positiven transformativen Wandel erzielen und die Menschen dazu bringen, nachhaltige Wege einzuschlagen, sind dazu geeignet, um die Überschreitung biogeophysikalischer Kippunkte aktiv zu vermeiden. Dagegen müssen insbesondere unerwünschte gesellschaftliche Kippelemente und -kaskaden (z. B. in Zusammenhang mit dem Einbruch gesellschaftlicher Vielseitigkeit, mit politischer Polarisierung, Konflikten usw.), die hinsichtlich weiterer Kippelemente eine Verschlechterung bewirken, ermittelt werden.

Die Identifizierung beider Arten von gesellschaftlichen Schwellen kann ein erster Schritt sein, um wesentliche gesellschaftliche Dynamiken in der Balance zu halten. Dazu gehören z. B. Bevölkerungs- und Stadtentwicklung, das Finanzsystem unter besonderer Berücksichtigung der globalen Ungleichheit und Ungerechtigkeit, die Normen und Werte des menschlichen Umweltverhaltens, einschließlich globaler Governance, sowie Umwelterziehung und Nutzung von Best-Practice-Lösungen. Um aussagekräftige Erdsystemmodelle zu ermöglichen, muss dringend ein Rahmenwerk für die Kombination von gesellschaftlichen Erdsystemmodellen (Weltmodellen) mit biogeophysikalischen Erdsystemmodellen der nächsten Generation entwickelt werden. Elemente soziokultureller Dynamiken (Einzelpersonen bis soziale Systeme) könnten mithilfe von adaptiven Multi-Agenten- und Multi-Level-Netzwerken, aber auch datengestützten maschinellen Lernen-Submodellen einbezogen werden. Zusätzlich könnten fortgeschrittene Modelle zum globalen sozioökonomischen Austausch von natürlichen Ressourcen und Energie („socioeconomic metabolism“) die Verbindung zwischen der soziokulturellen und der biogeophysikalischen Sphäre gewährleisten.

3.6 Extremereignisse, Risiken und Resilienz

Extreme Naturereignisse bedrohen lokale Bevölkerungen und Infrastrukturen. Das Auftreten und die Intensität von Stürmen, Dürren, Fluten, Überschwemmungen und Berggrutschen werden zunehmen, während sich andere Naturgefahren wie Erdbeben der Vorhersagbarkeit entziehen. Wie das Japan-Erdbeben von 2011 gezeigt hat, bewirken gekoppelte Risiken und Kaskadeneffekte in Kombination einen massiven Anstieg der Schäden. Sie verstärken außerdem die Vulnerabilität, erschweren Prognosen und behindern die Maßnahmen zur Schadensbegrenzung. Der Ausbau von Ressourcen für Beobachtungen und Datenanalysen als Grundlage für vertiefte wissenschaftliche Erkenntnisse zu diesen Naturgefahren und deren sozioökonomischen Folgen soll die Katastrophenresilienz stärken und ermöglichen Lösungen zur Gefahrenminderung für die Zukunft.

Stand der Wissenschaft

Obwohl sich die Zahl der potenziell gefährlichen Naturereignisse nicht wesentlich verändert, werden die menschlichen Gemeinschaften aufgrund der wachsenden Bevölkerungsdichte, insbesondere in städtischen Gebieten, zunehmend anfälliger für Naturkatastrophen. Dadurch nehmen die negativen Auswirkungen von Naturgefahren auf die Menschen weltweit zu (Abb. 14). Während sich der von wirtschaftlichen Verlusten betroffene Anteil des Bruttoinlandsprodukts in den letzten Jahrzehnten stabilisiert hat, gibt es zunehmend Hinweise auf eine erhebliche Zunahme der Auswirkungen von besonders katastrophalen Ereignissen im gleichen Zeitraum. Aufgrund ihrer außerordentlich geringen Wahrscheinlichkeit stehen diese sogenannten „schwarzen Schwäne“¹³ im Widerspruch zu unserer psychologischen Erwartungshaltung, die durch unsere Erfahrung über relativ kurze Zeiträume bestimmt ist. Diese seltenen Ereignisse verursachen jedoch die größten Schäden, da ihre Risikoszenarien bei Vorbereitungen und beim Infrastrukturdiesign nicht berücksichtigt werden (Abb. 15). Ein mittlerweile klassisches Beispiel dafür ist das Tohoku-Oki-Erdbeben von 2011 in Japan, das zwar erwartet worden war, aber nur als einzelnes Beben – nicht als Auslöser einer Kaskade von Ereignissen, einschließlich eines Tsunami und schwerer Unfälle in einem Kernkraftwerk. Außerdem hatte man für den Bau von Atomkraftwerken in dieser Region „nur“ mit einer maximalen Stärke von 7,9 statt der tatsächlichen Stärke von 9,0 gerechnet. Die größte zu bewältigende Herausforderung ergibt sich daraus, die folgenden zwei Eigenschaften menschlichen Handels in Einklang zu bringen: Die Menschen haben einerseits die Neigung, zukünftige Risiken zu unterschätzen. Andererseits steigt die Verwundbarkeit durch globales Bevölkerungswachstum in Verbindung mit schneller Urbanisierung wirtschaftlicher Globalisierung und der sich immer weiter entwickelnden Technosphäre. Das Sendai-Rahmenwerk der Vereinten Nationen für Katastrophenvorsorge¹⁴ benennt deshalb als zentrale Aufgaben der Erdsystemwissenschaft die Verbesserung unseres Verständnisses der Gefahren bis hin zur Verbesserung der Katastrophenvorbereitung – letztlich mit dem Ziel einer höheren Resilienz, dem gemeinsamen Nenner der Katastrophenvorsorge.

Extremwetterereignisse

Seit Beginn der Industrialisierung haben die vom Menschen verursachten Emissionen die Menge an CO₂ in der Atmosphäre um 45 Prozent erhöht und damit einen An-

¹³ Die Bezeichnung „Schwarzer Schwan“ für ein seltenes Ereignis stammt von dem Statistiker Nassim Nicholas Taleb.

¹⁴ United Nations (2015b).

stieg der Oberflächentemperatur unseres Planeten um mehr als 1 °C seit dem späten 19. Jahrhundert verursacht. Diese globale Erwärmung führt zu einer Zunahme an Extremwetterereignissen. Beispielsweise treten Rekordwerte für die mittleren Temperaturen einzelner Monate heute fünfmal häufiger auf, als es ohne die langfristige globale Erwärmung der Fall wäre. Dagegen gehen Kälteextreme insgesamt zurück, in einigen Regionen (insbesondere im nördlichen Eurasien) haben dynamische Veränderungen jedoch zu steigenden Ausbrüchen kalter Polarluft auf angrenzenden Kontinenten im Winter geführt. Auch extreme Niederschläge, die Überflutungen und Erdbeben verursachen, sowie schwere Dürren nehmen als Folge eines beschleunigten globalen Wasserkreislaufs weltweit zu.

Vorhandene Daten sind über den Beobachtungszeitraum zwar noch nicht eindeutig, stützen aber die Theorie eines starken globalen Anstiegs der Häufigkeit von Wirbelstürmen der Kategorien 4 und 5. Globale Prognosen deuten zudem aufsteigende Meeresspiegel, stärkere Stürme mit erhöhtem Risiko für die Überflutung von Küstengebieten sowie eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit heftiger Regenfälle hin. Laut IPCC sind Prognosen der Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Regionen jedoch nicht nur mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, sondern werden wahrscheinlich im Verlauf des 21. Jahrhunderts auch schwanken. Ob Dürren oder Überflutungen regional häufiger oder seltener werden, ist für die Entwicklung entsprechender Präventionsmaßnahmen natürlich von großer Bedeutung. Unsere Erfolge hinsichtlich der Genauigkeit kurzfristiger Wettervorhersagen sind beeindruckend, was wir einem dichten Netz an globalen Beobachtungseinrichtungen und unseren fortschrittlichen numerischen Modellen des Klimasystems verdanken. Doch können wir noch immer keine zuverlässigen Vorhersagen für längerfristige Entwicklungen auf lokaler und regionaler Ebene treffen. Wahrscheinlich führen die nicht-linearen Dynamiken und die Komplexität des Klimasystems dazu, dass geringe Fluktuationen in den Modellen über längere Zeiträume enorm zunehmen, was deren Prognosefähigkeit erheblich herabsetzt.

Ökonomische Schäden durch Naturkatastrophen

Ökonomische Verluste in Milliarden US-Dollar

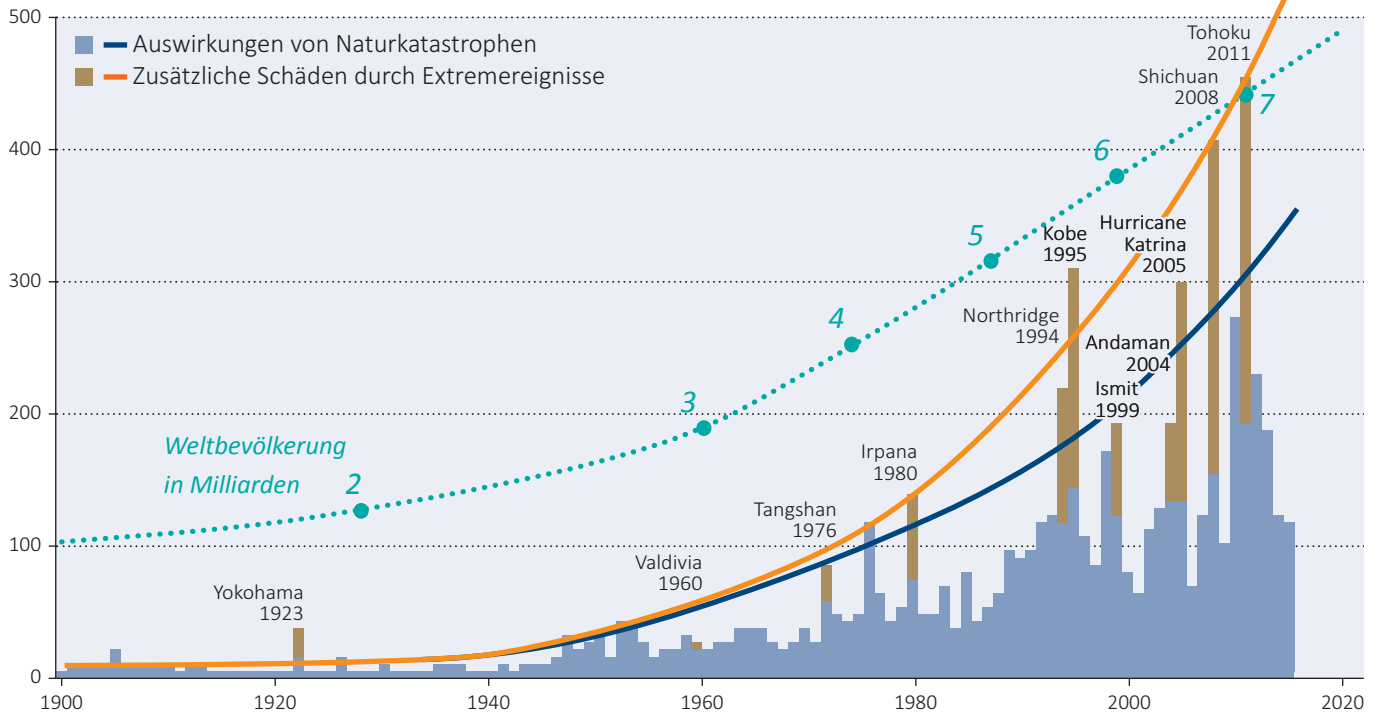


Abbildung 14. Wirtschaftliche Auswirkungen von Naturkatastrophen. Die Balken im unteren Teil des Diagramms zeigen die zunehmenden wirtschaftlichen Auswirkungen seit dem Jahr 1900 (Quelle: Munich RE und CATDAT) in Milliarden US-Dollar (inflationbereinigt). Die Zunahme der Schäden reflektiert die zunehmende Vulnerabilität menschlicher Gemeinschaften, nicht eine Zunahme von Schadensereignissen (mit Ausnahme von klimabedingten Katastrophen in den letzten Dekaden). Spitzen bei Schadensereignissen (braune Balken) spiegeln Extremereignisse („schwarze Schwäne“) wie z. B. das Erdbeben von Kobe (1995), Hurrikan Katrina (2005), das Erdbeben in Sichuan (2008) und die Erdbeben von Tohoku-Oki und Christchurch (2011) wider. Die Zunahme der Auswirkungen dieser einzelnen Extremereignisse (orangefarbene Kurve) übersteigt deutlich das durchschnittliche Wachstum der Auswirkungen von Katastrophen (blaue Kurve). Die gepunktete Kurve bildet das globale Bevölkerungswachstum ab. Nach Daniell et al. (2011).

Erdbeben: Vorhersage des Unvorhersehbaren

Während viele atmosphärische Extremereignisse und Vulkanausbrüche in einem gewissen Rahmen kurzfristig vorhersagbar sind, trifft das auf große Erdbeben nicht zu. Bisher konnten noch keine verlässlichen und messbaren Begleiterscheinungen ermittelt werden, die verheerenden Erdbeben vorausgehen. In den meisten Fällen haben wir keinen direkten Zugang zu den Regionen tief im Erdinneren, wo sich seismische Spannungen aufbauen, und die nächsten großen Spannungsriffe erzeugen, die dann möglicherweise zu verheerenden Tsunamis führen. Die mit der Erdbebenvorhersage verbundenen Unsicherheiten stellen erhebliche Herausforderungen für Städteplanung und statistische Berechnungen dar, die das Leben in Regionen mit hoher Seismizität sicherer und die Risikokommunikation effektiver machen sollen.

Aktuelle Entwicklungen in den Bereichen der Beobachtungstechnologien, Datenverarbeitung und Prozesssimulation werden jedoch die Überwachung der Dynamiken der Erdoberfläche voranbringen. Zehntausende Sensoren überall auf der Welt, teilweise auch im Weltall, zeichnen neben seismischen Ereignissen kontinuierlich auch das seismische Hintergrundrauschen und mikroseismische Phänomene auf. So können nun geodätisch beobachtete, aber seismisch lautlose Bewegungen nachgewiesen werden,

die in bislang unbekannter Weise mit Erdbeben in Verbindung stehen. Untersuchungen dieser mikroseismischen Phänomene und lautlosen Schlupfereignisse haben zu der Erkenntnis geführt, dass die Erdkruste schnell selbst auf kleinste Spannungsänderungen, Massenverlagerungen, atmosphärische Prozesse, Abschmelzen, Veränderungen der Permafrostgrenzen und die Schmelzmigration in Vulkanen reagiert. Auch seismische Effekte geothermischer oder sonstiger Explorationsaktivitäten können sensibel registriert werden.

Wahrscheinlichkeit und Schäden von Extremereignissen

Schadensskala (schematisch)

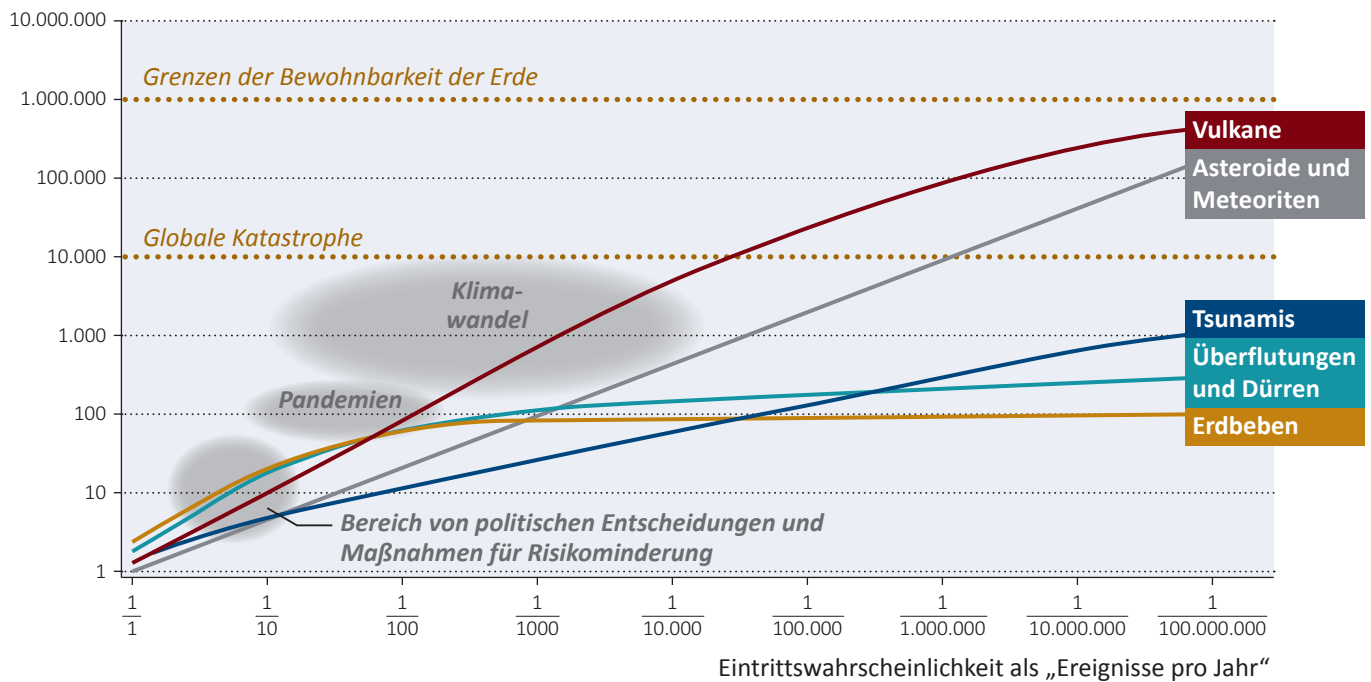


Abbildung 15. Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen und dadurch verursachte Schäden. Die Wahrscheinlichkeit wird dargestellt anhand der Wiederholungsfrequenz der Ereignisse pro Jahr; die logarithmische Schadensskala ist schematisch. Große Schadensereignisse, z. B. infolge von Asteroideneinschlägen oder Vulkanausbrüchen, können im Vergleich zu regional begrenzten Katastrophen seltene, aber verheerendere Folgen globalen Ausmaßes verursachen. Die Domäne des politischen Handelns und der Maßnahmen zur Risikominderung unterschätzt generell die logarithmische Skalierung von Schäden und Wahrscheinlichkeiten. Nach Plag et al. (2015).

Dichte Sensornetzwerke und neue Sensortechnologien (insbesondere die Nutzung bestehender Glasfaserkabel zur Messung von Bodenbewegungen mit weltweit Milliarden von Messpunkten) und verbesserte Datenverarbeitungswerkzeuge bieten die Möglichkeit, geringste Deformationsänderungen im Inneren der Erde auf kurzen Zeitskalen zu dokumentieren. Diese Technologien könnten als die erste Generation von Sensoren zur Überwachung der „strukturellen Gesundheit“ und damit für die Neigung für Spannungsentladungen im Untergrund unseres Planeten durch Erdbeben betrachtet werden. Herausforderungen hierfür sind allerdings die Handhabung enormer Datenmengen fast in Echtzeit, die Kombination von Daten aus land- und satellitengestützten Systemen, die Auswertung dieser multidisziplinären Datensätze mit neuen Methoden in Data Science und die Anwendung physikbasierter Hochleistungsrechenverfahren zur Verbesserung der Prozessquantifizierung und Vorhersagekraft dieser Beobachtungen.

