

Geowissenschaften

von Frank Keppler, Axel K. Schmitt und Mario Trieloff

Dieser Text ist die herausgeberisch und redaktionell bearbeitete, aber noch nicht abschließend lektorierte und ungesetzte Vorabveröffentlichung eines Kapitels, das im Band

Umwelt interdisziplinär Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder

**herausgegeben von Thomas Meier, Frank Keppler, Ute Mager,
Ulrich Platt und Friederike Reents**

bei Heidelberg University Publishing (heiUP; <https://heiup.uni-heidelberg.de/>) Open Access und in gedruckter Form erscheinen wird.

Text © die Autoren 2022



Dieser Text ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00031077>

Geowissenschaften

Frank Keppler^{1,2}, Axel K. Schmitt^{1,2} und Mario Trieloff^{1,2,3}

¹ Institut für Geowissenschaften, Universität Heidelberg

² Heidelberg Center for the Environment (HCE), Universität Heidelberg

³ Klaus-Tschira-Labor für Kosmochemie, Heidelberg

Zusammenfassung: Die Geowissenschaften befassen sich mit der Entstehung, Entwicklung und Funktionsweise des Systems Erde, insbesondere auch den Interaktionen zwischen der festen Erde und der Biosphäre. Hydrosphäre und Atmosphäre waren in der Erdvergangenheit deutlich anders beschaffen als heute, lebensfreundliche Bedingungen existieren aber seit mindestens vier Milliarden Jahren und das Leben selbst spielte eine aktive Rolle bei der Gestaltung der Umwelt. In diesem Kapitel wird das Thema Umwelt aus geowissenschaftlicher Sicht vorgestellt. Zunächst wird die Disziplin „Geowissenschaften“ als Fachwissenschaft mit ihren Unterdisziplinen und ihrer spezifischen geschichtlichen Entwicklung präsentiert. An verschiedenen Thematiken wie z. B. der Entstehung und stofflichen Entwicklung der Erde, ihrer vulkanischen und seismischen Aktivität und der damit verbundenen Umweltgefahren sowie der biogeochemischen Stoffkreisläufe, die durch den Menschen stark beeinflusst werden, sollen beispielhaft wichtige umweltspezifische Fragestellungen in den Geowissenschaften verdeutlicht werden. Zudem werden Verknüpfungen und enge Bezüge zu anderen disziplinären Kapiteln wie z. B. →Rechtswissenschaften, →Chemie, →Geographie und →Physik sowie zu den interdisziplinären Kapiteln →Anthropozän, →Evolution, →Klimawandel, →Risiken, →Wachstum und →Raum aufgezeigt.

Schlüsselbegriffe: Urerde, Erdzeitalter, Geogefahren, Rohstoffe, Stoffkreisläufe, Anthropozän

Geowissenschaften – allgemein

Der Begriff Geowissenschaften basiert auf dem griechischen *gḗ* (γῆ) „Erde“ bzw. „Land“ und bezeichnet einen Komplex von Fächern, die sich mit der Erforschung der naturwissenschaftlichen Aspekte der Erde als Planeten in seinem kosmischen Umfeld befassen. Übergeordnetes Ziel der Geowissenschaften ist es, die Entstehung und Entwicklung des Planeten Erde von seiner Bildung vor rund 4,6 Milliarden Jahren bis heute zu verstehen. Die Erdoberfläche – und damit die direkte physische Umwelt des Menschen – wird durch komplexe Interaktionen am Schnittpunkt zwischen den Subsystemen der tiefen Erdsphären, sowie der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre ständig verändert und neu gestaltet. Geowissenschaftlich untersuchte Prozesse finden auf extremen räumlichen und zeitlichen Skalen statt: auf der subatomaren Größenskala spielen z. B. radioaktive Zerfallsprozesse eine Rolle, während auf der planetaren Größenskala Prozesse wie beispielsweise der Materialtransport innerhalb des flüssigen Erdkerns und des daraus resultierenden Erdmagnetfelds bedeutend sind. Betrachtete Zeitskalen reichen von Sekundenbruchteilen, z. B. bei chemischen Reaktionen auf Mineral-

oberflächen, bis hin zu Milliarden von Jahren, die für Vorgänge der Plattentektonik und der biologischen Evolution charakteristisch sind.