Vulkanausbrüche

Auf der Erde bildet der Prozess der Aufschmelzung von Gesteinen die Grundlage für den Vulkanismus. Er spielt bei der Bildung der Kontinente, der Entwicklung von Leben, der Atmosphäre und großen Umweltveränderungen im Laufe der geologischen Zeit eine fundamentale Rolle. Heute stellen Vulkanausbrüche Gefahren und Risiken für menschliches Leben, Infrastruktur und das kurzfristige Klimageschehen dar. Die heftigsten Vulkanausbrüche in der Vergangenheit hatten weltweit Auswirkungen auf das Klima durch ihre gewaltigen Emissionen von Asche, Wasser und anderen Gasen in die Atmosphäre. Der Krakatau-Ausbruch von 1883, ein vulkanischer „schwarzer Schwan“, kostete aufgrund eines durch das Ereignis ausgelösten Tsunamis nicht nur das Leben von zehntausenden Menschen, sondern veränderte auch das globale Klima, was weltweit zu erheblichen Ernteaussfällen und Hungersnöten führte. Ähnliche Effekte wurden nach dem Tambora-Ausbruch von 1815 beobachtet, und auch künftig werden auf Zeitskalen von Jahrhunderten Ausbrüche ähnlichen Ausmaßes und mit ähnlichen Auswirkungen auftreten.

Wir müssen besser eingrenzen, wo, wann, wie stark und für wie lange sich Vulkanausbrüche auf die Lebensbedingungen auf der Erde und das Klima auswirken werden. Dafür müssen neue Berechnungsverfahren und statistische Analysemethoden eingesetzt werden, um zu ermitteln, wie sich Magma bildet, chemisch entwickelt, aufsteigt und ausbricht. Das macht Vulkanmonitoring zu einer datenintensiven Disziplin. Diese Werkzeuge werden es ermöglichen, verlässliche Vorboten von Ausbrüchen wie die Deformation von Vulkanen, lokale Anstiege niederfrequenter Erdbeben oder Veränderungen der Zusammensetzung von Gasen, die vor einem Ausbruch ausgestoßen werden, zu ermitteln. Frühzeitige Warnungen erfordern eine Verknüpfung geophysikalischer Beobachtungen mit petrologischen und geochemischen Beobachtungen. Experimentelle Studien versprechen Fortschritte bei der Bestimmung kritischer Zustände von Magmareservoirs und, ob sie ausreichend mobiles Magma enthalten, das eruptieren kann. Allem voran steht die Frage, welche Prozesse einen Vulkanausbruch auslösen. Wichtige Ziele dafür sind beispielsweise physikalisch-chemische Untersuchungen zur Verweildauer von Magma in einem Reservoir vor dem Ausbruch und neue Methoden zur Erfassung und Vorhersage von physikalischen Eigenschaften von Magma, Phasenübergängen und Entgasungsprozessen. Deutlich verbesserte Beobachtungsmöglichkeiten mit hoch entwickelter automatisierter Datenanalyse und Modellierungskapazitäten werden eine effektive Frühwarnung voranbringen.

Weltraumwetter

Der Planet Erde ist dem Sonnenwind ausgesetzt, einem Strom von geladenen und hochenergetischen Teilchen, die ihren Ursprung in unserer Sonne haben. Die Sonnenaktivität selbst steuert die Eigenschaften und Dynamik der Sonnenwinde. Die Region des Sonnenwinds, in der dieser mit dem Magnetfeld der Erde interagiert, wird Magnetosphäre genannt. Zusammen mit der Atmosphäre bildet die Magnetosphäre einen natürlichen Schutzschild gegen die schädlichen hochenergetischen Teilchen. Sogenannte koronale Massenauswürfe (coronal mass ejections) – riesige Eruptionen von Plasma auf der Sonnenoberfläche – bringen gewaltige Mengen energiereicher Teilchen, in der Regel mehr als 1 Milliarde Tonnen, mit Geschwindigkeiten, die leicht 3.000 km/s erreichen, in den interplanetaren Raum. Koronaler Massenauswürfe treten abhängig vom Sonnenzyklus bis zu einmal pro Tag auf.

Trifft ein solcher koronaler Massenauswurf auf die irdische Magnetosphäre, kommt es zu einem geomagnetischen Sturm mit drastischen Folgen für die technische Infrastruktur der Erde. „Weltraumwetter“ ist der Oberbegriff für eine Vielzahl physikalischer Prozesse, die in der Magnetosphäre und Ionosphäre ihren Ursprung haben. Ein extremes Weltraumwetterereignis im Oktober 2003 führte zu großen und schnellen Magnetfeldschwankungen und einem erheblichen Anstieg der energetischen Elektron- und Protonströme in der erdnahen Umgebung, was schwere Auswirkungen auf die globalen Kommunikationssysteme, die Stromversorgung und das Globale Positionsbestimmungssystem (Global Positioning System) zur Folge hatte.

Der erdnahe Weltraum ist zu einem wichtigen Einflussfaktor der menschlichen Technosphäre geworden. Besonders das globale Satellitennavigationssystem und satellitenbasierte Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungsdienste sind anfällig gegenüber solchen extremen Weltraumwetterereignissen. Störungen oder gar Ausfälle der Stromversorgung aufgrund von extremen Magnetfeldschwankungen gefährden künftige intelligente Stadt- und Wirtschaftskonzepte. Daher ist ein besseres physikalisches Verständnis der Auswirkungen des Weltraumwetters und seiner Folgen für die Funktion fortschrittlicher Technologien von entscheidender Bedeutung. Dieses Wissen ist die Grundlage dafür, dass unsere Gesellschaften die Vorhersage von Weltraumwetterereignissen zu einer bedeutenden Aufgabe für die Grundlagen- und Anwendungsforschung im Bereich der Weltraumforschung machen.

Was wird benötigt?

Welche Maßnahmen sollten im Rahmen der Erdsystemwissenschaft ergriffen werden, um Antworten auf Naturgefahren zu finden, bei Maßnahmen zur Gefahrenreduzierung zu beraten und Lösungen für die Schadensbegrenzung und Katastrophenresilienz zu formulieren? Bei diesen Überlegungen ist es wichtig, zwei Schlüsselbotschaften zu vermitteln: 1) Extremereignisse lösen in einer nachfolgenden Kaskade von Ereignissen Folgekatastrophen aus. Ein Beispiel dafür sind Erdbeben, auf die ein Tsunami und dann eine Epidemie folgen. Ein weiteres Beispiel wäre eine schwere Überflutung, gefolgt von einem Erdbeben, das zum Zusammenbruch der Infrastruktur und in der Folge zu einer Hungersnot führt, all dies verbunden mit enormen wirtschaftlichen Kosten. 2) Die nach den meisten dieser Extremereignisse und Katastrophen oder Ereigniskaskaden erforderlichen Reaktionen sind meist die gleichen, unabhängig von der konkreten Art des Ereignisses. Daher müssen wir der zunehmenden Anfälligkeit unserer Infrastruktur, Wirtschaft und Technosphäre mit größerer Voraussicht begegnen. Die Verbesserung der Resilienz muss eine grundlegende Strategie zur Minderung von Risiken und Schäden sein. Daraus folgen verschiedene Empfehlungen:

Monitoring

- Unsere Beobachtungsinfrastruktur zur Überwachung der Prozesse bei der Entstehung von Extremwetterereignissen sollte deutlich erweitert werden. Dieses Monitoring sollte die Veränderungen in der Häufigkeit von extremen Wetterereignissen erkennen können und eine artefaktfreie Analyse von z. B. Tropenstürmen aus Satellitenbildern und hochauflösenden Radarmessungen ermöglichen.
- Unsere Beobachtungsinfrastruktur sollte erweitert werden, damit wir Vorläuferprozesse großer Erdbeben erkennen und entsprechende Frühwarnstrategien entwickeln können.

- Geologische Aufzeichnungen in Sedimenten und anderen Archiven, die Auskunft geben über vergangene Erdbeben, Vulkanausbrüche, Klimaschwankungen und Oberflächenprozesse (Dürren, Erdbeben usw.), sind verstärkt zu nutzen, um das Ausmaß und die Häufigkeit von Extremereignissen besser einschätzen zu können. Ein besonderer Fokus sollte dabei auf der Erkennung von seltenen „Schwarzen Schwänen“ und deren Auswirkungen liegen.
- Wir müssen unsere Kapazitäten zur Überwachung aktiver Vulkanregionen verbessern und neue Methoden der Fernerkundung einsetzen. Diese werden es ermöglichen, die Anzeichen für magmatische Aktivität im Untergrund durch Messungen an der Oberfläche eindeutiger zu erkennen und für die Vorhersage und Risikoeinschätzung zu nutzen. Damit können kritische Zustände aktiver Vulkane vor einem Ausbruch besser erkannt werden.
- Neue Methoden zur Handhabung, Verarbeitung und Analyse zunehmender Datenmengen sind zu entwickeln und zu nutzen, um eine bessere Handhabung der wachsenden Datenströme aus der Fernerkundung und anderen Quellen zu ermöglichen.

Modellentwicklung

- Wir müssen mechanistische Modelle (z. B. hochauflösende, konvektionsauflösende Modelle) und Prognosen zur Funktion der globalen Wasserkreisläufe, einschließlich Flut- und Dürre-Ereignisse, unter Berücksichtigung sich verändernder Klimazustände entwickeln.
- Klimaprognosen sollten mit Überwachungsdaten zu Landnutzung und ländlicher oder urbaner Entwicklung oder Permafrostveränderungen und Hangstabilität verknüpft werden. Dazu können zunehmend neuronale Netzwerke eingesetzt werden, um z. B. Erdbeben und deren potenzielle Auswirkungen vorherzusagen.
- Werkzeuge aus Data Science und des Hochleistungsrechnens müssen eingesetzt werden, um die großen seismo-geodätischen Datensätze analysieren und damit Erdbebenvorhersagen und Frühwarnsysteme verbessern zu können.
- Wir müssen auf der Basis von neuen Ansätzen der Datenwissenschaft und Simulationstechnologien geeignete Strategien entwickeln, um kritische Zustände und letztlich die Auslöser von Vulkanausbrüchen zu ermitteln.
- Beobachtungen aus dem Weltraum sind für die Modellierung und Vorhersage der Ausbreitung von Aschewolken und toxischen Gasen in der Atmosphäre zu nutzen, um dadurch z. B. die Auswirkungen auf den Flugverkehr und Gesundheitsrisiken verringern zu können.
- Wir müssen unser Verständnis der Auswirkungen extremer Weltraumwetterereignisse auf Weltraum- und Bodeninfrastruktur verbessern.
- Neue Szenarien und Gefahren- und Risikomodelle werden zur Verbesserung der Risikovorsorge benötigt, die sowohl historische Aufzeichnungen als auch die Neigung des Menschen, das Auftreten von Extremereignissen zu übersehen oder zu unterschätzen, berücksichtigen. Diese Modelle müssen Szenarien für Vulnerabilität,

gesellschaftliche Reaktionen und Resilienz beinhalten, die den geowissenschaftlichen Hintergrund, aber auch die psychologische Reaktion auf und die wirtschaftlichen Folgen von Naturkatastrophen berücksichtigen.

- Zur Unterstützung von Diensten, die der breiteren geowissenschaftliche Gemeinschaft essenzielle Daten und Datenprodukte bereitstellen, werden Ressourcen erforderlich sein. Auch für die Ausstattung der Erdsystemwissenschaften mit ausreichender Rechenleistung für die effektive Nutzung neuer Simulations- und Big-Data-Werkzeuge müssen Ressourcen aufgebracht werden.

Management

Um die Prioritäten des Sendai-Rahmenwerks der Vereinten Nationen für Katastrophenvorsorge erfüllen zu können, sind die Erdsystemwissenschaften mit den folgenden Anforderungen in den Bereichen Frühwarnung und Anpassungsmaßnahmen konfrontiert.

- *Frühwarnsysteme:* Es werden weitere Studien und die Entwicklung von Methoden erforderlich sein, um bessere Frühwarnsysteme zu etablieren. Die bereits bestehenden Frühwarnsysteme sollten erweitert und verbessert werden.
- *Kommunikation über Katastrophen und Risiken:* Für ein effektives Risikomanagement müssen geeignete Strategien und Werkzeuge für die Kommunikation mit allen beteiligten Stakeholdern und der Öffentlichkeit entwickelt werden. Dies betrifft sowohl die regelmäßige Aktualisierung von Informationen über die globale Verteilung unterschiedlicher Arten von Gefahren, Risiken und deren zeitliche und räumliche Ausmaße als auch die frühzeitige Warnung vor drohenden Extremereignissen.
- *Verbesserung der Katastrophenkompetenz:* Maßnahmen zur Information und Aufklärung der Bevölkerung sollten aktiviert und gestärkt werden. Grundlegendes Wissen über Gefahren sind unabdingbar, um eine bessere Vorbereitung auf Katastrophen, die Minderung der Auswirkungen potenzieller Katastrophen und die Ausarbeitung von Notfallmaßnahmen zu ermöglichen.
- *Stärkung der Resilienz:* Die zunehmende Anfälligkeit und das steigende Risiko durch Gefahren, denen die Bevölkerung und die menschliche Technosphäre und ihre Infrastrukturen ausgesetzt sind, erfordern neue Strategien zur Stärkung der Resilienz. Technologische Fortschritte und modernste Techniklösungen sind hierbei von zentraler Bedeutung. Ebenfalls entscheidend sind verbesserte Vorhersage- und Frühwarnfähigkeiten, um die Folgen der Auswirkungen von Naturkatastrophen auf unsere zunehmend vulnerablen Wirtschaftssysteme und die Gefährdung unserer Lebensgrundlagen abzuwenden.
- *Vernetzung der Wissenschaften zur Stärkung der Resilienz:* Nur die Bildung disziplinübergreifender Netzwerke und Partnerschaften zwischen den Erdsystemwissenschaften und den Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften und der Psychologie sichern eine resiliente und nachhaltige Lebensgrundlage für die Menschheit. Um erfolgreich Strategien und Programme für Reaktionen und Resilienzstärkung entwickeln zu können, bedarf es gemeinsamer Bemühungen über die einzelnen Disziplinen hinweg und internationaler Kooperation auf Grundlage angemessener personeller und finanzieller Investitionen.

3.7 Ressourcen

Eine nachhaltige Nutzung von Georessourcen bedeutet, dass unser gegenwärtiger Bedarf an Georessourcen die Fähigkeit künftiger Generationen, ihren Bedarf zu decken, nicht beeinträchtigt. Die Ausrichtung auf dieses Ziel fällt mit zwei wichtigen Entwicklungen zusammen: 1) Die Volkswirtschaften der Welt müssen von einer auf fossilen Brennstoffen und Kernenergie beruhenden Energieproduktion zu erneuerbaren Energien übergehen. Dies erfordert die Gewinnung enormer Mengen von Metallen, die an der Erdoberfläche und in tiefen geologischen Formationen vorkommen, sowie die Speicherung von Energie und Lagerung ihrer Abfallprodukte im Untergrund. 2) Der Mensch wirkt zunehmend negativ auf die in der „kritischen Zone“ der Erdoberfläche enthaltenen Ressourcen wie Böden und sauberes Süßwasser ein, die unsere Lebensgrundlage bilden. Die Erdsystemwissenschaften können zwar eine Diagnose der Erde im Wandel liefern, und eine ressourcenbezogene Forschung kann zur Therapie beitragen – diese Therapie muss jedoch auf sozial- und umweltverantwortlichen Prinzipien beruhen.

Stand der Wissenschaft

Georessourcen – ob sie aus Gesteinen tief im Untergrund gewonnen, vom Meeresboden geborgen oder an der Erdoberfläche genutzt werden – sind weder unerschöpflich noch auf menschlichen Zeitskalen erneuerbar. Auch ist die Nutzung dieser Ressourcen nicht ohne Kosten für die von ihrer Ausbeutung betroffenen Gesellschaften verbunden. Die Gewinnung und Nutzung mancher Ressourcen, beispielsweise fossile Brennstoffe, sind mittlerweile mit inakzeptablen Kosten für die gesamte Weltgemeinschaft in Form von Treibhausgas-CO₂-Emissionen verbunden. Dennoch benötigt unser Wirtschaftssystem eine immer weiter steigende Nutzung dieser Ressourcen als Grundlage der modernen Industrie- und Agrargesellschaft. Selbst wenn es irgendwann in der Zukunft eine Kreislaufwirtschaft gäbe, wird die erforderliche Wiederverwertung von Rohstoffen niemals den Bedarf decken, und alle Verluste in der Recyclingschleife müssten weiterhin durch „frisches“ Material ersetzt werden. Die Erkenntnis dieses Dilemmas erfordert ein Umdenken bei der Nutzung von Georessourcen mit weitreichenden Konsequenzen für unser künftiges Wirtschaftssystem. Im Zentrum dieser neuen Sichtweise muss die Nachhaltigkeit stehen, wie sie in den Zielen für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen definiert wird: „eine Nutzung von Georessourcen, die die Fähigkeit künftiger Generationen, ihren Bedarf zu decken, nicht beeinträchtigt“.

Diese Neuausrichtung auf eine nachhaltige Ressourcennutzung geht mit großen parallelen Herausforderungen einher: 1) Wenn das Pariser Klimaziel von 2015 der Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C erreicht werden soll, muss bis 2050 die Nutzung sämtlicher fossiler Brennstoffe aus der Weltwirtschaft eingestellt werden. Während dieses Übergangs werden wir zunächst ein allmähliches Zurückfahren der Nutzung von Kohle, Öl und eventuell Holz und den sukzessiven Übergang zu CO₂-armen Energiequellen erleben, d. h. zuerst zu Erdgas und dann zu regenerativen Energiequellen. 2) Die übergreifende Energiewende, d. h. die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, erfordert eine massive Ausweitung der Exploration, Gewinnung und Wiederverwertung „kritischer“ Metalle aus Gesteinen tief in der Erde (wobei „kritisch“ hier sowohl Herausforderungen bei der Verfügbarkeit als auch bei der Bereitstellung einschließt). 3) Die Öffentlichkeit erkennt zunehmend die schweren negativen ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen der Extraktion und Nutzung sowie des während des Abbaus von vielen Rohstoffen anfallenden Abbaus an. 4) Der tiefe Untergrund wird bei der Speicherung von Energie oder der Lagerung ihrer Abfallprodukte

eine immer wichtigere Komponente darstellen. 5) Menschen nutzen nicht nur Ressourcen, sondern menschliche Aktivitäten wirken sich auch erheblich auf die Integrität der terrestrischen Erdoberflächenressourcen wie Böden und Süßwasser aus.

Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sind unerlässliche Akteure in Bezug auf die Deckung des Bedarfs an Georessourcen, die für die Energiewende benötigt werden. Sie müssen jedoch auch über die Risiken und Konsequenzen verschiedener Szenarien der Ressourcennutzung aufklären.

Schlüsselfragen

Die ökologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen zeigen sich am stärksten, wenn man sich auf die fünf Ressourcenarten konzentriert, auf die die künftige Menschheit am meisten angewiesen sein wird. Drei davon (Energie, Metalle und Untergrundspeicher) werden hier als „geologische Untergrundressourcen“ bezeichnet, da sie auf der Extraktion oder Nutzung geologischer Strukturen und Materialien in Tiefen von bis zu mehreren Kilometern beruhen. Die anderen beiden (Süßwasser und Boden) werden als „Erdoberflächenressourcen“ bezeichnet, da ihre Integrität durch menschliche Aktivitäten in einem Maße beeinflusst wird, dass ihre weitere Bereitstellung als Lebensgrundlage für den Menschen gefährdet ist. Beide Ressourcentypen sind durch den „Nahrungsmittel-Wasser-Energie-Nexus“ miteinander verbunden, wobei Nahrungsmittel- und Wasserversorgung mit Energieerzeugung und -speicherung zusammenhängen. Der Fokus liegt in diesem Kapitel eher auf terrestrischen Georessourcen als auf der marinen Nahrungskette (mit einem kurzen Exkurs zur marinen Metallförderung).

Können die verfügbaren Metallvorkommen eine kohlenstoffarme Zukunft gewährleisten?

Die für den Wandel in Richtung einer kohlenstoffarmen Zukunft erforderlichen erneuerbaren Technologien werden mit erheblichen Ressourcenkosten verbunden sein. In dieser Hinsicht sind Metallressourcen und der Klimawandel untrennbar miteinander verbunden. Allerdings geht aus zwei Gutachten der Weltbank (2018 und 2020) zur kohlenstofffreien Stromerzeugung hervor, dass die ressourcenbezogenen Konsequenzen in den für Klima- und Folgenabschätzungsmodelle (Abb. 16) verwendeten Dekarbonisierungsszenarien weitgehend nicht berücksichtigt werden. Das ist überraschend und definiert gewichtige Forschungsziele für die Geo- und Materialwissenschaften. Wir ergründen diese Konsequenzen, indem wir uns die drei markantesten Komponenten erneuerbarer elektrischer Energie anschauen: Solartechnologien, Windkraft und Energiespeicher.

Eine erste Schwierigkeit stellt in dieser Hinsicht der unbekannte Klimapfad dar, den die Menschheit einschlagen wird: Allein durch die aktuellen Zusagen der Regierungen im Pariser Klimaabkommen wird der Gesamtbedarf an Metallen für eine kohlenstofffreie Energieerzeugung von etwa 40 Millionen Tonnen im Jahr 2018 auf 95 Millionen Tonnen im Jahr 2050 ansteigen. Diese Zusagen werden die Erwärmung aber nur auf 2,7 °C begrenzen. Um das Szenario einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C zu erreichen, wäre noch viel mehr grüne Energie notwendig, die insgesamt 180 Millionen Tonnen Metallressourcen erfordern könnte.

Eine zweite Schwierigkeit bei der Bedarfsprognose ist die starke Beeinflussung durch technologische Entwicklungen, die im Gegensatz zur Exploration neuer Metallressourcen relativ kurzfristig erfolgen können. Zu den Metallen, die für die Energieerzeugung

mit erneuerbaren Energieträgern am meisten gebraucht werden, zählen neben großen Mengen der Hauptelemente Silizium, Aluminium und Eisen die seltenen Metalle Lithium, Kupfer, Blei, Nickel, Silber, Gallium, Selen, Chrom, Mangan, Kobalt, Zink und das sehr seltene Metall Indium. Wenn für Offshore-Infrastruktur verstärkt neue getriebelose Windenergieanlagen eingesetzt werden sollen, wird der Bedarf an dem Seltenelement Neodym massiv ansteigen. Die Elektrifizierung des Verkehrs wird ebenfalls große Mengen Lithium erfordern, wenn eher Lithium-Ionen-Akkus als andere Arten von Energiespeichern wie wasserstoffbasierte Technologien eingesetzt werden.

Eine dritte Schwierigkeit ergibt sich aus der Abhängigkeit des Metallbedarfs von strategischen Beschlüssen politischer Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger und Produzentinnen und Produzenten über die Art und Weise der Energieerzeugung mit erneuerbaren Energieträgern. Wenn wir das 2-Grad-Szenario als Beispiel nehmen, steigt der Metallbedarf bei Nutzung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen um einen Faktor von 2 bis 3 und für die Energiespeicherung um einen Faktor von bis zu 10. Sehen wir uns als eines der markantesten Beispiele den Bedarf an Lithium für die Energiespeicherung an: Die Energiespeicherung wird Prognosen zufolge von heute ca. 3 GWh auf 20 GWh im 2-Grad-Szenario und 45 GWh im Kleiner-2-Grad-Szenario ansteigen, wodurch sich bis 2050 ein kumulativer Bedarf von 5 Millionen Tonnen Lithium für 2 °C (ein Anstieg um 500 Prozent im Vergleich zu 2018) und 10 Millionen Tonnen für < 2 °C ergibt. Die jährliche Lithiumproduktion liegt heute bei etwa 80.000 Tonnen. Bei fehlenden Recyclingtechnologien (Li hat gegenwärtig eine Recyclingrate von nahezu null) ist allein in den nächsten 10 Jahren von einem sechsfachen Anstieg des Li-Verbrauchs auszugehen.

Für 2050 prognostizierter Rohstoffbedarf für erneuerbare Energietechnologien

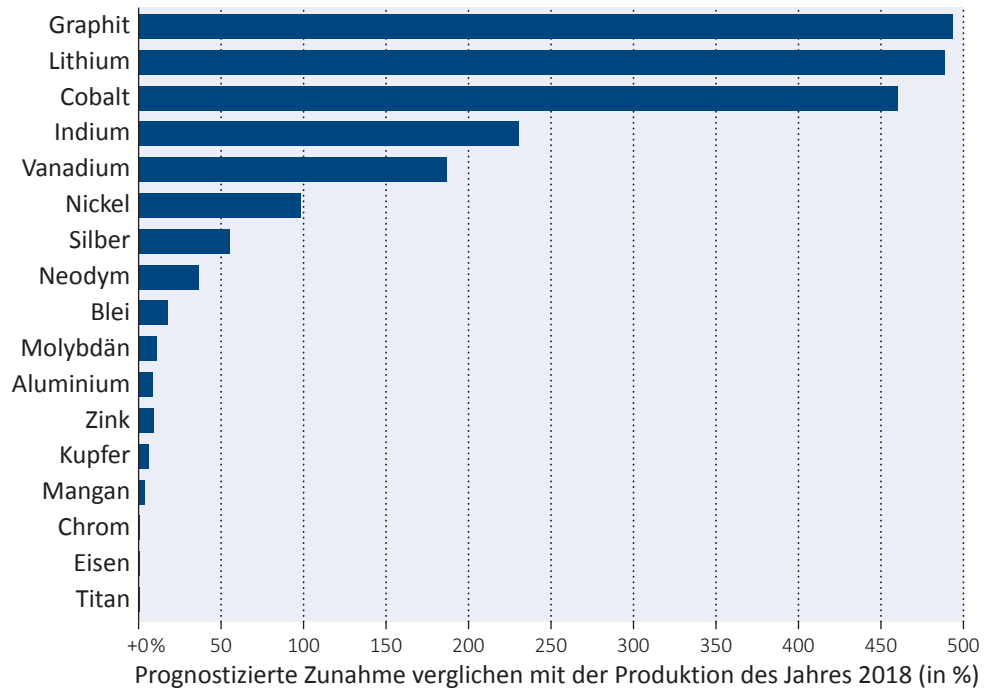


Abbildung 16. Der prozentuale Anstieg des globalen Bedarfs an Metallen und Graphit bis 2050, die im 2-Grad-Erwärmungsszenario für eine kohlenstofffreie Stromerzeugung erforderlich wären. Quelle: The World Bank (2020).

Die vierte Schwierigkeit ergibt sich aus den Unbekannten bei der Abschätzung von Reserven. Wenn wir beim Lithium-Beispiel bleiben, liegen die aktuell bekannten Reserven (laut USGS) bei 17 Millionen Tonnen. Insgesamt aber werden die Lithiumvorkommen weltweit auf etwa 80 Millionen Tonnen geschätzt – genug zum Erreichen des 2-Grad-Szenarios und der nötigen darauffolgenden Ersatzbeschaffung von Batteriespeichern. Bei vielen anderen Metallen wie Kupfer hat sich gezeigt, dass das Verhältnis von Produktion zu Reserven über die letzten 50 Jahre relativ konstant geblieben ist. In anderen Worten: Vorerst scheinen Kupfervorkommen genauso schnell gefunden und erschlossen zu werden, wie Kupfer verbraucht wird. Um den Bedarf auch weiterhin decken zu können, werden jedoch geologische und geophysikalische Methoden eine zentrale Rolle spielen. Bislang haben wir nur die oberen ca. 500 Meter der Erdkruste in großem Umfang exploriert und erschlossen. In größerer Tiefe gibt es noch erhebliches Potenzial. Doch dafür müssen zuvor bessere Möglichkeiten zur Exploration der tiefen Kruste gefunden werden, basierend auf Modellen für die Mechanismen, die Metalle in der Tiefe anreichern.

Die meisten dieser Elemente kommen nur in winzigen Mengen, als Spurenelemente in den am meisten verbreiteten Gesteinen vor und sind daher subökonomisch. Allerdings hat die Erde bereits die ersten Anreicherungsschritte für uns erledigt. Die Verteilung von Metallen in Gesteinen ist sehr variabel und hängt vom Muttergestein, dem Mineralisierungsprozess und den geotektonischen Gegebenheiten ab. Anreicherungsfaktoren zwischen gewöhnlichen Gesteinen und Metallvorkommen liegen zwischen einem Faktor 5 für die Hauptelemente Eisen und Aluminium und einem Faktor 100 bis 500 für Spurenelemente wie Kupfer und Zink. Diese Anreicherungen finden in der Tiefe durch magmatische Prozesse oder an der Oberfläche durch die Interaktion mit Atmosphäre und Hydrosphäre statt. Aber auch der tiefe Meeresgrund gilt zunehmend als attraktive zu erschließende Ressourcenquelle. Wichtige Tiefsee-Metallvorkommen umfassen Kupfer, Kobalt, Nickel, Lithium, Platin, Tellur, Zink und viele Seltenerdelemente, die über Millionen Jahre in sehr langsam akkumulierenden Metallformationen am Meeresgrund angereichert wurden. Metallische Rohstoffe sind daher mit bestimmten Arten von Gesteinen und Sedimentformationen assoziiert, die in spezifischen geologischen Umgebungen und während bestimmter geologischer Zeiträume entstanden sind. Die weitere Erforschung der geologischen Prozesse, die Metalle im Gestein anreichern, und die Weiterentwicklung der Technologien zur Abbildung der tiefen Erde sind daher enorm wichtig, genau wie das Fachwissen über die Dynamik in der tiefen Erde und der Umwelt an der Erdoberfläche sowie neue analytische Methoden und geophysikalische Explorationswerkzeuge zur Entdeckung unbekannter Reserven und neuer Ressourcenarten.

Dieser Wandel wird auch von den Entwicklungen in den Materialwissenschaften abhängen, die Fachwissen im Bereich des Abbaus mineralischer Rohstoffe zur direkten industriellen Nutzung bereitstellen, wie z. B. Zeolith als Katalysator, Mullit in Hochleistungskeramik, Seltenerdoxide in Supraleitern und Stromgeneratoren.

Glücklicherweise geht diese Wende in Richtung vollkommen neuer Metallexploration mit einem zunehmenden Bewusstsein für nachhaltige Entwicklung einher. Daher ist bei vielen Metallen nicht die Verfügbarkeit entscheidend, sondern stellen ESG-Faktoren (Environment, Social and Governance) die größte Herausforderung dar. Zunächst einmal wird die Mineralextraktion für erneuerbare Energien selbst Treibhausgasemissionen erzeugen, die sich Schätzungen zufolge bis 2050 zusammen auf einen Anteil von

6 Prozent der bei Kohle- und Gasnutzung entstehenden Emissionen belaufen werden. Die Metallerkennung kann erhebliche Auswirkungen auf lokale Ökosysteme, Wassersysteme und Lebensgemeinschaften mit sich bringen. Der Tiefseebergbau gefährdet dunkle, kalte, energiearme Ökosysteme, die besonders empfindlich gegenüber Störungen sind. Experimente zu den Folgen des Bergbaus bestätigen, dass selbst das nicht verfestigte Sediment am Meeresboden viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte benötigen würde, um sich von den Schäden durch Manganknollenabbau zu erholen.

Im terrestrischen Umfeld geht die Bergbauindustrie unterschiedlich auf diese Faktoren ein: durch Senkung des Energie- und Wasserverbrauchs und Verringerung der Emissionen und Abwässer, um die im Nachhaltigkeitsziel 12.2 „Verantwortungsvoller Bergbau“ der Vereinten Nationen dargelegten Klimawandel- und Nachhaltigkeitsziele zu erfüllen. Doch potenzielle Nebeneffekte des marinen Bergbaus auf Meeresökosysteme und Nahrungsketten mit Relevanz für Fischgründe sind noch weitgehend unbekannt. Es muss ein Dialog zwischen der Zivilgesellschaft, die sich für saubere Energie einsetzt, und den ressourcenreichen Entwicklungsländern stattfinden, die große wirtschaftliche Gewinne aus dem Bergbau ziehen. Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler werden eine wichtige Rolle dabei spielen, einen konstruktiven Dialog zu ermöglichen.

Extraterrestrische Ressourcen werden jedoch wahrscheinlich keine Hilfe für die Energieerzeugung der Erde oder den sonstigen Ressourcenbedarf darstellen. Im Rahmen privatwirtschaftlicher Investitionen wird zuweilen die Idee evaluiert, Asteroiden abzubauen, die reich an Platingruppenmetallen, Gold und Seltenerdelementen sein können – wichtigen Bausteinen der Energieerzeugung mit erneuerbaren Energieträgern auf der Erde. Die Mondoberfläche ist im Gegensatz zur Erde reich an Helium-3, was essenziell werden könnte, sollte die Kernfusion eine realistische Technologie zur Energiegewinnung werden. Jedoch lassen die wirtschaftlichen und energetischen Kosten und die für einen solchen Weltraumbergbau erforderlichen Technologien dies unrealistisch erscheinen für den uns noch zur Verfügung stehenden Zeitraum, um die Energiesysteme der Erde zu dekarbonisieren.

Geologische Untergrundtechnologien zur Energiegewinnung und -speicherung?

Der tiefere Untergrund bis in Tiefen von mehreren hundert Metern bis Kilometern wird zunehmend weiteren Verwendungszwecken dienen: zur Gewinnung geothermischer Energie, als unterirdischer Energiespeicher und als Tiefenlagerung für radioaktive Abfälle.

Erdwärme wird im künftigen Energiemix für den häuslichen Bereich und in dicht besiedelten Stadtgebieten eine wichtige Quelle darstellen. Ein Beispiel dafür ist Münchens Erdwärme. Im Zuge künftiger Forschung wird sich diese Anwendung vom oberflächennahen Wärmeaustausch hin zur tiefen Wärmespeicherung und geothermischen Hochtemperatur-Stromerzeugung verlagern. Erdwärmeanlagen werden daher in mitteltiefen, tiefen und superheißen Umgebungen nahe aktiven Magmasystemen gebaut werden. Letztere sind bereits in der Entwicklung, z. B. in der isländischen Metropolregion Reykjavík. Die Nutzung von hydrothermalen Tiefenenergie wird eine hydraulische Stimulation von Reservoirs erfordern, was mit dem Risiko induzierter Seismizität verbunden ist. Die Forschung in diesem Bereich muss darauf ausgerichtet sein, dies zu vermeiden und gleichzeitig der Öffentlichkeit die damit einhergehenden Risiken zu vermitteln. Ziel ist es, die Umweltauswirkungen der Erdwärmennutzung möglichst gering zu halten.

Die unterirdische Energiespeicherung wird in erneuerbaren Energiesystemen immer wichtiger werden und die Tiefenspeicherung großer Energiemengen in Form von neuen Kraftstoff-, Wärme- und Druckgasformen umfassen. Das „Power-to-Gas-Konzept“ bezeichnet die Umwandlung überschüssiger Energie aus erneuerbaren Quellen in speicherbare Flüssigkeiten. Das größte Potenzial für die Tiefenspeicherung besteht in der hochenergetischen Form von „erneuerbarem“ Wasserstoff und daraus synthetisiertem Methan. In den Niederlanden wurden beispielsweise erste groß angelegte Projekte angekündigt, die die Stromerzeugung durch Windkraft mit der Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff über die bestehenden Gasleitungssysteme kombinieren sollen. Dafür ist eine enge Verknüpfung von ingenieurtechnischen und tiefengeologischen Aspekten erforderlich.

Die geologische Kohlenstoffspeicherung im Untergrund könnte als Brücke zur Verringerung des atmosphärischen CO_2 auf dem Weg in eine kohlenstoffarme Zukunft dienen. Sie steht in Deutschland derzeit nicht im Fokus, gewinnt in anderen Teilen der Welt jedoch zunehmend an Bedeutung. Bei der geologischen Kohlenstoffspeicherung wird überkritisches CO_2 in den Untergrund injiziert, wo es unter einer undurchlässigen Deckschicht eingeschlossen wird. Mit der Zeit wird das überkritische CO_2 in den Untergrundfluiden aufgelöst. Der Säuregehalt CO_2 -reicher Fluide führt zur Auflösung des Gesteins und zur Freisetzung von Kationen. Diese Kationen können mit gelöstem CO_2 reagieren und neue Karbonatminerale bilden, die CO_2 in fester Form einschließen und über Jahrtausende stabil sind.

Der Untergrund ist auch die zuverlässigste und sicherste Lagerstätte für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Die Evaluierung sicherer Lagerungsbedingungen im Untergrund, die über Zeiträume von hunderttausenden Jahren halten, erfordert geologisches Fachwissen, experimentelle Konzepte und Simulationswerkzeuge. Aufgabe der Geowissenschaften ist dabei die Identifikation der „geologischen Barriere“, während die Entwicklung der „technischen Barriere“, die den tatsächlichen hochaktiven Abfall enthält, in den Bereich der Materialwissenschaft und Mineralogie fällt. Es bedarf einer langfristigen Forschungsstrategie zur Evaluierung der Integrität potenzieller Wirtsgesteine (z. B. in Steinsalz, tonreichen Schichten oder kristallinen Gesteinen) auf Grundlage fundamentaler physikalischer, chemischer und biologischer Daten. Ziel ist es, deren Reaktion mit Untergrundfluiden und Radioaktivität während der Langzeitlagerung vorherzusagen. Es wird mindestens 40 Jahre dauern, eine sichere Lagerstätte für radioaktive Abfälle zu entwickeln, einschließlich der Berücksichtigung von Bedenken der regionalen Bevölkerung.

Eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung solcher Tiefenlagerungs- bzw. Speichertechnologien ist die Untersuchung der Transport- und Reaktionseigenschaften von Fluiden in Gesteinen der oberen Kruste. In Geothermieanlagen sind beispielsweise Stimulationsbehandlungen notwendig, um langfristige, leitfähige hydraulische Netzwerke zu schaffen. Ein Wirtsgestein für ein Atommüllendlager braucht jedoch genau das Gegenteil, d. h. Bedingungen mit geringer oder gar keiner Permeabilität. Das Verständnis dieser Prozesse ist auch für andere Ressourcen, einschließlich der Mineralexploration, von entscheidender Bedeutung. Um die öffentliche Akzeptanz der Untergrundnutzung in dicht besiedelten Gebieten zu erhöhen, müssen Risiken und Unsicherheiten genau überwacht, unerwünschte Nebeneffekte wie induzierte Seismizität oder Trinkwasserkontamination minimiert und die Risiken gegenüber der Öffentlichkeit offen kommuniziert werden.

Wie kann eine sichere Trinkwasserversorgung für Menschen und Ökosysteme gewährleistet werden?

Menschen brauchen sauberes Wasser zum Trinken, für häusliche Zwecke, zur Nahrungsmittelproduktion und für industrielle Prozesse: sogenanntes „blaues Wasser“. Terrestrische Ökosysteme, sowohl natürliche als auch bewirtschaftete, benötigen eine ausreichende Bodenfeuchtigkeit und Evaporationswasserströme: sogenanntes „grünes Wasser“. Mehrere Entwicklungen laufen derzeit der ausreichenden Verfügbarkeit von blauem und grünem Wasser zuwider. Dies wirkt sich nachteilig auf das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen aus, die eine Grundversorgung und einen sicheren Zugang zu sauberem Wasser für alle Menschen fordern: 1) Die meisten Flüsse werden heute intensiv bewirtschaftet, was deren Interaktion mit Ökosystemen einschränkt und Wasserknappheit für lokale Gemeinschaften zur Folge hat. 2) Oberflächen- und Grundwasserressourcen sind in vielen Regionen aufgrund von übermäßiger Nutzung und Dürren erschöpft. 3) Die Abholzung von Wäldern beeinträchtigt lokale Wasserkreisläufe, wodurch mögliche Schadwirkungen entstehen, die sich auch auf angrenzende Regionen ausdehnen. 4) Zudem führt der globale Klimawandel zum Abschmelzen von Gletschern und damit zur Verringerung ihrer Speicherkapazität, zu längeren und stärkeren Dürren, extremeren Niederschlägen und zur Verringerung der Süßwasserverfügbarkeit in Regionen, die bereits trocken sind. 5) Das Bevölkerungswachstum und die mit hohem Wasserverbrauch verbundene Lebensweise einer aufsteigenden Mittelschicht tragen ebenfalls zu einer immer stärkeren Wasserverknappung bei, die bereits jetzt etwa zwei Milliarden Menschen betrifft. All diese Effekte werden in einer Zukunft mit den derzeitigen Szenarien globalen Wirtschaftswachstums noch weiter verstärkt werden. Es wird häufiger zu Konflikten im Zusammenhang mit Wasserressourcen kommen. Auch die Nutzung von Wasserquellen für oberflächennahe geothermische Anlagen wird den Bedarf erhöhen. Die Notwendigkeit, auf sichere Weise Energie zu erzeugen, ohne die oberflächennahen Wasserressourcen dabei zu sehr zu belasten, wird uns daher vor neue Herausforderungen stellen.

Die Erdoberfläche spielt auch zunehmend in Konzepten sogenannter „Negativen Emissionen“ eine Rolle – dem Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre durch technische Interventionen oder der Verstärkung biologischer Prozesse, die am Kohlenstoffzyklus beteiligt sind. Tatsächlich flossen in die Prognosen des IPCC für die Einhaltung der Erwärmungsgrenze von $1,5^\circ\text{C}$ negative CO_2 -Emissionen von 10 bis 20 Gt/Jahr ein (ein Viertel bis die Hälfte der derzeitigen anthropogenen Emissionen). Dabei werden insbesondere die Aufforstung und das Verfahren der Bioenergie mit CO_2 -Abscheidung und -Speicherung (BECCS) massive Veränderungen der Landnutzung mit Eingriffen in hydrologische Kreisläufe, Nährstoffkreisläufe und die Nahrungsmittelproduktion in einem Ausmaß erfordern, das die Auswirkungen auf das Erdoberflächensystem und die gesellschaftliche Akzeptanz schwer einschätzbar macht. Andere Verfahren wie die organische Kohlenstoffanreicherung im Boden sind weniger invasiv, könnten aber durch Fragen ihrer Langfristigkeit behindert werden. Die „verstärkte Verwitterung“, d. h. das Ausstreuen von Basaltpulver auf Ackerflächen, hilft zwar, CO_2 zu binden, und dient gleichzeitig als Dünger, fordert aber auch den Abbau, das Mahlen und den Transport von Gigatonnen Basaltpulver pro Jahr – eine Größenordnung, die einen signifikanten Anteil des globalen Sedimenttransports in Flüssen darstellt. All diese Methoden stellen tiefe Eingriffe in die empfindlichen Regulationssysteme der Erde dar, weshalb deren Praktikabilität und deren wirtschaftliche, energetische, ökologische und soziale Kosten intensive und dringende interdisziplinäre Untersuchungen erfordern.

Das Konzept der „planetaren Grenzen“ setzt diese Herausforderungen in einen wissenschaftlichen Kontext. Allerdings dient bei der Definition und Quantifizierung einer planetaren Belastbarkeitsgrenze für Süßwasser derzeit lediglich der Süßwasserverbrauch als Indikator für den anthropogenen Eingriff in den Wasserkreislauf. Eine umfassendere Grenzdefinition sollte alle wesentlichen Funktionen von Süßwasser im Erdsystem berücksichtigen. Modellbasierte Projektionen sind für dieses Ziel das Schlüsselwerkzeug. Derzeitige Modelle befassen sich jedoch vorwiegend mit den langfristigen, räumlich gemittelten hydrologischen Auswirkungen des globalen Klimawandels. Globale hydrologische Modelle sowie Landoberflächen- und Vegetationsmodelle der nächsten Generation sollten die Mechanismen und Auswirkungen von Extremereignissen, insbesondere Dürren, berücksichtigen. Sie sollten sowohl den anthropogenen Klimawandel als auch direktere menschliche Interventionen wie die Wasserentnahme aus Oberflächen- und Untergrundressourcen und die Effekte der Gletscherschmelze und der veränderten Landnutzung beinhalten. Vor allem die beiden letzten Aspekte könnten über große Entfernungen hinweg miteinander in Verbindung stehen und daher Auswirkungen über Regionen und Länder hinweg haben.

Ein zweiter Eckpfeiler ist die Integration dieser kombinierten hydrologischen Erdsystemmodelle in Fernerkundungsdatenbanken. Bodengestützte Überwachungsstationen und von Behörden kontinuierlich zusammengetragene Daten werden dafür die Grundlage bilden. Eine neue Datenquelle sind Satellitenbeobachtungen wie GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) zur Quantifizierung von Veränderungen der Massenbilanz (d. h. Wasserspeicherung). Deren Nutzen ist vielversprechend, da Grundwasser besonders schwer zu überwachen ist, weil Grundwasserleiter (Aquifere) sehr groß und unterirdisch nicht direkt sichtbar sind, Grundwasser jedoch den häuslichen Bedarf von etwa der Hälfte der Weltbevölkerung deckt. Die Analyse solcher Fernerkundungsdaten sollte ausgeweitet werden, um die wichtigsten Effekte von Veränderungen der Süßwasserströme und -speicher für die Biosphäre, einschließlich dürrebedingter Auswirkungen auf die Vegetationsproduktivität und daher die natürliche CO₂-Sequestrierung, herauszuarbeiten. Darüber hinaus sollten durch die Integration von Modellsimulationen und Statistiken über die Süßwassernutzung in verschiedenen Sektoren Lösungen für sich abzeichnende Zielkonflikte innerhalb des Nexus Wasser-Energie-Ernährungssicherheit untersucht werden, z. B. die Konkurrenz um unterirdisches Wasser zwischen Haushalten und Energieerzeugung. Soziohydrologische Analysen, ein derzeit noch wenig erforschter Bereich, sollten vorangetrieben werden, um soziale Dynamiken – von der lokalen bis zur globalen Ebene – zu untersuchen, die möglicherweise zu einer nachhaltigeren Wassernutzung in der Zukunft führen (oder dieser im Wege stehen).

Wie können Böden in der kritischen Zone der Erde angesichts des Klimawandels und des menschlichen Einflusses geschützt werden?

Böden – die dünne, schutzbedürftige Schicht, die 95 Prozent der terrestrischen Landoberfläche bedeckt – erbringen essenzielle Leistungen für die Menschheit. Böden decken den Bedarf an ausreichend energiereichen Nahrungsmitteln für eine Weltbevölkerung, die bis 2050 10 Milliarden übersteigen könnte, und wirken somit der Mangelernährung entgegen, von der heute bereits 820 Millionen Menschen betroffen sind. Böden liefern wichtige Mikronährstoffe wie Zink und Eisen, deren Fehlen zum sogenannten „versteckten Hunger“ („Hidden Hunger“) führt – einem Mikronährstoffmangel, von dem 2 Milliarden Menschen betroffen sind. Durch ihren Einfluss auf die Wasserinfiltration, die Wasserspeicherung und den Wasserabfluss sind Böden zudem ein

zentraler Akteur im globalen Wasserkreislauf. Zu guter Letzt können gesunde Böden durch ihre bodenorganischen Verbindungen einen erheblichen Anteil des anthropogenen atmosphärischen CO₂ sequestrieren.

Trotz der Bedeutung, die der Erhaltung der Bodenqualität weltweit zukommt, sind Böden heute vielerorts stark degradiert. Bereits 25 Prozent der globalen Bodenflächen sind von einer hohen Bodendegradation betroffen. Dieser Anteil könnte sich bis 2050 auf 80 Prozent der Landoberfläche erhöhen. An diesem Punkt wäre die Umweltgrenze erreicht, innerhalb derer die Menschheit sicher leben kann. Für die Bodendegradation sind hauptsächlich zwei Effekte verantwortlich: Zum einen sind etwa 30 Prozent der globalen Böden durch Versalzung, Verdichtung, Versauerung, chemische Verunreinigung und Nährstoffauszehrung mäßig bis stark degradiert. Zum anderen ist die Bodenerosion aufgrund ungeeigneter landwirtschaftlicher Praktiken die größte Bedrohung, da viele Teile der besiedelten Landoberfläche in einer Geschwindigkeit erodieren, die diejenige der Bodenbildung um eine bis zwei Größenordnungen übersteigt. Diese Entwicklungen stellen eine ernste Gefahr für das Erreichen des UN-Nachhaltigkeitsziels „Den Hunger beenden“ dar. Bei diesem Ziel geht es darum, dass alle Menschen ganzjährig Zugang zu ausreichend nährstoffreichen Nahrungsmitteln haben müssen und bis 2030 alle Formen der Mangelernährung beseitigt werden sollen. Die Bodendegradation wird auch die Klimastabilität des Planeten weiter beeinträchtigen, da der Beitrag der Böden zur Regulierung des globalen Wasserkreislaufs und deren Fähigkeit, klimasensible Spurengase aus der Atmosphäre zu filtern, zurückgehen werden.

Eine wichtige Rolle spielt daher die Entwicklung eines erweiterten Konzepts für die Bodenforschung, das die Erdsystemperspektive berücksichtigt, einschließlich der darunterliegenden Gesteine, des in den Böden enthaltenen Wassers und der Bio- und Atmosphäre darüber. Dieses Konzept einer „Kritischen Zone“, die sich von der Vegetationsdecke bis zum Grundwasserleiter erstreckt, geht von einer lebenden, atmenden, sich ständig entwickelnden Grenzschicht aus, in der Gesteine, Böden, Wasser, Luft und Lebewesen miteinander interagieren (Abb. 17). Wasser und atmosphärische Gase bewegen sich durch die durchlässige kritische Zone, und Organismen gedeihen an ihrer Oberfläche und unter der Oberfläche. Die kritische Zone ist deshalb „kritisch“, weil ihre Funktionen unter Stress komplett zusammenbrechen oder in einen anderen Zustand übergehen können.

Monitoring der Kritischen Zone

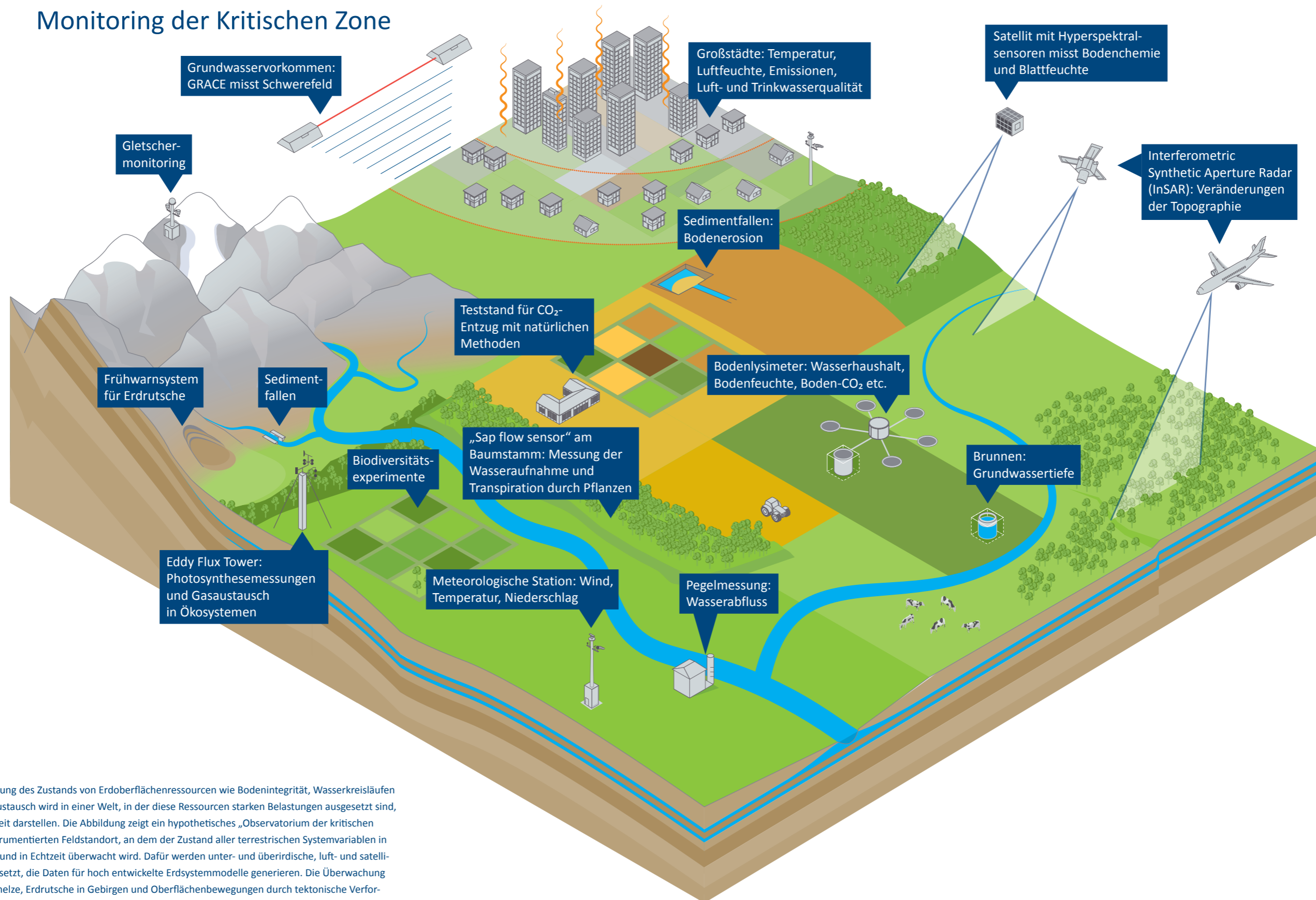


Abbildung 17. Die Überwachung des Zustands von Erdoberflächenressourcen wie Bodenintegrität, Wasserkreisläufen und atmosphärischem Gasaustausch wird in einer Welt, in der diese Ressourcen starken Belastungen ausgesetzt sind, eine essenzielle Notwendigkeit darstellen. Die Abbildung zeigt ein hypothetisches „Observatorium der kritischen Zone“, einen hochgradig instrumentierten Feldstandort, an dem der Zustand aller terrestrischen Systemvariablen in hoher räumlicher Auflösung und in Echtzeit überwacht wird. Dafür werden unter- und überirdische, luft- und satellitengestützte Sensoren eingesetzt, die Daten für hoch entwickelte Erdsystemmodelle generieren. Die Überwachung kann auch die Gletscherschmelze, Erdbeben in Gebirgen und Oberflächenbewegungen durch tektonische Verformung oder Veränderungen der Grundwasserspeicherung umfassen. Die Abbildung zeigt außerdem die Überwachung des Ressourcenaustauschs zwischen Stadt und Land, was Priorität haben wird, wenn bis 2100 – wie es prognostiziert wird – tatsächlich die Hälfte der Erdbevölkerung in Megastädten lebt. Nach Kögel-Knabner et al. (2018).

Die Wissenschaft der kritischen Zone beinhaltet den Betrieb einer globalen Reihe von hoch entwickelten Feldobservatorien, die die Gas-, Wasser-, Boden- und Gesteinsströme und die beteiligten biogeochemischen Umwandlungen in Echtzeit und in der jüngeren geologischen Vergangenheit überwachen. Zu den wichtigsten Fragen zählen dabei: 1) Wie steht die Verbreitung von Energie und Materie mit Porosität, Rissbildung, Permeabilität, Aggregation, Textur und Mikroorganismen in Verbindung, und wie verteilen sich diese Muster in der Tiefe und über Landschaften hinweg? 2) Welche Ausmaße, welche Diversität und welche Funktion weist die „tiefe Biosphäre“ unter der Erdoberfläche auf, und was erhält ihre metabolischen Funktionen aufrecht? 3) Wie entwickeln sich Leistungen der Kritischen Zone, betrachtet aus der Perspektive der „Beiträge der Natur für den Menschen“ (Nature’s Contributions to People), die als umfassenderer Ansatz vorgeschlagen wurde und auf den Ökosystemleistungen beruht, aber darüber hinausgeht, als Reaktion auf menschliche und natürliche Einflüsse? Diese Frage ist in Stadtssystemen und Stadt-Land-Übergangszonen besonders relevant. 4) Wieviel Einfluss haben Wetterextreme auf die Leistungen der kritischen Zone, wie verändert der Klimawandel Prozesse in der kritischen Zone und wie beeinflusst er die Rückkopplungen zwischen Klima, Vegetationsbedeckung und Gestein über verschiedene Zeitskalen hinweg? 5) Wie können Forschungsergebnisse zur kritischen Zone zur Entwicklung von Strategien für eine global nachhaltige Bodennutzung verwendet werden? Diese Frage beinhaltet auch die Entwicklung von Strategien zum Aufhalten oder zur Umkehrung der Bodendegradation und zur Wahrung oder Wiederherstellung globaler Ökosystemfunktionen und der Bodengesundheit.