Die Geowissenschaften verwenden Kenntnisse und Methoden der Basiswissenschaften →Physik, Mathematik, →Chemie und →Biologie. Diese Verwandtschaft belegt auch die geschichtliche Entwicklung der Geowissenschaften, hier beispielhaft für die Universität Heidelberg aufgezeigt. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts lehrten Professoren der Chemie und Zoologie Vorlesungen zu den Themen Mineralogie bzw. Paläontologie, während die sogenannten Kameralwissenschaften mit der Bergbau- und Hüttenkunde Pate für die angewandten Geowissenschaften standen. Erst seit 1818 sind die Geowissenschaften mit einem eigenen Lehrstuhl belegbar, aus dem zuerst ein mineralogisch-petrologisches Institut hervorging. Aus diesem differenzierte sich Ende des 19. Jahrhunderts ein stratigraphisch-paläontologisches Institut. In den 1970er Jahren kam in Heidelberg als drittes Institut die Umweltgeochemie hinzu (→Chemie). Seit 2008 sind diese drei Institute unter dem Überbegriff „Geowissenschaften“ wiedervereint. Diese Geschichte einer fachlichen Ausdifferenzierung und eines Wiederausammenwachsens ist für die Entwicklung im deutschsprachigen Raum nicht untypisch. Heute zählen zu den klassischen Hauptfächern der Geowissenschaften beispielsweise: Geologie und Paläontologie; Mineralogie, Kristallographie, Petrologie und Vulkanologie; Geophysik; Geochronologie, Geo- und Kosmochemie; sowie Hydrologie. Zudem werden den Geowissenschaften u. a. die Ozeanographie, Limnologie, Glaziologie und Meteorologie; Geodäsie, Kartographie, Geoinformatik und Erd-Fernerkundung (Satellitenbeobachtung); Geotechnik und Bodenmechanik; sowie Umweltbeobachtung (Schadstoffe, Emissions- und Umweltschutz), Biogeochemie und Bodenkunde (Pedologie) zugeordnet.

Die Abgrenzung der Geowissenschaften von anderen Disziplinen ist oftmals nicht eindeutig, wofür die Fächer →Geographie und →Physik Beispiele sind. So sind einige der oben angeführten Themen auch Bestandteile der Physischen Geographie oder der Geoinformatik. Andererseits gibt es die Teildisziplin der Humangeographie (→Geographie) mit zahlreichen Bezügen zu zwar raumbezogenen, nicht aber per se „erd“-bezogenen Themen, wie bei der Wirtschafts- und der Sozialgeographie.

Studium der Geowissenschaften in Deutschland

An derzeit 26 Universitäten in Deutschland kann seit der Bologna Reform das Fach Geowissenschaften in einem grundlegenden dreijährigen „Bachelor of Science“ und einem spezialisierenden zweijährigen „Master of Science“ studiert werden. Aus einer Gesamtzahl von ca. 14.000 Studierenden (Stand Jahr 2017) erhalten jährlich ungefähr 1.400 Absolventen einen berufsqualifizierenden Abschluss. Die Arbeitslosenquote liegt im mehrjährigen Durchschnitt im niedrigen einstelligen Bereich. Arbeitsbereiche für Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler finden sich breit gestreut in Industrie und Wirtschaft, Ingenieur- und Vermessungsbüros, der universitären und außeruniversitären Forschung sowie bei geologischen

Diensten und Behörden. Themen sind Lagerstätten, Rohstoffgewinnung, Wasser als Resource, Altlasten, Naturkatastrophen, Umweltschutz sowie die Grundlagenforschung.

Wichtige Zeitschriften und Fachgesellschaften:

Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Geowissenschaften werden vornehmlich in englischsprachigen Fachzeitschriften publiziert. Unter den angesehensten internationalen Fachzeitschriften für geowissenschaftliche Themen befinden sich: Nature, Science, Nature Geosciences, Environmental Science & Technology, Geology, Earth and Planetary Science Letters, Geophysical Research Letters, Journal of Geophysical Research und Geochimica et Cosmochimica Acta. Zu den wichtigsten internationalen Fachgesellschaften gehören die American Geophysical Union (AGU), die European Geosciences Union (EGU), die Geological Society of America (GSA) und die International Union for Quaternary Research (INQUA). Innerhalb des deutschsprachigen Raums repräsentiert seit 2015 der Dachverband Geowissenschaften (DVGeo) die vier mitgliederstärksten Fachgesellschaften: Deutsche Geologische Gesellschaft (DGGV), Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG), Deutsche Mineralogische Gesellschaft (DMG) und Paläontologische Gesellschaft (PalGes).