Was wird benötigt?

Ressourcen der tiefen Erde und Tiefsee

Für künftige Klima- und Kohlenstoffmodelle ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Konsequenzen der Ressourcen- und Materialnutzung zum Bestandteil solcher Modelle werden. Die Mineralogie und Materialwissenschaften müssen Fachwissen aus der Grundlagenforschung auf die Exploration wertvoller Ressourcen in spezifischen geologischen Formationen übertragen. Gleichzeitig sind für die Charakterisierung von Metallvorkommen und deren Extraktion aus Gesteinen auch ein breites analytisches und materialwissenschaftliches Fachwissen sowie der Einsatz großer geochemischer Datenbanken, geochemischer Kartierung auf Grundlage der Fernerkundung und Algorithmen des maschinellen Lernens für die Suche nach Ressourcen gefragt. Es ist unerlässlich, die Auswirkungen von Extraktionsverfahren und -vorgängen zu evaluieren und in die richtige Richtung zu lenken, um deren Umweltauswirkungen bei der künftigen Nutzung zu minimieren. Wir müssen aber auch sicherstellen, dass lokale Gemeinschaften vom Abbau dieser neuen Metalle profitieren und nicht dadurch geschädigt werden.

Die Aufnahme eines Dialogs zwischen den Interessengruppen, die diese Metalle benötigen, und denen, die sie fördern, ist ein Schritt in die richtige Richtung. Dies beinhaltet auch verbesserte geochemische Fingerabdrucksysteme zur Nachverfolgung der Quelle und des geografischen Ursprungs von Metallen und die Sicherstellung eines sozial verantwortlichen Abbaus und Handels, um zu gewährleisten, dass Entwicklungsländer ohne negative Auswirkungen auf ihr Wohlergehen, ihr Sozialgefüge und ihre Umwelt von ihren wirtschaftlichen Reserven profitieren. Ebenso sind zur Minimierung der ökologischen Auswirkungen des Tiefseebergbaus strenge Regeln erforderlich, da dieser sonst eventuell als eine praktische Alternative zur Vermeidung der sozioökonomischen Kosten des Bergbaus an Land betrachtet werden könnte.

Um gewonnene Materialien effizient nutzen und neue Technologien ermöglichen zu können, muss die Erdsystemwissenschaft, vor allem die Mineralogie, mit den Materialwissenschaften zusammenarbeiten. Neue, intelligente Materialien und Technologien, wie zum Beispiel Pipelines, die Diffusionsverluste von Wasserstoff während des Langstreckentransports verhindern, werden von zentraler Bedeutung sein.

Nutzung des tiefen Untergrunds für Geothermie und Speicherung

Um tiefe geothermische Energieressourcen zu nutzen und gleichzeitig die damit verbundenen Risiken zu mindern, ist ein langfristiger Betrieb von Versuchsanlagen im Untergrund erforderlich, der mit numerischen Simulationen des reaktiven Transports von Flüssigkeiten gekoppelt werden sollte, einschließlich der Quantifizierung von Unsicherheiten und Risiken. Eine bessere Datenverfügbarkeit und 3D-Modelle werden das Verständnis des Untergrunds erheblich verbessern. Alle Daten sollten in gemeinsamen Systemen frei verfügbar sein. Bei Anlagen, die sich in dicht besiedelten Gebieten befinden, müssen Konzepte zur Vertrauensbildung in der Öffentlichkeit entwickelt werden. Die Nutzung des Untergrunds zur Energieerzeugung, -speicherung und -beförderung erfordert integrierte Forschungsprojekte unter Beteiligung von Geowissenschaften, Chemie und Ingenieurwissenschaften. Eine Hauptaufgabe wird sein, Untergrundrisiken und -unsicherheiten, einschließlich gesellschaftlicher Risiken nichttechnischer Natur, auf Grundlage von Modellierungen erfolgreich zu managen. Dafür bedarf es einer engen Zusammenarbeit zwischen Erdsystemwissenschaftlern, Regierungen und der Industrie sowie einer guten Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Für die Entwicklung solcher Anlagen müssen wichtige Entscheidungen im vollen Bewusstsein der unvermeidlichen Abhängigkeiten getroffen werden, die sich zwischen geologischen Bedingungen, Technologie und gesellschaftlicher Reaktion entwickeln.

Erdoberflächenressourcen in der Kritischen Zone

In einem Erdsystemkontext sollten drei Komponenten als Grundlage für die künftige Wasser- und Bodenforschung in der kritischen Zone dienen.

Monitoring

Die Erforschung der kritischen Zone erfordert 1) den Aufbau eines Netzwerks globaler Umwelt- und ökologischer Observatorien, die fortschrittliche Sensortechniken einsetzen, um Veränderungen in Echtzeit zu überwachen (wie für Deutschland in einem Bericht der „Allianz der Wissenschaftsorganisationen“ detailliert dargelegt); 2) ihre Unterstützung durch weltraumgestützte Beobachtungen; 3) den Einsatz neuartiger „Omics“-Technologien zur Erforschung mikrobieller Funktionsgruppen und die Ergründung neuer Abbauwege für den biogeochemischen Nährstoffkreislauf; 4) die Entwicklung von Datenmanagement-Tools für Zeitreihen-Beobachtungsdaten, die von einer Vielzahl staatlicher und akademischer Organisationen gesammelt werden; und 5) die Nutzung von weltraumgestützten Beobachtungen der Landoberfläche.

Modellierung

Zu entwickeln ist eine neue Generation regionaler bis globaler hydrologischer Modelle sowie von Vegetations- und Landoberflächenmodellen, die die Wechselwirkungen zwischen Gestein, Boden, Wasser, Luft und lebenden Organismen genau darstellen und die menschlichen Aktivitäten in der kritischen Zone berücksichtigen. Diese Modelle werden sich auf Schätzungen der globalen Süßwasserflüsse und der Verfügbarkeit von Ressourcen stützen, die aus Überwachungsdaten abgeleitet werden, sowie auf Muster natürlicher und anthropogener Faktoren. Erdbeobachtungssysteme müssen Ökosys-

tem-Rückkopplungen für Extremereignisse (z. B. Dürren, Überflutungen, Brände, Insektenbefall) ermitteln, um Krisen in Pflanzenbau und Nahrungsmittelversorgung zu simulieren. Der Mensch als Akteur, der auf die kritische Zone einwirkt, ist in solche Modelle einzubeziehen. Oberflächennahe Aquifere bis zu einer Tiefe von 100 Metern werden für die Versorgung mit Trinkwasser und geothermischer Energie eine wichtige Rolle spielen. Beide Nutzungen erfordern ähnliche Untergrund-3D-Modellierungen der geologischen Strukturen, insbesondere detaillierte Modelle der Reservoirarchitektur unterhalb von Städten.

Management

Es müssen neuartige Analyseschemata und -werkzeuge entwickelt werden, um die komplexen Sozialdynamiken als Reaktion auf die Wasserverknappung zu untersuchen, zusammen mit der Entwicklung einer modernen soziohydrologischen Theorie (d. h. einer Theorie, die beschreibt, wie Menschen und ihre Handlungen sich im Zusammenspiel mit hydrologischen Systemen entwickeln). Diese Maßnahmen sollten durch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ergänzt werden, die zum Ziel haben, den organischen Materiegehalt in Böden zu erhöhen, die Vegetation der Bodenoberfläche zu erhalten, Nährstoffe wie Phosphor sinnvoll und nachhaltig anzuwenden und zu nutzen, um Fruchtfolgen zu unterstützen, und nachhaltige Forstmethoden mit dem Ziel einzusetzen, fossilen Kohlenstoff zu ersetzen und Tropenwälder mit Blick auf ihre Ökosystemleistungen zu erhalten. Diese Ansätze müssen darauf ausgerichtet sein, die Auswirkungen und die Praktikabilität von Negativemissionstechnologien zu bewerten.

4 Big Data in der Erdsystemwissenschaft

Die Erdsystemwissenschaft produziert und ist zunehmend abhängig von enormen Datensätzen und numerischen Simulationen. Deren effektive Nutzung erfordert die Entwicklung, Handhabung und Wartung von Software-Frameworks, die als Schnittstelle für gigantische, heterogene Datenmengen dienen. Zwar macht jede neue Generation intelligenter Technologie das Leben einfacher, gleichzeitig sind neue Technologien bei der Analyse und Simulation großer Datenmengen oft disruptiv. Ohne einen Paradigmenwechsel in der Art und Weise, wie (E-)Infrastruktur unterstützt wird, wird die Erdsystemwissenschaft nicht in der Lage sein, die Möglichkeiten, die die Cyberwelt bietet, auszuschöpfen.

4.1 Große Herausforderungen durch große Datenmengen: Big Data

Angesichts der Billionen von Gigabytes an Informationen, die jedes Jahr von der Weltbevölkerung erzeugt werden, ist der Begriff „Big Data“ inzwischen weit verbreitet. Wie sieht die Situation in den Geowissenschaften aus? Ein Merkmal der Daten im Bereich der Geowissenschaften ist ihre Heterogenität. Die Beantwortung wissenschaftlicher Fragen erfordert oft die Integration von Datentypen, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus anderen Disziplinen generieren. Um zum Beispiel die Geschichte und Entwicklung der Kryosphäre der Erde nachzuverfolgen – was für Klimastudien entscheidend ist –, müssen beispielsweise Daten von satellitengestützten Fernerkundungstechnologien, eine Vielzahl atmosphärischer Messungen und boden- oder luftgestützte Daten analysiert werden, die oftmals als Zeitreihendaten erhoben werden. Diese Daten werden noch durch geologische Beobachtungen, komplexe Laboranalysen und Ergebnisse aus Modellsimulationen ergänzt. Die Herausforderung besteht darin, diese Daten und ihre Metadaten in international standardisierten georeferenzierten Formaten verfügbar zu machen, die Kompatibilität gewährleisten und eine disziplinenübergreifende Verwendung ermöglichen. Es gibt zwar national wie auch international Bemühungen, diese Herausforderung anzugehen, es fehlen jedoch häufig auf der Ebene von Forschungsgruppen das technische Fachwissen und vor allem die Ressourcen für die Anpassung an neue Standards.

Das verstärkte Monitoring des Erdsystems hat dazu geführt, dass einige Bereiche der Erdsystemwissenschaft als datenreich gelten (z. B. Seismologie, Geodäsie, Meteorologie und Klimaforschung), dennoch bleibt das Datenvolumen im Vergleich zu anderen Gebieten wie der Hochenergiephysik und Astrophysik zurück. Diese Situation ist nun im Wandel begriffen:

- 1) Zum einen werden riesige, wertvolle satellitengestützte Fernerkundungsdatensätze zunehmend öffentlich zugänglich gemacht, z. B. durch das europäische Copernicus-Programm und seine Sentinel-Satelliten (siehe auch USGS Earth Explorer, Google Earth Engine, chinesisches CASEarth-Projekt). Die Dateninfrastruktur der Erdsystemwissenschaft ist aber noch nicht so aufgestellt, dass sie diese Daten erfassen, verarbeiten, speichern und analysieren kann.

- 2) Zum anderen hat Technologie die Art und Weise revolutioniert, wie beobachtbare globale Erdsystemkomponenten in unterschiedlichsten Bereichen überwacht werden. Dazu zählen beispielsweise kontinentale Wasserkreisläufe, die Hangstabilität in Gebirgen, Veränderungen der Landnutzung und Vegetation oder gefährdete Regionen, z. B. in der Nähe aktiver Vulkane, und potenziell gefährliche seismogene Störungen. Günstige, kabel-ungebundene Sensoren in großer Anzahl (Large-N-Netzwerke) sowie vollkommen neue Sensortechnologien (z. B. Dehnungsmessungen mit öffentlichen Glasfaserkabeln) werden heute verbreitet eingesetzt. Auch schwarmbasierte Drohnenüberwachungstechnologien werden künftig riesige Mengen an Bild- und Sensordaten mit sehr hoher Auflösung liefern. Diese Technologien liefern immer höhere räumliche und zeitliche Auflösungen, generieren aber auch Datenmengen, die um ein Vielfaches größer sind als die in der Vergangenheit. Es gibt jedoch keine zentrale Stelle, an der diese globalen und regionalen Beobachtungsdaten erfasst, vereinheitlicht und kompatibel und weltweit zugänglich gemacht werden.
- 3) Zudem erzeugen beispielsweise in der Geomikrobiologie Genominstrumente nie dagewesene Mengen an Sequenzierungsdaten von Organismen von der Erdoberfläche, Wasser oder Sediment, deren Speicherung, Reproduzierbarkeit und Langlebigkeit nicht durch austauschbare Standards unterstützt werden.
- 4) Auch die Öffentlichkeit sammelt immer mehr Daten (z. B. durch Beschleunigungssensoren in Mobiltelefonen). Diese „Citizen Science“-Daten, die von Millionen Sensoren stammen, liefern Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern Echtzeitinformationen, die für Frühwarnsysteme zur Warnung vor Naturgefahren und für potenzielle Reaktionsmaßnahmen hochrelevant sind.
- 5) Zu guter Letzt haben Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler in der Vergangenheit riesige Mengen analoger Daten aus vielfältigen geologischen Archiven gesammelt und tragen weiterhin solche Daten zusammen. Diese unschätzbar wertvollen Daten müssen den wissenschaftlichen Gemeinschaften in digitaler Form zugänglich gemacht werden, sowohl für den Austausch von bestehendem Wissen und die Prüfung von Hypothesen als auch für die Entwicklung eines tieferen Verständnisses der Zusammenhänge zwischen dem Systemverhalten auf verschiedenen Zeitskalen, von der instrumentell aufgelösten Zeitskala bis zur langfristigen geologischen Zeitskala.

Big Data stellt die Erdsystemwissenschaft daher vor gewaltige Herausforderungen in Bezug auf die weitere Verarbeitung und Modellentwicklung. Datenarchive müssen in physischer Nähe zu CPU-reicher Infrastruktur (Hochleistungsrechenzentren) etabliert werden, um das Konzept der langfristigen domänenspezifischen Computerinfrastruktur zu unterstützen und effizientes Testen von Hypothesen durch das Zusammenspiel von Big Data mit der erforderlichen Rechenleistung zu ermöglichen.

4.2 Dateninfrastruktur – die Bereitstellung von Big Data

Bei der Verwendung von rohen, unverarbeiteten Daten müssen die Verarbeitungsschritte so kodiert werden, dass nachfolgende Ergebnisse vollständig reproduzierbar sind. Bei der Nutzung sekundärer, aus komplexen Workflows abgeleiteten Produkten muss die Herkunft der Daten einheitlich dokumentiert, gespeichert und dauerhaft zu-

gänglich gemacht werden, um die Qualitätskontrolle und die Quantifizierung von Unsicherheiten für alle nachfolgenden Modellierungen und Hypothesenaufstellungen zu gewährleisten. Die wissenschaftliche Gemeinschaft ist bisher auf keinen dieser Aspekte angemessen eingegangen. Es werden gemeinsame Formate und Standards benötigt, die eine eindeutige Identifizierung der Quellen von Unsicherheiten entlang des gesamten wissenschaftlichen Arbeitsablaufs und eine wissenschaftlich fundierte Datenreplikation ermöglichen.

Sollte es zentrale Zugangspunkte zu allen georeferenzierten Erdsystemdaten geben? Stellen wir uns ein Datenportal vor, das Zugang zu Echtzeit- und Zeitreihendaten über lange Zeiträume bis in die geologische Vergangenheit (z. B. Bodenbewegungen, Temperatur, Regen, geologische Daten) und Zugang zu abgeleiteten, sekundären Produkten (z. B. Landnutzung, Bodenbedingungen, Krustendeformation) für alle Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie die Öffentlichkeit bietet. Ein solches Datenportal der Erdsystemwissenschaften wäre zweifellos ein mächtiger Wegbereiter für alle Bereiche der Geowissenschaften, insbesondere für die Gefahren- und Risikovorhersorge. Es entspräche der „Open Data“- und „Open Source“-Philosophie, die nationalen und europäischen Förderprogrammen für Forschungsdateninitiativen wie NFDI4Earth¹⁵ (Nationale Forschungsdaten Infrastruktur der Erdsystemwissenschaften) und EPOS (European Plate Observing System) zugrunde liegt. Unternehmen wie Google (Google Earth Engine, derzeit mit Fokus auf Satellitendaten) ebnen hierzu den Weg und zeigen, dass die Technologien zum Erreichen dieses Ziels existieren. Zu bedenken ist jedoch, dass der Aufbau einer solchen E-Earth-Infrastruktur – einschließlich eines Geo-Cloud-Systems wie Gaia-X – stetige Investitionen wie jene in große Forschungsinfrastrukturen in der Physik, Astronomie und Meeresforschung erfordert.

4.3 Maschinelles Lernen – Optionen für verrauschte Daten und unbekannte Zusammenhänge

Große Erdsystemdatensätze erfordern automatisierte Analysestrategien. In vielen Fällen gibt es ein physikalisches Verständnis (oder Modell), das den Input von potenziell verrauschten und unsicheren Daten mit dem gewünschten Output in Beziehung bringt. Klassische Beispiele dafür sind die automatisierte Evaluierung der Ursprungszeit, Lage und Magnitude von global beobachteten Erdbeben oder die Vorhersage der Bewegungsbahn eines Hurrikans basierend auf Datenassimilation und Fluidodynamikmodellen der Atmosphäre. In diesen Fällen können modernste statistische Modelle die entscheidende quantitative Bewertung von Unsicherheiten für die Vorhersage liefern. In Fällen, in denen große, komplexe Datensätze ohne quantitative Modelle zur Input-Output-Zuordnung analysiert und interpretiert werden müssen, kommen Werkzeuge des maschinellen Lernens (ML), insbesondere das Deep Learning ins Spiel. Wenn ausreichend echte (oder synthetische) Kombinationen von Input- und Output-Parametern zum Trainieren eines ML-Algorithmus zur Verfügung stehen, ist eine unmittelbare Antwort auf komplexe Mustererkennungsprobleme möglich. Dies wird in Situationen wie der Frühwarnung, in denen schnelle Analysen und Reaktionen entscheidend sind, immer wichtiger werden. Außerdem hat sich gezeigt, dass sich ML-Algorithmen besser für das Filtern von stark verrauschten Daten eignen als traditionellere Ansätze.

¹⁵ Siehe <https://www.nfdi4earth.de/>

Wenn die Erdsystemdatenintegration Erfolg hat, könnten auf künstlicher Intelligenz (KI) beruhende Werkzeuge, die in der Big-Data-Gemeinschaft zunehmend entwickelt werden, weitere Möglichkeiten eröffnen. Die automatisierte Analyse sehr großer Datensätze könnte verborgene Korrelationen, Strukturen und Verbindungen zwischen beobachteten Größen aufdecken, die bisher übersehen wurden. Die Aufgabe für die Erdsystemwissenschaft besteht darin, sich diese neuen Technologien in relevanten Anwendungsbereichen zunutze zu machen, was eine engere Kooperation mit den entsprechenden Bereichen der Mathematik und Computerwissenschaft als bisher erfordert.

4.4 Digitale Zwillinge der Erde entwickeln

Digitale Zwillinge sind detailgenaue Virtualisierungen physischer Objekte und Systeme. Diese werden in technischen Bereichen bereits für Aufgaben wie Maschinenoptimierung und Hafenmanagement eingesetzt. Im Rahmen der Erdsystemwissenschaft werden digitale Zwillinge die Entwicklung von Szenarien für künftige Zustände und Veränderungen des Erdsystems, die Einschätzung der möglichen Resultate und Risiken vorgeschlagener Maßnahmen und die Erarbeitung von Optionen für nachhaltige Pfade ermöglichen (Abb. 18). Das Konzept der digitalen Zwillinge gewinnt in der Geowissenschaft zunehmend an Bedeutung, insbesondere als Möglichkeit der intuitiven Bündelung von und des einfachen Zugriffs auf Umweltdaten, -modelle und -simulationen. Ein gut konstruierter digitaler Zwilling der Erde wird es einem breiteren Nutzerkreis ermöglichen, mit digitalen Ressourcen zu interagieren, um gegenwärtige und künftige Szenarien zu erforschen, insbesondere in Bezug auf die Interaktion des Menschen mit dem Erdsystem. Die Entwicklung eines digitalen Zwillings der Erde erfordert internationales Engagement und entsprechende Ressourcen, denn die massive Generierung numerischer Daten sowie deren Verarbeitung und Speicherung ist eine Aufgabe, die nur mit internationalen Bemühungen zu bewältigen ist. Das Ergebnis wird es den Nutzern ermöglichen, eine Familie von anwendungsorientierten digitalen Zwillingen zu schaffen, die gemeinsam Zugriff auf eine Vielzahl von Erdsystemdaten, Vorhersagesystemen und Prognosen hätten. Da im gesamten „digitalen Ökosystem“ der Erde immer mehr digitale Zwillinge entstehen werden, ist es von entscheidender Bedeutung, dass wir einen Rahmen schaffen, der ihre Interoperabilität gewährleistet. Durch einen solchen Rahmen von digitalen Zwillingen können Prognose- und Vorhersagekapazitäten schneller vergrößert und zusammengeführt werden, um notwendige Entscheidungen durch die Erforschung von „Was wäre, wenn“-Szenarien wissenschaftlich fundiert zu unterstützen.

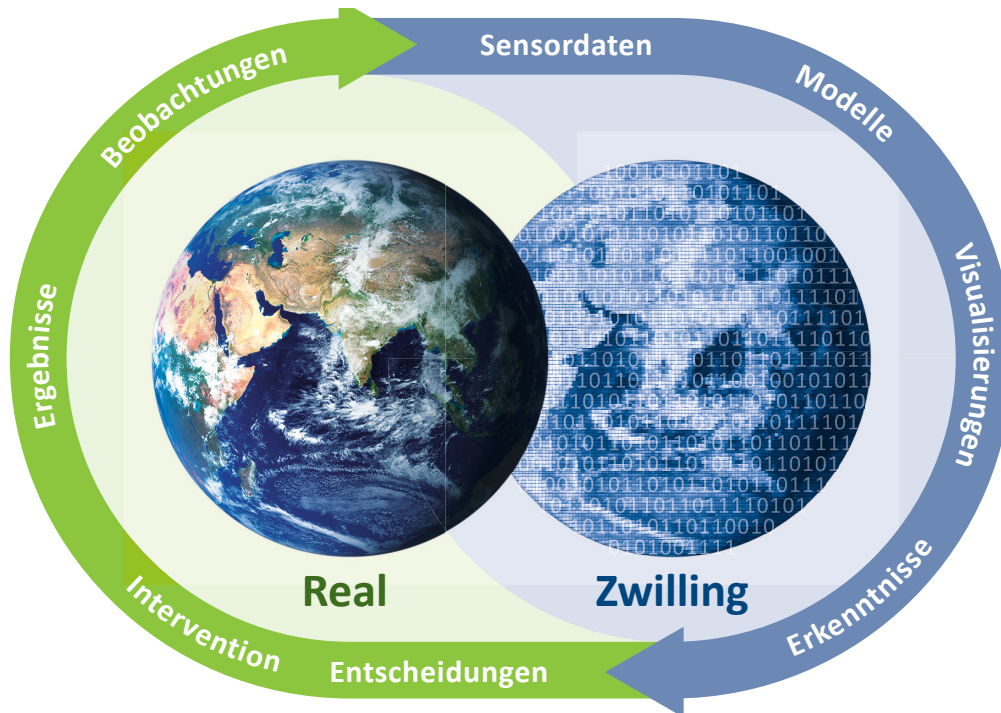


Abbildung 18. Konzept des „Digitalen Zwillings“ des Erdsystems. Ein digitaler Zwilling des Erdsystems ist ein virtuelles Modell, das das echte Erdsystem akkurat abbildet. Das zu untersuchende Subsystem – z. B. das Erdoberflächensystem – wird mit verschiedenen Sensoren ausgestattet, die die wichtigen Feedback-Parameter registrieren. Diese Sensoren liefern Daten zu verschiedenen Funktionen des Subsystems wie Materie- und Energiekreisläufen, Klima-Biosphäre-Geosphäre-Rückkopplungen und vielem mehr. Die Daten werden dann an ein Verarbeitungssystem weitergeleitet und auf die digitale Kopie übertragen. Sobald solche Daten verfügbar sind, kann das virtuelle Modell für Simulationen, die Untersuchung von Wechselwirkungen, die Ermittlung von Schwellen und die Ausarbeitung möglicher Trajektorien verwendet werden. Die so gewonnenen wertvollen Erkenntnisse werden dann wieder auf das physische Originalobjekt zurückübertragen und können zur Entwicklung möglicher Lösungen genutzt werden. Foto: NASA.

4.5 Die Computer der Zukunft – die Rolle der Skalierung

Die Datenwelt ist parallel. Während High-End-Rechenanlagen bereits seit Jahrzehnten mit parallelen Prozessorsystemen arbeiten, beruhen heute selbst Smartphones, Laptops und PCs auf Multiprozessorhardware. Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Erdsystemwissenschaft, wo Fortschritte in erheblichem Maße von komplexer Prozesssimulationssoftware abhängen, die auf Supercomputersystemen der neuesten Generation einwandfrei läuft und gut skalierbar ist? Die Konsequenzen sind vielfältig und in vielerlei Hinsicht herausfordernd. Sie erfordern einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Art und Weise, wie die digitale Erdsystemwissenschaft in der Zukunft betrieben wird.

Insellösungen für Rechenprobleme, die von einzelnen Forschungsgruppen entwickelt werden, sind in vielen Fällen keine effiziente Option mehr. Die schnelle Entwicklung von Computerhardware (z. B. Cluster von GPU- und CPU-Prozessoren) hat eine große Bedeutung. Gemeinschaftliche Softwarelösungen, die in Zusammenarbeit mit Computerwissenschaftlern professionell entwickelt und gepflegt werden, stellen die einzige Möglichkeit dar, Softwarelösungen nachhaltig nutzbar zu machen, die Spitzenforschung ermöglichen. Probleme bei der Erdsystems simulation werden dank der hohen räumlichen Auflösung, die erforderlich ist, um das realistische Verhalten von atmosphärischen Prozessen, Strömungsprozessen im Erdinneren oder der Erzeugung des

Magnetfelds der Erde auch nur annähernd abzubilden – von der Quantifizierung der damit einhergehenden Unsicherheiten ganz zu schweigen – selbst den größten Supercomputern reichlich Arbeit bereiten.

Wir müssen uns heute auf nationaler und internationaler Ebene zusammenschließen, um die Lücken zwischen Theorie, Modellen und Beobachtungen zu schließen und der Erdsystemwissenschaft die entsprechende Rechenmaschine bereitzustellen, die zu der gigantischen und rasant wachsenden Beobachtungsinfrastruktur passt. Wie die Erdsystemdatendienste selbst ist auch die Unterstützung der Simulations- und Datenverarbeitungsmöglichkeiten eine enorme Aufgabe, für die es einer neuen Generation IT-kundiger Erdsystemwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler bedarf, die an der Schnittstelle zwischen Computerwissenschaft und Erdsystemwissenschaft agieren können. Forschungseinrichtungen und Universitäten sollten sich anpassen, Aus- und Weiterbildung sowie attraktive Karrierewege für diese neue Generation von Erdsystemwissenschaftlern anzubieten und ihren Einfluss auf die Generierung neuen Wissens zu erkennen.

4.6 Was wird benötigt?

Zu unterstützen sind gemeinschaftliche Bemühungen, um zukunftsfähige geowissenschaftliche Daten zu sammeln, Datenprodukte zu entwickeln (wie in der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur NFDI4Earth, der europäischen EPOS-Initiative und der Europäischen Open Science Cloud EOSC vorgesehen), Metadatenstandards zu vereinheitlichen und um einen transdisziplinären Datenaustausch zu ermöglichen. Darüber hinaus sind langfristige Strategien für digitale Infrastrukturen mit Zugang zu georeferenzierten Daten über verschiedene Bereiche der Erdsystemwissenschaft hinweg zu etablieren, die einen offenen und einfachen Zugriff auf Echtzeit- und Archivdaten aus Beobachtungszeitreihen unseres Planeten ermöglichen, einschließlich verknüpfter Geo-Cloud-Systeme.

Ein ganz wesentlicher Aspekt ist die Ausbildung einer neuen Generation von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die an der Schnittstelle zwischen Erdsystemwissenschaft und Computerwissenschaft/Data Science agieren. In diesem Zusammenhang geht es auch um die Bereitstellung angemessener Karrieremöglichkeiten auf akademischer Ebene an den Universitäten und um die Entwicklung neu strukturierter Ausbildungsprogramme, die Brücken zur Computerwissenschaft und Mathematik schlagen. Die Entwicklung von Erdsystem-Berechnungsmodellen (digitaler Zwilling der Erde), die die Komplexität natürlicher Prozesse und die Wechselwirkungen zwischen der festen Erde, der sich verändernden Erdoberfläche, der Biosphäre, der Atmosphäre und dem Ozean sowie der Anthroposphäre erfassen, ist weiter voranzutreiben. Gleichzeitig sind für domänenspezifische Daten der Erdsystemwissenschaft und für Hochleistungsrechenzentren langfristige Strategien zu erarbeiten – hier geht es auch um die Mitgestaltung des Zugangs zu großvolumigen Beobachtungsdaten und Simulationen über extreme Größenordnungen.

5 Akademische Ausbildung in Erdsystemwissenschaft

Die in Deutschland mit der Erde befassten Studiengänge bieten gegenwärtig kein eindeutig erkennbares Lehrangebot, das eine übergreifende Perspektive auf das gesamte Erdsystem bietet. Nicht nur behindert dies die Vermittlung eines Verständnisses für den Systemcharakter unserer Erde an die nachrückende Generation. Auch wird die Chance vergeben, diese mit Sorge um die zukünftige Bewohnbarkeit unseres Planeten erfüllte Generation für die Studiengänge der Geowissenschaften zu gewinnen. Die Erdsystemwissenschaft bietet eine Leitidee zur Behebung dieser Defizite: 1) die Entwicklung neuer Curricula in Erdsystemwissenschaft und 2) die Ergänzung bestehender mit der Erde befasster Studiengänge durch Erdsystemmodule. Diese Lehrangebote werden die Faszination einer durch menschliche Neugier angetriebenen Wissenschaft vermitteln. Sie werden außerdem die Studierenden befähigen, zu Lösungen bei der Bewältigung der drängenden Zukunftsfragen beizutragen.

5.1 Die Vielfalt der geowissenschaftlichen Studiengänge

Viele junge Menschen erkennen heute, dass die Erde einem dramatischen Wandel unterworfen ist. Sie sind daher zutiefst besorgt über die Zukunft unseres Planeten, der ihre eigene Zukunft und die ihrer Kinder in erheblichem Maße betrifft. Das akademische System in Deutschland sollte daher ein Angebot bieten, das dieser Generation Werkzeuge an die Hand gibt, die notwendigen Maßnahmen, die für den Erhalt einer lebenswerten Erde notwendig sind, basierend auf wissenschaftlich gesicherten Grundlagen zu entwickeln und einzusetzen.

Doch ein entsprechendes Studienangebot besteht in Deutschland derzeit nicht. Die Curricula in den Geowissenschaften reichen von den einzelnen Wissenschaften der festen Erde (Geologie, Mineralogie, Geo- und Kosmochemie, Paläontologie, Geophysik) über die Wissenschaften der Erdoberfläche (Physiogeographie, Bodenwissenschaften, Geoökologie, Hydrologie und Umweltwissenschaften), die Ozeanographie, den Wissenschaften der Atmosphäre und der Kryosphäre (Meteorologie, Glaziologie; oft als Subdisziplinen der Physik angesiedelt) bis hin zu Disziplinen, die sich mit der Vermessung und Abbildung unseres Planeten befassen (Geodäsie und Fernerkundung, Geoinformatik), sowie der Humangeographie.

Die entsprechenden Studienabschlüsse spiegeln diese Fragmentierung wider, wobei es hier in den letzten zwei Jahrzehnten durchaus Fortschritte gab. So wurde inzwischen an den meisten Standorten ein vereinheitlichtes geowissenschaftliches Curriculum geschaffen, das vor allem die Subdisziplinen der „festen Erde“ vereint: Geologie, Mineralogie, Geo- und Kosmochemie, Paläontologie, Geophysik und die jeweiligen angewandten Bereiche. Immer mehr spezialisierte Studiengänge bewegen sich bereits zwischen den traditionellen Grenzen der Disziplinen. Abschlüsse in „Klimasystemwissenschaft“ oder „Erdsystemwissenschaft“, die für die betroffene Generation mög-

licherweise interessant wären, sind jedoch noch immer kaum vorhanden. Obwohl die Geowissenschaften so viel zu bieten haben, entscheiden sich viele in der Regel für einen Universitätsabschluss in z. B. Physik, Mathematik oder Chemie oder aber bevorzugen Studienangebote im Umweltbereich.

Angesichts der gewaltigen Aufgaben durch den Klimawandel, die Bewirtschaftung und die nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen, die die Erde und ihre belebte Natur uns bietet, aber nicht zuletzt durch den dringenden Bedarf an Lösungen in allen Bereichen der angewandten Geowissenschaft, wird der Druck, neue Studiengänge zu entwickeln und dabei neue Bereiche zu integrieren, zunehmen.

Für die dafür notwendigen innovativen Ausbildungskonzepte bieten das Konzept, die Methoden sowie die neuen technologischen Möglichkeiten der Erdsystemwissenschaft eine hervorragende Leitidee.

5.2 Eine Lehre der Erdsystemwissenschaft

Die Komplexität und Vernetzung aller Teile des Erdsystems und deren dynamische Rückkopplungen wurden in diesem Bericht vielfach beschrieben. Doch an Universitäten werden isolierte Aspekte der Erdsystemwissenschaft häufig nur innerhalb ihrer jeweiligen Subdisziplin gelehrt. Angesichts der aktuellen und künftigen Herausforderungen brauchen wir daher eine breitere Sichtweise in der universitären Ausbildung. Ziel ist es, die nächste Generation von kompetenten Erdsystemwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern auszubilden, die in der Lage ist, neue und spannende Forschungsfragen zum Ursprung unseres Planeten und der Evolution des Lebens auf dem Planeten zu bearbeiten und sich aber auch mit den akuten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Erfordernissen einer Welt im Wandel auseinanderzusetzen.

Eine Ausbildung in der Erdsystemwissenschaft könnte somit die folgenden Elemente umfassen:

- 1) Die Lehre der Erdsystemwissenschaft vermittelt Studierenden ein grundlegendes Verständnis dafür, wie unser Planet entstanden ist, wie er funktioniert, Leben ermöglicht und was die natürlichen Voraussetzungen für die Entwicklung der modernen Gesellschaften sind. Die Ausbildung vertieft die Fähigkeiten der Studierenden, neue Analyse- und Monitoringwerkzeuge zur Erdbeobachtung zu entwickeln und anzuwenden. Dies kann durch praxisbezogene Erhebung und Interpretation von Daten als Grundlage für die Beantwortung neuer wissenschaftlicher Fragestellungen erfolgen oder qualifizierte Arbeitskräfte zur Lösung konkreter Probleme im angewandten Bereich befähigen.
- 2) Erdsystemwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sollen befähigt werden, mit großen Datensätzen umzugehen, die sie analysieren und evaluieren können, einschließlich der Methoden des maschinellen Lernens. Diese Datenkompetenz („Data Literacy“) wird sie auf moderne Forschung und eine Vielzahl von Beschäftigungsmöglichkeiten über die klassischen Geowissenschaften hinaus qualifizieren.

- 3) Im Fokus einer modernen Erdsystemlehre steht der Systemcharakter des Planeten Erde. Daher sollten in neue Studiengänge die Konzepte der Systemwissenschaft und des nicht-linearen Verhaltens von komplexen, oft chaotischen Systemen vermittelt werden.
- 4) Die Lehre der Erdsystemwissenschaft sollte neue Lehrmethoden einschließlich neuer virtueller Lernumgebungen enthalten, die sich nachweislich positiv auf das Lernen der Studierenden auswirken.
- 5) Künftige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden befähigt, Wissen weiterzugeben. So können sie relevante Akteurinnen und Akteure, Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit kompetent informieren. Diese Fähigkeit ist essenziell für die Politikberatung und die Vorbereitung der Gesellschaft auf die Folgen von voraussichtlichen Umweltveränderungen im Anthropozän und zur Formulierungen von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel.
- 6) Wegen der Wichtigkeit für unsere Zukunft sollen grundlegende Aspekte der Erdsystemwissenschaft ein fester Bestandteil von Schullehrplänen an weiterführenden Schulen sein. Ziel ist zum einen, eine gut informierte Gesellschaft zu erreichen, die für die kommenden Umbrüche vorbereitet ist, und zum anderen eine nächste Generation von Studierenden und Forschenden für diesen Bereich zu gewinnen.

Eine hier skizzierte Neuorientierung in Richtung eines Curriculums für Erdsystemwissenschaft wird zwangsläufig in einem Spannungsverhältnis stehen zwischen den bestehenden Studiengangstrukturen und der Notwendigkeit, frühzeitig den „größeren Zusammenhang“ in die Ausbildung miteinzubeziehen. Die neu zu entwickelnden akademischen Ausbildungsangebote können deshalb an die Grundausbildung in den bestehenden geowissenschaftlichen Disziplinen anschließen. So bleiben die Spezialkompetenzen der Disziplinen erhalten. Alternativ könnte ein Curriculum in den Erdsystemwissenschaften die Grundlage für eine spätere Vertiefung in den geowissenschaftlichen Spezialdisziplinen bieten.

Wir erläutern diese Ansätze im Folgenden und vertiefen sie in einzelnen Aspekten.