Geowissenschaften und der enge Bezug zur Umwelt

Da die Geowissenschaften sehr interdisziplinär und fächerübergreifend arbeiten, gibt es viele spezielle Disziplinen, die eine hohe Umweltrelevanz besitzen, wie die Angewandte Geologie im weiteren Sinne, die Ingenieurgeologie, Hydrogeologie und Hydrologie, Geochemie, Geobiologie, Geomikrobiologie, Geoökologie und Geostatistik, sowie Geothermie, Meteorologie und Klimatologie (→Physik). Die Geowissenschaften spielen insbesondere eine tragende Rolle, um die Rohstoff- und Energieversorgung zu sichern. Die Suche nach Ressourcen wie Trinkwasser, Kohlenwasserstoffen (Erdgas, Erdöl und Kohle), Metallen (z. B. Eisenerz, Buntmetalle und strategische Metalle) und Nichtmetallen (Steine, Erden und Salze), nach Massenrohstoffen wie Kies, Bausand, Ziegelton, Kalk, Gips (für die Zementherstellung) etc., aber auch nach Kernenergierohstoffen (Uran) und Erdwärme (→Energie) werden durch Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler projiziert und realisiert. Die Gewinnung dieser Rohstoffe fällt jedoch eher in den Bereich der Ingenieurwissenschaften, besonders des Bergbaus.

Die angewandten Geowissenschaften wiederum sind bei vielen Bauvorhaben wichtig (Gründung von Bauwerken, Erdbau, Grundbau, Fels- und Tunnelbau). Auch die Raumplanung (→Raum) und der Umweltschutz bis hin zur Abfallwirtschaft (Deponien) (→Verschmutzung) benötigen geowissenschaftliche Kenntnisse, die in Geoinformationssystemen gesammelt und verarbeitet werden. Mit Methoden der Geotechnik werden Befestigungs- und Überwachungsaufgaben durchgeführt und mit Geotextilien Böschungen oder Deponien stabilisiert.

Besondere gesellschaftliche Relevanz haben die Geowissenschaften nicht nur bei der Rohstoff- und Energiegewinnung, sondern auch bei der Früherkennung von Georisiken wie Vul-

kanausbrüchen und Erdbeben (→Risiko), aber auch vor dem Hintergrund des aktuellen Umwelt- und →Klimawandels. Aus den Abläufen der erdgeschichtlichen Vergangenheit lassen sich Vorhersagen zur nahen und fernen Zukunft der Erde ableiten (Paläoumwelt-Forschung). Bei der Beantwortung von Fragen nach den Auswirkungen des Menschen auf das „System Erde“, der Belastbarkeit von Geoökosystemen oder der Verfügbarkeit von Georessourcen spielen die Geowissenschaften daher eine zentrale Rolle. Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler betreiben demgemäß nicht nur Grundlagenforschung. Sie arbeiten vielfach anwendungsbezogen, insbesondere zu Themen der nachhaltigen Umweltentwicklung (→Nachhaltigkeit) und der Rohstoffversorgung (→Ressourcen). Zusätzlich erforschen sie auch Techniken zur Erkundung sowie Nutzbarmachung der Natur für den Menschen, womit sie auch Aspekte der Ingenieurwissenschaften behandeln. Die Kenntnis geowissenschaftlicher Grundlagen ist dabei Voraussetzung für das Verständnis und die Lösung von Umweltproblemen wie →Klimawandel, Rohstoffversorgung (→Nachhaltige Produktion und nachhaltiger Konsum), Erdbeben, Vulkanausbrüche, Flutkatastrophen und Artensterben (→Diversität).

Im Folgenden werden die Bezüge der Geowissenschaften zur Umwelt anhand von drei verschiedenen Themenbereichen verdeutlicht. Im ersten Abschnitt geht es um lange zurückliegende Paläoumweltaspekte wie die Entstehung der Erde und die Bildung der ersten Ur-Atmosphäre. Dies beschreibt die Umwelt-Faktoren, die die Entwicklung und Evolution des Lebens in den Meeren und auf dem Land erst möglich gemacht haben. Im zweiten Abschnitt werden Umweltgefahren, Naturkatastrophen und Naturrisiken, die z. B. von Erdbeben und Vulkanausbrüchen ausgehen, behandelt. Abschließend werden biogeochemische Stoffkreisläufe in der rezenten Umwelt dargestellt, bei denen nicht nur natürliche, sondern in immer stärkerem Umfang auch anthropogene Faktoren wichtig sind. Mit Beginn der Industrialisierung und vor allem seit ca. 1950 haben sich die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf oberflächennahe geologische Prozesse und die Ökosysteme der Erde extrem beschleunigt. Der Mensch greift in vielen Fällen bereits in die globalen Kreisläufe vieler Elemente ein und hat sogar nicht oder nur extrem selten in der Natur vorkommende Elemente und Isotope in die Umwelt eingebracht.