5.3 Geowissenschaften mit weiteren Naturwissenschaften stärker kombinieren

Wir regen die Etablierung eines Fachgebiets an, das eindeutig den Naturwissenschaften zugeordnet ist und das die Grundelemente der Geowissenschaften mit denen der anderen Naturwissenschaften kombiniert. In geowissenschaftlichen Fakultäten in anderen Teilen der Welt ist dies bereits vielfach der Fall. Die grundlegenden Konzepte der Naturwissenschaften bilden in jedem Fall das Fundament der Erdsystemforschung und -ausbildung, sie werden auch für sämtliche angewandten und lösungsorientierten Bereiche der Geowissenschaften immer relevanter werden.

Eine besondere Herausforderung wird sein, eine bisher vernachlässigte Gruppe von Studierenden mit besonderem Interesse an naturwissenschaftlichen und mathematischen Grundlagen für das aufstrebende Feld der Erdsystemwissenschaft zu gewinnen. Solche Studierende schreiben sich z. B. für beliebte Grundlagenfächer wie z. B. die As-

trophysik, Kosmologie, Molekularbiologie oder Festkörperchemie ein. Die Erdsystemwissenschaft mit ihren ebenso fundamentalen Fragen wie zum Ursprung der Planeten und des Lebens sollte eine gleichwertige Faszination auf diese Zielgruppe ausstrahlen.

Ein neues Lehrangebot im Kontext der Erdsystemwissenschaft sollte attraktiv sein für Studierende, die sich für die Grundlagenforschung interessieren, aber ebenso für diejenigen, die eine Beschäftigung in den Bereichen Umwelt-Überwachung, Planung und Verwaltung suchen („Diagnose“ von Problemen). Auch diejenigen, die in angewandten Bereichen wie Umweltgeologie, Geotechnologie, Hydrogeologie, Wirtschaftsgeologie und Materialwissenschaft arbeiten werden, würden von dem erweiterten Kontext in der Lehre profitieren. Das Curriculum der Erdsystemwissenschaften wird außerdem enge Verbindungen haben zu anderen Disziplinen wie Humangeographie, Geoökologie und Geoinformatik.

5.4 Neue Technologien einsetzen

Fortschritte in den Geowissenschaften beruhen schon immer auf der Einführung neuer Beobachtungs- und Analysewerkzeuge. Die moderne Erdsystemwissenschaft und deren Anwendung erfordern zusätzliche Kompetenzen z. B. in der Datenwissenschaft und im Umgang mit hochauflösenden Sensordaten von Satellitenbeobachtungen zu Erdoberflächenprozessen, die Echtzeitanalysen von Luft-, Wasser-, Ozean- und Bodenparametern liefern. Zusätzlich werden die modernsten analytischen Geräte eingesetzt – von der Spurenelement-, Isotopen- und Festkörperanalytik bis zur Nanometer-Skala –, die es ermöglichen, die Entwicklung des Planeten im Inneren und seiner Kruste an der Erdoberfläche und seine natürlichen biogeochemischen Zyklen und vergangene Klimazustände zu rekonstruieren. Leistungsfähige Methoden der anorganischen und organischen geochemischen Analytik und molekularbiologische Methoden sind in der Umweltüberwachung und Umweltgeochemie ein essenzielles Werkzeug. Geophysikalische Methoden und die dazugehörigen numerischen Auswerteverfahren sind bedeutsam zur Sondierung des oberflächennahen und tiefen Untergrundes. Auch Experimental- und Synthesetechniken der Materialforschung gehören zum Instrumentarium. Numerische Simulationen auf der Basis mathematischer Modelle werden eingesetzt, um die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Erdsystems, einschließlich des Menschen, zu modellieren.

Im Vergleich zu anderen wissenschaftlichen Disziplinen ist die Kompetenz im Umgang und in der Analyse großer komplexer Datenmengen („Data Literacy“) in den Erdsystemwissenschaften dreigeteilt: 1) Daten aus der Erdsystemwissenschaft stehen meist in einem eindeutigen räumlichen Kontext, 2) sie beziehen sich oft auf Direktbeobachtungen, physikalische Proben oder Modellergebnisse und 3) liegen sie zunehmend in außergewöhnlich großen Datenmengen vor (d. h. einzelne Datensätze übersteigen oft mehrere Terabyte im zehnstelligen Bereich). Auch Daten, die im Zusammenhang mit der Interaktion der Menschen mit den Ressourcen der Erde stehen, weisen häufig diese Merkmale auf. Angesichts der rasant steigenden Mengen von Erdbeobachtungsdaten in allen Bereichen ist die Einführung einer grundlegenden und fortgeschrittenen akademischen Ausbildung in der Verwaltung und Analyse von Forschungsdaten unerlässlich. „Data Literacy“ wird künftige Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler in die Lage versetzen, ihre eigenen Daten FAIR (Findable, Accessable, Interoperabel, Reusable) zu publizieren und auch das Potenzial und die Fülle weltweit wachsender

Datenmengen auszuschöpfen. Sogar die künftige Lehre wird neue Methoden der Datenvisualisierung, einschließlich voll-immersiver Virtual-Reality-Methoden im Unterricht, beinhalten.

Diese komplexen Methoden und ein festes Verständnis der grundlegenden Bedeutung quantitativer analytischer Datenwerkzeuge erfordern solide Grundlagenkenntnisse in den Bereichen Mathematik, Statistik, Physik, Chemie, Biologie sowie Daten- und Computerwissenschaft. Daher muss die universitäre Ausbildung in allen geowissenschaftlichen Lehrplänen schon früh einen größeren Schwerpunkt auf MINT-Wissenschaften (Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften, Technik) legen und IT/Data Literacy an der Schnittstelle zwischen Erdsystemwissenschaft und Datenwissenschaft berücksichtigen.

5.5 Lösungen kommunizieren

Forschende der Erdsystemwissenschaft sollten die Relevanz ihrer Beobachtungen, Befunde und Zukunftsszenarien zu den Lebensbedingungen auf der Erde und deren potenzielle Folgen für das wirtschaftliche und gesellschaftliche Verhalten der Menschen wahrnehmen. Sie müssen die Verknappung der natürlichen Ressourcen und den Zustand der Ökosystemleistungen überwachen, beschreiben und vorhersagen und auch feststellen, wie schnell sich die Erde kritischen Schwellenwerten nähert. Die gesellschaftlichen und politischen Dimensionen solcher Veränderungen und Belastungen sind deshalb schon innerhalb der Erdsystemwissenschaft zu berücksichtigen.

Von besonderer Wichtigkeit ist daher die Kommunikation in die und mit der Gesellschaft. Die Vermittlung von Forschungsergebnissen und deren mögliche Auswirkungen an die relevanten Akteure in Politik und Wirtschaft und in die Öffentlichkeit ist von entscheidender Bedeutung für die Meinungsbildung und die öffentliche Akzeptanz notwendiger Maßnahmen. Um einen solchen Wissenstransfer gewährleisten zu können, brauchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht nur ausgezeichnete Kommunikationsfähigkeiten, sondern sie müssen auch die psychologischen Zusammenhänge ihrer Forschung und die potenziellen Konsequenzen von Forschungsergebnissen berücksichtigen. Künftigen Studierenden der Erdsystemwissenschaft sollten entsprechende Kompetenzen erlernen können. Wissenschaftliche Erkenntnisse, politische Entscheidungen, exekutive Maßnahmen und Bewusstsein und Akzeptanz in der Öffentlichkeit miteinander zu verknüpfen, wird in Zukunft von entscheidender Bedeutung sein.

5.6 In den Schulen beginnen

Eine Ausbildung im Verständnis dieser Zusammenhänge sollte an den Schulen beginnen. Doch auch dort findet sich kein explizites Schulfach, das „die Erde“ zum Thema hat. Elemente davon werden in den Naturwissenschaften wie Physik, Chemie und Biologie unterrichtet; dies aber häufig isoliert und ohne die notwendige Erklärung größerer Zusammenhänge. Es ist entscheidend, dass Schülerinnen und Schüler ihren Platz im Universum und ihre Rolle für die Zukunft unserer Erde als bewohnbarem Planet wahrnehmen. Verbindungen zwischen Gesellschaft, Handel, Wirtschaft und menschlichem Handeln, wie sie z.B. im Geographieunterricht gelehrt werden, sollten mit Aspekten der

Erdsystems, wie sie hier beschrieben werden, verbunden werden. Mitglieder von Universitäten und Forschungsinstituten werden ermutigt, das Lehrpersonal an den Schulen mit gutem Ausbildungsmaterial zu versorgen und Einfluss auf die Entwicklung von Schulcurricula zu nehmen.¹⁶

5.7 Was wird benötigt?

Wir stellen zwei Optionen zur Einführung der Erdsystemwissenschaft vor: 1) die Entwicklung neuer Studiengänge für Erdsystemwissenschaft beginnend in der Bachelor-Ausbildung; und 2) die Ergänzung bestehender Studiengänge durch Erdsystemmodule. Option 1 legt den Schwerpunkt auf Wahrung der Identität und der konzeptuellen und methodischen Stärken der traditionellen Disziplinen. Option 2 hat das Ziel, die großen Zusammenhänge und den Systemgedanken von Beginn an zu vermitteln.

Insbesondere für Option 1 wird entscheidend sein, bereits auf Bachelor-Ebene für alle Studierenden mit den Hauptfächern Geographie, Geowissenschaften und Geoökologie sowie Physik, Biologie, Chemie oder Agrarwissenschaft fachübergreifende und integrierte Kurse der Erdsystemwissenschaft anzubieten. Auch Studierenden der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften sollte die Erdsystemwissenschaft als Nebenfach angeboten werden.

Mit Option 2, einem Bachelor-Abschluss in Erdsystemwissenschaft, sollten künftige Studierende solide Grundlagenkenntnisse in den Bereichen Physik, Mathematik, Biologie, Chemie, Statistik und Data Science in Kombination mit Grundkenntnissen in den Bereichen Geowissenschaften, natürliche Rohstoffe, Klimawissenschaft, Bodenwissenschaft und Ökologie erwerben können. Absolventinnen und Absolventen können dann entweder einen Master-Abschluss in Erdsystemwissenschaften anstreben oder zwischen Master-Studiengängen in den „traditionellen Geowissenschaften“, Geographie, Ingenieurgeologie, Wirtschaftsgeologie, Umweltwissenschaften und den angewandten Wirtschafts- und Sozialwissenschaften wählen. Auf Master-Ebene sollten zusätzlich Bachelor-Absolventinnen und Absolventen der anderen Naturwissenschaften für eine Laufbahn im Bereich der Erdsystemwissenschaft gewonnen werden.

Um die Vielfalt der neuen Ausbildungsanforderungen gerecht zu werden, können die Hochschulen Masterstudiengänge in der Erdsystemwissenschaft mit einer vertieften Ausbildung in einer von drei Richtungen anbieten: 1) den MINT Disziplinen (Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften, Technik); 2) in der Datenwissenschaft; 3) in den Kommunikations-, Sozial-, Psychologie-, Politik- und Sozialwissenschaften.

Angesichts der Herausforderung, die Erdsystemwissenschaften in bestehende Lehrpläne zu integrieren, sollte eine Verlängerung der Lehrplandauer über 10 Semester hinaus (Bachelor plus Master) in Betracht gezogen werden.

¹⁶ Wysesession et al. (2010), DVGeo (2022).

6 Handlungsempfehlungen für die Erdsystemwissenschaft

Angesichts der aktuellen Entwicklung unseres Planeten und der dringenden Notwendigkeit, die Wirkung des menschlichen Handelns im Erdsystem zu bewerten und dessen Folgen zu bewältigen, ist jetzt der Zeitpunkt, die Erdsystemwissenschaft als übergreifenden Rahmen für alle geowissenschaftlichen Disziplinen in Deutschland zu etablieren. Zu diesem Zweck definiert dieser Bericht drei miteinander verbundene Leitmotive: 1) Wissenschaft, die auf Neugier, Entdeckungen und der Generierung von Wissen über unseren Planeten basiert. 2) Diagnose des Zustands und der zukünftigen Entwicklung eines Planeten, der sich aufgrund des zunehmenden menschlichen Drucks verändert, sowie Definition der Grenzen sicherer Bedingungen für menschliche Zivilisationen und Bewohnbarkeit. 3) Entwicklung und Kommunikation von Lösungen für einige der größten Herausforderungen, denen die Menschheit gegenübersteht. Mit der Erdsystemwissenschaft als übergeordnetem Paradigma werden die Geowissenschaften in Deutschland inter- und transdisziplinärer, quantitativer und digitaler werden.

Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger aus Universitäten, Forschungszentren, Förderorganisationen sowie Partner aus dem privaten Sektor und die geowissenschaftlichen Fachgesellschaften sollten sich in einen gemeinsamen Diskurs begeben, um Maßnahmen zu ergreifen, die sich an den folgenden Empfehlungen orientieren.

6.1 Empfehlungen für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger

Synergien über alle Erdsystemwissenschaften und zwischen Institutionen erzeugen

Die Erdsystemwissenschaft stellt keine traditionelle Disziplin an sich dar, sondern ist ein konzeptioneller Rahmen. Damit die einzelnen Bereiche der deutschen Geowissenschaften in der Lage sind, den neuen Herausforderungen gerecht zu werden, müssen sie eine Balance zwischen Interdisziplinarität einerseits und Wahrung der grundlegenden Fachkompetenz andererseits entwickeln. Zu diesem Zweck bedarf es Strategiediskussionen, des Abgleichs mit internationalen Best-Practices-Beispielen, Profilbildung und der Identifizierung optimaler Organisationsformate, um den Weg in Richtung innovativer und wissenschaftlich wettbewerbsfähiger Einheiten zu ebnen. Fördermaßnahmen und Anreizsysteme stellen das beste Mittel zur Stärkung der disziplinübergreifenden Ideenentwicklung dar; es gibt zahlreiche Förderprogramme der Deutschen Forschungsgemeinschaft und anderer Organisationen, die in Deutschland zur Verfügung stehen. Erdsystemwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sollten diese Fördermöglichkeiten bestmöglich nutzen.

Ausbau von Kapazitäten für die Beobachtung und Analyse

Die Überwachung von Veränderungen der Zustände im Erdsystem mit hoher räumlicher Abdeckung und Auflösung erfordert sowohl massive Investitionen in und langfristiges finanzielles Engagement für Erdbeobachtungssysteme sowie modernste

Analysewerkzeuge zur Bestimmung der Eigenschaften, Pfade und Massenflüsse von Erdmaterialien. Die deutsche Meeresforschung verfügt über eine herausragende Forschungsinfrastruktur auf Weltniveau, die fortwährend der Unterstützung bedarf. Wir rufen dazu auf, in ähnlichem Ausmaß terrestrische Beobachtungssysteme, geophysikalische Infrastruktur und Gesteinslaboratorien, hydrologisches Monitoring und luftgestützte Beobachtung der Erdoberfläche und atmosphärischer Eigenschaften zu etablieren. Observatorien sollten sich nicht auf Standorte in Deutschland beschränken. Sie sollten in Regionen eingerichtet werden, die am meisten vom Klimawandel betroffen oder für die Erforschung der Subsysteme der Erde besonders geeignet sind und den größten Einfluss auf unsere Lebensgrundlagen haben. Es wird vorgeschlagen, dass Fördereinrichtungen, Universitäten und Forschungsorganisationen im Bereich der Erdsystemwissenschaften gemeinsam eine nationale Roadmap für große Erdbeobachtungsinfrastrukturen entwickeln. Um solche Observatorien bestmöglich zu nutzen und hypothesengeleitete Wissenschaftsprogramme voranzutreiben, sollten Beobachtungs- und Analysekapazitäten, die von außeruniversitären Großforschungseinrichtungen (z. B. Helmholtz-Gemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft) betrieben werden, gemeinsam mit universitären Partnern und der DFG-Senatskommission für die Erdsystemforschung (SKE) konzipiert werden.

Investitionen in digitale Infrastruktur für Geodatenwissenschaften, Modelle und Rechenkapazitäten

Ohne einen Paradigmenwechsel in der Art und Weise, wie die digitale Infrastruktur unterstützt wird, wird die Erdsystemwissenschaft nicht in der Lage sein, die Möglichkeiten, die die Cyberwelt bietet, auszuschöpfen. Nur durch effektive Nutzung der schnell wachsenden Geodaten sind aussagekräftige Zukunftsprognosen mittels eines digitalen Zwillings der Erde („Twin Earth“) möglich. Es bedarf einer nationalen Strategie für die fortwährende Entwicklung, Finanzierung und Verbreitung von digitalen Infrastrukturen über die NFDI4-Earth-Initiative hinaus. Die Strategie sollte Unterstützung für gemeinschaftliche Bemühungen zur Entwicklung zukunftsfähiger, interoperabler Datenformate und für einen offenen Zugang zu Datenprodukten und Simulationstechnologien auf allen Ebenen beinhalten. Die Anwendungen dieser umfassenden Geodaten-Infrastruktur reichen von groß angelegten Initiativen in Forschung und Technologie über die Basisunterstützung für öffentliche Einrichtungen bis hin zum offenen Zugang zu allen Daten. Für die Implementierung dieser Strategie und damit deutsche Geodatenwissenschaften ihre Unabhängigkeit von kommerziellen Anbietern (wie Google Earth Engine) wahren können, sind erhebliche Investitionen (in einer Größenordnung von mehreren 100 Millionen EUR) für die Einrichtung und langfristige Pflege einer nationalen Geodaten- und Recheninfrastruktur erforderlich.

Schaffung neuer Beschäftigungsmöglichkeiten im Privatsektor durch Technologietransfer

Die Aktivitäten der Erdsystemwissenschaft zur Überwachung des Wandels und zur Erarbeitung von Lösungsvorschlägen bieten neue Möglichkeiten für den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in den privaten Sektor. Neugründungen und Beratungsunternehmen werden die Beschäftigungsmöglichkeiten von traditionellen Arbeitsplätzen in den Geowissenschaften erweitern und neue Berufsfelder eröffnen. Mögliche Bereiche sind Geodatenmanagement und -analytik, die Entwicklung von Vorhersagemodellen und Methoden zur Bewertung der Vulnerabilität von öffentlichen und privaten Infrastrukturen. Auch die Entwicklung, Implementierung und Vermarktung negativer Emissionstechnologien in einem durch den Handel mit Emissionszertifikaten getriebenen Markt

sowie Nutzungskonzepte für mineralische Ressourcen und geothermische Energie und die Entwicklung und der Einsatz von Sensoren sind neue Berufsfelder. Forschungsinstitute und Universitäten werden ermutigt, durch Beratung und finanzielle Unterstützung bei der Gründung von Spin-offs eine Rolle bei dieser Entwicklung zu spielen.

Integration in den Europäischen Forschungsraum

Deutschland kann die hier dargestellten Aufgaben nicht allein bewältigen. Der Europäische Forschungsraum bietet ein ausgezeichnetes Umfeld für die Erdsystemwissenschaft. Aktuelle Beispiele sind unter anderem die Programme EPOS (European Plate Observing System), ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures), LIFE (EU-Finanzierungsinstrument für Umwelt- und Klimapolitik), die auf 10 Jahre ausgelegte EU-Initiative „Destination Earth“, im Rahmen derer ein „digitaler Zwilling“ der Erde zur Abbildung der Klimaentwicklung geschaffen werden soll, die European Open Science Cloud (EOSC), europäische Institutionen wie die Europäische Weltraumorganisation (ESA) oder das European Southern Observatory (ESO). Erhebliche finanzielle, institutionelle und personelle Investitionen sind unerlässlich, um die Geowissenschaften in Deutschland zu stärken, um wettbewerbsfähig zu bleiben und um einen wesentlichen Beitrag zu diesen großen EU-Initiativen zu leisten.