Die Erde im Wandel der Zeit: Vom Ursprung bis ins Anthropozän

Die Entstehung des blauen Planeten

Unser Heimatplanet Erde ist für uns und das Leben im Allgemeinen ein möglicherweise einzigartiges Habitat. Wie viele erdähnliche Planeten es im Universum gibt, ist unbekannt und ebenso, wie und ob sich auf einem solchen lebensfreundlichen Planeten auch tatsächlich Leben entwickeln könnte. Auf jeden Fall aber ist die Erde und ihre Geo- und Biosphäre ein Resultat vieler über extrem lange Zeiträume ablaufender komplexer Prozesse.

Die Erde entstand mit der Ursonne und den anderen Planeten unseres Sonnensystems vor etwa 4,6 Milliarden Jahren durch den Schwerkraftkollaps einer kosmischen Gas- und Staubwolke (Zhukovska, Gail und Trieloff 2008; Trieloff 2009). Aus diesem solaren Urnebel, auch Akkretionsscheibe genannt, entwickelten sich durch Staubagglomeration zunächst sehr poröse Klumpen und im weiteren Verlauf mehrere hundert Kilometer große Gesteinskörper. Viele davon finden wir heute noch im Asteroidengürtel, wo sich kein großer Planet bilden konnte, oder in den Außenbezirken unseres Sonnensystems, dem Ursprungsort der Kometen. Fragmente solcher Kleinkörper, die als Meteorite auf die Erde fallen und geowissenschaftlich untersucht werden können, gelten als Urmaterial bzw. Baumaterial der größeren Planeten. Im frühen Sonnensystem trennte die sogenannte Frostgrenze die inneren Regionen von den äußeren Bereichen, wo in ausreichender Entfernung von der jungen Ursonne Wasser als Eis in Festkörpern eingeschlossen werden konnte. In den inneren Regionen, auch im Bereich der Erdbahn, waren die meisten Kleinplaneten trocken.

Während diese Bausteine der Planeten innerhalb der ersten zehn Millionen Jahren nach Bildung der Ursonne entstanden, dauerte die Bildung der Erde und der erdähnlichen Gesteinsplaneten Merkur und Venus etwa weitere 100 Millionen Jahre (Trieloff 2009). Im Endstadium des Wachstums schlugen dabei immer größere, bis zu mehreren tausend Kilometer große Meteoriten ein. Die Urerde heizte sich dadurch extrem auf, sodass sich auf ihrer Oberfläche ein Magmaozean aus geschmolzenem Gestein bildete. Diese Urerde besaß auch schon eine Protoatmosphäre, im Endstadium wahrscheinlich aus Wasserdampf und Kohlendioxid (Zahnle, Schaefer und Fegley 2010; Trieloff 2018). Diese flüchtigen Elemente stammten wahrscheinlich aus wenigen Kleinkörpern, die jenseits der Frostgrenze im Sonnensystem entstanden und dann Richtung Erde gelenkt wurden (Marty 2012).

Unser Heimatplanet: Optimale Größe, Lage und optimale Wassermenge

Eine kleine Beimengung von Kleinplaneten mit Wasserkonzentration im Prozentbereich sorgte dafür, dass die Erde überhaupt Wasser in nennenswerten Mengen hat – auf die Gesamtmasse der Erde gerechnet sind dies nur Bruchteile von Promille. Die Erde erscheint uns nur deswegen als „blauer Planet“, weil sie die flüchtigen (und lebensnotwendigen) Elemente und Verbindungen wie Wasser, Kohlenstoff und Stickstoff aus dem Erdkörper ausgeschwitzt und an der Oberfläche in Atmosphäre und Hydrosphäre konzentriert hat. Ein Blick auf unsere kosmischen Nachbarn – den kraterübersäten Erdmond oder auch Merkur – zeigt, dass Gesteinsplaneten nicht unbedingt eine Atmosphäre und Hydrosphäre haben müssen, somit also extrem lebensfeindlich sein können. Das liegt daran, dass sie etwas zu klein sind und ihre Masse und Schwerkraft nicht ausreicht, um in ihrem Schwerefeld überhaupt leichte Verbindungen wie Wasserdampf halten zu können. Venus und Mars haben ein stärkeres Schwerefeld ähnlich unserer Erde, aber ihre Atmosphären erscheinen dennoch ungeeignet für Leben, wie wir es kennen: Venus hat eine dichte Kohlendioxid-dominierte Atmosphäre, die extrem aufgeheizt ist (im Mittel 464° C), mit Wolken aus Schwefelsäure und nur Spuren von Wasser.

Mars hat nur eine dünne Atmosphäre und Wasser bestenfalls im gefrorenen Zustand. Dass flüssiges Wasser auf der Erde vorkommt, verdankt sie lediglich ihrem „richtigen“ Abstand zur Sonne: In größerem Sonnenabstand wäre Wasser gefroren wie bei unserem äußeren Nachbarn, dem Mars, in geringerem Sonnenabstand würde sich die Atmosphäre soweit aufheizen, dass der durch Photolyse von Wasser entstehende Wasserstoff in den Weltraum entweichen würde. Tatsächlich ist Wasser eine durchaus häufige Verbindung im Kosmos. Einige der Monde um Jupiter und Saturn haben Wasserozeane; im Fall des Jupitermondes Europa hat dieser eine vermutliche Tiefe von 100 km. Allerdings ist dieser verborgen unter einer mehrere km dicken Eiskruste und die große Entfernung von der Sonne erlaubt eine äquatoriale Oberflächentemperatur von lediglich -160°C . Allgemein kann man sagen, dass die niedrigen Temperaturen im äußeren Sonnensystem eine große Menge flüchtiger Elemente in den äußeren Planeten und ihren Monden ermöglichen, diese niedrigen Temperaturen sind aber gleichzeitig sehr unwirtlich für bekannte Lebensformen.

Unser Heimatplanet Erde hat gewissermaßen eine kosmisch günstige Lage: so nahe am Zentralgestirn, dass flüssiges Wasser stabil und trotz der – kosmisch gesehen – geringen Menge doch noch in ausreichendem Maße vorhanden ist, um an der Oberfläche konzentriert 71 Prozent der Erde mit Ozeanen und anderen Gewässern zu bedecken.

Die erste Atmosphäre und ihr Thermostat: der Karbonat-Silikat-Zyklus

Die ersten Ozeane bildeten sich wahrscheinlich kurz nachdem die Erde ihre endgültige Masse erreichte, etwa 100 Millionen Jahre nach Entstehung unseres Planetensystems vor 4,5 Milliarden Jahren. Der Magmaozean der frühen Erde konnte abkühlen und sich verfestigen. Dabei entgaste die feste Erde und die flüchtigen Elemente und Verbindungen gelangten zum großen Teil in die Atmosphäre. Mit fortschreitender Abkühlung konnte der Wasserdampf abregnen; in der Atmosphäre verblieben große Mengen Kohlendioxid und Stickstoff. Heute ist Kohlendioxid im Wesentlichen in Karbonatablagerungen gebunden; damals direkt nach Verfestigung des Magmaozeans gab es solche Gesteine noch nicht. Man geht davon aus, dass in der Atmosphäre Kohlendioxid ein dominanter Bestandteil war – ähnlich wie bei Venus und Mars noch heute. Dadurch war der Treibhauseffekt auch viel höher als heute. Trotzdem waren die Temperaturen auf der frühen Erde zumindest vergleichbar (+- wenige zehn Grad) mit heute, denn der starke Treibhauseffekt wurde ausgeglichen durch eine etwa 25 Prozent weniger leuchtkräftige Ursonne, die erst allmählich ihre heutige Leuchtkraft entwickelte. Die vergleichsweise lebensfreundlichen Temperaturen auf der frühen Erde trotz der schwachen jungen Sonne sind als „*Faint Young Sun Paradox*“ bekannt, siehe z. B. Feulner (2012).