In Schulen Neugier und Interesse an der Erdsystemwissenschaft wecken

Um die nächste Generation von Studierenden und Forschenden für die Erdsystemwissenschaften zu gewinnen, sollten entsprechende Kenntnisse und Konzepte an weiterführenden Schulen vermittelt werden. Dafür wird es nötig sein, Lehrkräfte einzubeziehen, die diese Konzepte in ihren Unterricht einbringen, und deren universitäre Ausbildung und Schullehrpläne entsprechend zu überarbeiten. Inhalte der Erdsystemwissenschaft dürfen nicht auf ein bestimmtes Fach beschränkt bleiben, sondern sollen übergreifend in die Fächer Geographie, Chemie, Physik, Biologie, Mathematik und Wirtschafts- und Sozialkunde integriert werden.

6.2 Empfehlungen für die geowissenschaftliche Gemeinschaft

Ausbildung der nächsten Generation von Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern

Die Stärkung der Erdsystemkompetenzen, die Energiewende, strengere Umwelt- und Gesetzesvorschriften und Big-Data-Anwendungen erfordern die Entwicklung neuer Curricula an den Universitäten. Neben der Sicherstellung der IT-/Datenkompetenz der Studierenden müssen die Universitäten die Schnittstelle zwischen den Erdsystemwissenschaften und den Computerwissenschaften stärken und dabei auch einen größeren Schwerpunkt auf die MINT-Fächer (Mathematik, Ingenieur- und Naturwissenschaften, Technologie) legen. Als primäres Ziel müssen Studierende befähigt werden, die Grundlagenkompetenz ihrer jeweiligen Disziplin zu beherrschen und darüber hinaus in Konzepten der Erdsystemwissenschaft zu „denken“. Um dies zu erreichen, gibt es zwei Möglichkeiten für eine neue Studiengangstruktur:

- 1) Bei entsprechenden Ressourcen und wissenschaftlicher Vielfalt an einem großen geowissenschaftlichen Fachbereich könnte ein vollständiger Bachelor-Master-Studiengang in Erdsystemwissenschaften als Option zusätzlich zu den bestehenden Master-Abschlüssen in z. B. Geowissenschaften, Geographie, Geoökologie, Bodenkunde und Hydrologie angeboten werden.

2) Alternativ könnte ein Master-Studiengang Erdsystemwissenschaft als neue Option und aufbauend auf einem der bestehenden geowissenschaftlichen Bachelor-Studiengänge angeboten werden.

Jedes erdwissenschaftliche Curriculum sollte außerdem offen und so flexibel sein, dass Bachelor-Absolventen aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Datenwissenschaft und anderen Naturwissenschaften in einen Master-Studiengang Erdsystemwissenschaften einsteigen können.

Angesichts der Herausforderung, die Erdsystemwissenschaften in bestehende Lehrpläne zu integrieren, sollte eine Verlängerung der Lehrplandauer über 10 Semester hinaus (Bachelor plus Master) in Betracht gezogen werden.

Verbindung zu anderen Disziplinen

Die Entwicklung der Fähigkeit zur wechselseitigen Kommunikation von Lösungen geht über das, was die Geowissenschaften allein leisten können, hinaus. Dies kann in Zusammenarbeit mit Verhaltenswissenschaften/Psychologie (in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung von Veränderungen) sowie den Wirtschaftswissenschaften (in Bezug auf die Implementierung wirtschaftlicher Lenkungswerkzeuge wie der CO₂-Steuer) erfolgen. Weiterhin sind in Bezug auf die Entwicklung von Normen in einer Welt, in der lokale Aktivitäten globale Auswirkungen haben können, die Moralphilosophie relevant und die soziologischen und politischen Wissenschaften in Bezug auf die Entwicklung politischer Maßnahmen. Um das Bewusstsein der Öffentlichkeit für die Bedeutung wissenschaftlicher Entdeckungen und der damit verbundenen Anstrengungen zur Risikominderung und -anpassung aufrechtzuerhalten, ist eine erfolgreiche Kommunikation in beide Richtungen erforderlich. In diesem Kontext bieten die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen für Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler eine exzellente Grundlage zur verantwortungsvollen Nutzung der Georessourcen auf eine Art und Weise, die die Bedürfnisse künftiger Generationen nicht beeinträchtigt.

Disziplinübergreifende, groß angelegte Initiativen entwickeln

Der aktuelle Erfolg der Klima- und Meereswissenschaften beim Vorantreiben der Forschung durch integrierte, disziplinübergreifende Verbundvorhaben im Hinblick auf die großen Herausforderungen, vor denen wir stehen, ist ein Weckruf für die Gemeinschaft der Geowissenschaften als Ganzes. Internationale, disziplinübergreifende Programme in den Geowissenschaften (wie das International Ocean and Continental Scientific Drilling Program, IODP und ICDP) und ähnliche Erfolge in anderen Naturwissenschaften sind weitere herausragende Beispiele. Solche Programme werden der Wissenschaftsgemeinschaft helfen, die Forschungsziele erster Ordnung zu erreichen, auch wenn die Größe ihrer Organisationseinheiten unterkritisch ist, um sie alleine angehen zu können. Das Ausmaß der bevorstehenden Herausforderungen und das Konzept einer Erdsystemwissenschaft liefern die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Generation von Forschungsinitiativen, die auch zur Wahrung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Geowissenschaft beitragen.

Geowissenschaftliche Gesellschaften zur Führungsrolle bei der Transformation befähigen

Die geowissenschaftlichen Fachgesellschaften werden ermutigt, bei der Stärkung der Erdsystemwissenschaften eine zentrale Rolle zu übernehmen. Sie sind die einzigen Organisationen, die Akademikerinnen und Akademiker aus dem universitären Bereich

und aus Forschungszentren, sowie Fachkräfte aus dem privaten Sektor und Studierende vereinen. Die Fachgesellschaften verteilen sich derzeit allerdings auf über 25 Einzelorganisationen. Die Erdsystemwissenschaften können es sich angesichts der Herausforderungen, denen wir gegenüberstehen, nicht leisten, diese Zersplitterung aufrechtzuerhalten. Wir empfehlen, kleinere Gesellschaften zusammenzuführen, um echte Integration zu ermöglichen. Innerhalb integrierter Gesellschaften kann Spezialkompetenz in Untergruppierungen erhalten bleiben. Sowohl gegenüber der Öffentlichkeit als auch gegenüber Entscheidungsträgern und Geldgebern mit „einer Stimme“ aufzutreten, wird für die Geowissenschaften in der Zukunft entscheidend sein.

Literatur

- Australian Academy of Sciences (2018) Our Planet, Australia's Future – A decade of transition in Geoscience. Link: <https://www.science.org.au/supporting-science/science-policy-and-sector-analysis/decadal-plans-science/australian-geoscience>
- Crutzen PJ & Stoermer EF (2000) The Anthropocene. *Global Change Newsletter* 41: S. 17.
- Dachverband der Geowissenschaften (2022), Wissenschaften in der Schule. www.geowissenschaften-unterrichtsmaterial.de
- Daniell JE, Khazai B, Wenzel F & Vervaeck A (2011), The CATDAT damaging earthquakes database, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 2235-2251.
- Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, Bathan G, Bose-O'Reilly S, M et al. (2022) Pollution and health: a progress update. *The Lancet* 6: e535-e547.
- IGBP (1986). International Geosphere Biosphere Program. Link: <http://www.igbp.net/>
- IPCC (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf. Link: <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- IPCC (2022) 6. Assessment Report, Working group 3. Geneva.
- Kögel-Knabner I, Teutsch G, Adrian R, von Blanckenburg F, Flüge UI, Kollé O; Kleinn C, Küsel K, Lischeid G, Löw A, Schäfers C, Schmid HP, Simmer C, Vereecken H, Walz R (2018) Empfehlung zur Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung. Abschlussbericht der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Allianz der Wissenschaftsorganisationen. Link: Abschlussbericht der Allianz-Arbeitsgruppe »Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung«
- Lenton T (2016) *Earth System Science – a very short Introduction*. Oxford University Press, Oxford.
- Ludden J (2020) Where is geoscience going? *Geological Society, London, Special Publications* 499: 69-77. Link: <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-212>
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola JM, Siegenthaler U, Raynaud D, Jouzel J, Fischer H, Kawamura K & Stocker TF (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* 453: 379–382.
- Meehl GA, Senior CA, Eyring V, Flato G, Lamarque J-F, Stouffer RJ, Taylor KE & Schlund M (2020) Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances* 6: eaba1981.
- Merschel P, Wolf-Brozio U, Kucera M & Eicker A (2020) Herausforderungen der universitären Ausbildung im Bereich der Erdsystemwissenschaften in Deutschland. *GMIT* 80 20. Juni 2020.
- NASA (1986) NASA Advisory Council. Earth System Sciences Committee, Earth system science overview: a program for global change, Publisher: National Aeronautics and Space Administration, Washington.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2020. *A Vision for NSF Earth Sciences 2020-2030: Earth in Time*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/25761.
- National Committee for Earth Sciences (2018) *Our Planet, Australia's Future: A decadal plan for Australian geoscience 2018–27* (Australian Academy of Science).
- National Science Foundation (2022) Next Generation Earth Systems Science at the National Science Foundation. Washington D.C.
- Plag HP, Blocklebank S, Brosnan D, Campus P, Cloetingh S., Jules-Plag S. & Stein S (2015) *Extreme Geohazards: Reducing the Disaster Risk and Increasing Resilience*. European Science Foundation.
- Raup DM, Sepkoski JJ (1982) Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*, 215 4539: 1501-1503.
- Scheffer M, Bascompte J, Brock WA, Brovkin V, Carpenter SR, Dakos V, Held H, van Nes EH, Rietkerk M & Sugihara G (2009), Early-warning signals for critical transition, *Nature Reviews*. doi:10.1038/nature08227
- Schellnhuber H J (1999) Earth system analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402: C19-C23.
- Schellnhuber, Rahmstorf und Winkelmann (2016) Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change* 6: 649–653.
- Der Spiegel (2009) Internationale Umfrage: Forscher nennen die größten Rätsel der Erde. Link: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/internationale-umfrage-forscher-nennen-die-groessten-raetsel-der-erde-a-628769.html>

- Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347: 736.
- Steffen W, Richardson, Rockström J et al. (2020) The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment* 1.1 (2020): 54-63.
- The World Bank (2020) Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington D.C. Link: <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>.
- Uhlig D & von Blanckenburg F (2019) How Slow Rock Weathering Balances Nutrient Loss During Fast Forest Floor Turnover in Montane, Temperate Forest Ecosystems. *Frontiers in Earths Science* 7: 159. Link: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00159>
- United Nations (2015a) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations: New York, NY, USA.
- United Nations (2015b) Sendai Framework Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030
- WBGU (2011) Flagship Report of the German Advisory Council on Global Change „World in Transition – A Social Contract for Sustainability“, Berlin.
- Wefer G (2010) Dynamische Erde – Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften. Senatskommission für geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft 367 S., Bonn.
- Westerhold T, Marwan N, Drury AJ, Liebrand D, Agnini C, Anagnostou E, Barnet JSK, Bohaty SM, De Vleeschouwer D, Florindo F, Frederichs T, Hodell DA, Holbourn A, Kroon D, Lauretano V, Littler K, Lourens, LJ, Lyle MW et al. (2020) An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science* 369: 1383-1387.
- Wysession M et al. (2010) Earth Science Literacy Initiative, US National Science Foundation, Arlington. Link: <http://www.earthscienceliteracy.org/document.html>

Mitwirkende

Die Arbeitsgruppe Erdsystemwissenschaft wurde vom Präsidium der Leopoldina im Mai 2017 eingesetzt und kam im Dezember 2017 zu ihrem ersten Treffen zusammen. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe haben auf ehrenamtlicher Basis zu diesem Report beigetragen.

Redaktionsgruppe

Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg ML	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Onno Oncken ML	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Gerhard Wörner	Georg-August-Universität Göttingen
Prof. Dr. Peter Schlosser ML	Arizona State University, Tempe, Arizona (USA)

Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Onno Oncken ML	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Sprecher der Arbeitsgruppe)
Prof. Dr. Jörg Bendix ML	Philipps-Universität Marburg
Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg ML	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Antje Boetius ML	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie Bremen und MARUM Universität Bremen
Prof. Dr. Martin Claußen ML	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Prof. Dr. Christian Dullo ML	GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Wilfried Endlicher ML	Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. (ETHZ) Dr. Gerald Haug ML	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Prof. Dr. Heiner Igel ML	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Ulrike Lohmann ML	ETH Zürich
Prof. Dr. Joachim Reitner	Georg-August-Universität Göttingen
Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber ML	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Prof. Dr. Peter Schlosser ML	Arizona State University, Tempe, Arizona (USA)
Prof. Dr. Gerhard Wörner	Georg-August-Universität Göttingen

Redaktionelle Begleitung

Dr. Christian Anton	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft
Dr. Henning Steinicke	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft
Johannes Mengel	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft
Dr. Sebastian Wetterich	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Internationale Beziehungen

ML – Mitglied der Leopoldina

Gutachterinnen und Gutachter

Prof. Susan Brantley	Pennsylvania State University (USA)
Prof. Guy Brasseur	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Prof. Sierd Cloetingh	Utrecht University, Department of Earth Sciences (Niederlande)
Prof. John Ludden	Heriot Watt University, Edinburgh (Schottland)
Prof. Susan Trumbore ML	Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Workshops und Hearings

Am Workshop „Daten-Management & Daten-Infrastrukturen für die Geowissenschaften“ am 12. November 2018 in Berlin nahmen die folgenden Personen teil:

Prof. Dr. Bernd Bischl	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Stefan Dech	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen
Dr. Anton Frank	Leibniz Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
Prof. Dr. Frank Oliver Glöckner	Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie, Bremen
Prof. Dr. Volker Mosbrugger ML	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt
Prof. Dr. Monika Sester	Leibniz-Universität Hannover

Am Workshop „Universitäre Ausbildung für die Erdsystemforschung“ am 3. Dezember 2018 in Berlin nahmen folgende Personen teil:

Prof. Dr. Sabine Attinger	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig
Prof. Dr. Doris Breuer	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin
Prof. Dr. Torsten Dahm	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Prof. Dr. Horst Malchow	Universität Osnabrück
Prof. Dr. Xiaoxiang Zhu	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen

Weitere Personen, die mit Vorschlägen, Reviews und Empfehlungen zu diesem Report beigetragen haben:

Prof. Dr. Fabrice Cotton	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Kapitel 3.6)
M. Sc. Donovan Dennis	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Kapitel 5)
Dr. Jonathan Donges	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Kapitel 3.4)
Prof. Dr. Dan Frost ML	Universität Bayreuth (Kapitel 3.1)
Prof. Dr. Dieter Gerten	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin (Kapitel 3.7)
Dr. Jürgen Grötsch	Shell Technology Centre Amsterdam (Kapitel 3.7)
Prof. Dr. Christian Hallmann	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Kapitel 3.2)
Dr. Michael Henehan	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Kapitel 3.4)
Prof. Dr. Jürgen Kurths	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Kapitel 2)
Dr. Joe Magnall	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Kapitel 3.7)
Dr. Maria A. Martin	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Kapitel 3.6)
Prof. Dr. Ulrich Platt ML	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (Kapitel 3.3)
Prof. Dr. Johan Rockström ML	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Kapitel 3.5)
Prof. Dr. Thomas Stocker ML	Universität Bern (Kapitel 3.3)
Prof. Dr. Manfred Strecker ML	Universität Potsdam
Prof. Dr. John Thompson	Cornell University, USA (Kapitel 3.7)
Prof. Dr. Martin Visbeck	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (Kapitel 3.3)
Prof. Dr. Friedrich Wellmer	ehemals Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (Kapitel 3.7)
Prof. Dr. Ricarda Winkelmann	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Kapitel 2 & 3.4)

Folgenden Personen haben durch ihre Kommentare zum Gesamtentwurf zu einer deutlichen Verbesserung dieses Zukunftsreports beigetragen:

Prof. Dr. Antje Boetius ML	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
Prof. Dr. Andreas Mulch	Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum, Frankfurt
Prof. Dr. Ulrich Radtke ML	Universität Duisburg-Essen
Prof. Dr. Monika Sester	Senatskommission Erdsystemforschung der DFG und Leibniz Universität Hannover

Dieser Zukunftsreport wurde ausschließlich mit Mitteln der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina finanziert. Die Leopoldina ihrerseits erhält ihre Zuwendungen zum Großteil von der Bundesregierung, zu einem kleineren Teil vom Land Sachsen-Anhalt.

Wir danken allen Gutachterinnen und Gutachtern und allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die durch Kommentare, Texte oder Diskussionen zu diesem Zukunftsreport beigetragen haben.

Weitere Bände der Schriftenreihe „Zukunftsreport Wissenschaft“

2021

Forschung für die gewonnenen Jahre: Zukunft der Alterns- und Lebensverlaufsforschung

2014

Lebenswissenschaften im Umbruch – Herausforderungen der Omics-Technologien für Deutschlands Infrastrukturen in Forschung und Lehre

Die Publikationen der Leopoldina stehen kostenfrei auf der Internetseite der Akademie zum Download zur Verfügung: <http://www.leopoldina.org/de/publikationen>

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-867
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org

Berliner Büros:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Unter den Linden 42
10117 Berlin

Die 1652 gegründete Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina ist mit ihren rund 1.600 Mitgliedern aus nahezu allen Wissenschaftsbereichen eine klassische Gelehrten-gesellschaft. Sie wurde 2008 zur Nationalen Akademie der Wissenschaften Deutschlands ernannt. In dieser Funktion hat sie zwei besondere Aufgaben: die Vertretung der deutschen Wissenschaft im Ausland sowie die Beratung von Politik und Öffentlichkeit.

Die Leopoldina tritt für die Freiheit und Wertschätzung der Wissenschaft ein. Sie trägt zu einer wissenschaftlich aufgeklärten Gesellschaft und einer verantwortungsvollen Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Wohle von Mensch und Natur bei. Im interdisziplinären Diskurs überschreitet sie thematische, fachliche, politische und kulturelle Grenzen. Die Leopoldina setzt sich für die Achtung der Menschenrechte ein.

Als Nationale Akademie der Wissenschaften setzt die Leopoldina im Austausch mit anderen Institutionen, auch auf internationaler Ebene, Themen in der wissenschaftlichen Kommunikation und Politikberatung. In ihrer Politik beratenden Funktion legt die Leopoldina fachkompetent, unabhängig, transparent und vorausschauend Empfehlungen zu gesellschaftlich relevanten Themen vor. Sie begleitet diesen Prozess mit einer kontinuierlichen Reflexion über Voraussetzungen, Normen und Folgen wissenschaftlichen Handelns.