Eine Lösung des „*Faint Young Sun Paradox*“ könnte sein, dass in dem Maße, wie die Sonne leuchtkräftiger wurde, das Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt und in Karbonaten gebunden wurde. Dieser thermostatische Effekt ist als Karbonat-Silikat-Zyklus bekannt (Berner, Lasaga und Garrels 1983): Bei relativ hohen Temperaturen verwittert auf den Landmassen vermehrt kalziumhaltiges Silikatgestein, Kalzium- und Bicarbonat-Ionen werden durch Flüsse

ins Meer transportiert. Diese Ca-Ionen werden mit im Wasser gelösten HCO_3^- als Karbonat (CaCO_3) ausgefällt und abgelagert, ebenfalls begünstigt durch hohe Temperaturen. Dadurch wird der Atmosphäre langfristig CO_2 entzogen und der Treibhauseffekt vermindert sich. Es kommt zur Abkühlung, in deren Folge sich Verwitterung und Karbonatbildung verlangsamen. Sollten die Temperaturen auf zu niedrige Werte sinken oder gar die Ozeane komplett vereisen, kommt die Verwitterung und Karbonatbildung zum Erliegen. Vulkanische Aktivität setzt allerdings kontinuierlich CO_2 wieder in die Atmosphäre frei, sodass die Erde sich wieder erwärmen kann. Dies hat wahrscheinlich auch entscheidend dabei geholfen, die Erde aus (nahezu) kompletten Vereisungsperioden („*Snowball Earth*“) zu befreien, die vor vielen hunderten Millionen Jahren stattgefunden haben (z. B. Hoffman et al. 1998).

Die Funktionsweise des Karbonat-Silikat-Zyklus entpuppt sich bei genauerem Hinsehen als glücklicher Zufall, denn er erfordert die Präsenz von Landmassen mit Ca-haltigen Silikaten, die verwittern und Ca-Ionen für die Karbonatbildung liefern können: Berge auf der Erde können kaum höher als das Mount Everest Massiv werden, da Gesteine ihrer eigenen Last nicht standhalten könnten. Vom Meeresboden gesehen, gibt es maximale topographische Unterschiede von weniger als 20 km, wenn man die Äquatorausbuchtung aufgrund der Fliehkraft der Erdumdrehung vernachlässigt. Mit anderen Worten, ein Faktor zwei bis drei mehr Ozeanwasser auf der Erde hätte die Präsenz von nicht dauerhaft überfluteten Landmassen fast unmöglich gemacht. Abgesehen davon, dass sich kein Landleben hätte entwickeln können, wäre eine Konsequenz, dass der wichtige Karbonat-Silikat-Zyklus kaum funktionieren könnte, sodass es wahrscheinlich nicht möglich gewesen wäre, das Klima auf der Erde über einen langen Zeitraum von mehr als vier Milliarden Jahren so stabil zu halten, wie es für die Entwicklung komplexer Lebensformen notwendig war. Betont werden sollte allerdings, dass dieser Zyklus als CO_2 Regulator nur sehr grob funktioniert: er kann auf Zeitskalen von Millionen von Jahren extreme Ausschläge in zu heiße oder zu kalte Phasen verhindern oder einen Weg aus solchen klimatischen „Sackgassen“ bieten, allerdings kann er weder Eiszeiten verhindern, noch eine kurzfristige CO_2 Freisetzung kompensieren, die gegenwärtig durch den zivilisatorischen Verbrauch fossiler Brennstoffe im Gange ist (→Klimawandel).

Die Erde hat nicht nur die optimale Menge an Wasser, sondern auch an Kohlenstoff, nämlich etwa ein halbes Promille (Gail und Trieloff 2017): ausgehend von den deutlich größeren Häufigkeiten in Meteoriten hätte die Erde anfangs durchaus einen Faktor zehn mehr Kohlenstoff haben können, diese Mengen könnten aber wohl nicht im Rahmen des Karbonat-Silikat-Zyklus abgebaut werden: Schon jetzt stammt bei der Verwitterung etwa 80 Prozent Ca aus Karbonaten selbst und nicht aus Silikaten (Berner, Lasaga und Garrels 1983), d. h. eine viel größere Menge von Karbonaten könnte kaum gebildet werden, weil die Verwitterung dann auch in großem Umfang Karbonat abbaut und CO_2 freisetzt.

Entstehung des Lebens

Das Leben tauchte auf der Erde schon relativ früh auf, denn die biologische Fixierung von Kohlenstoff ist bereits vor mindestens 3,8 Milliarden Jahren durch eine Anreicherung des leichten Kohlenstoff-Isotops ^{12}C in derart alten Gesteinen belegt (Schidlowski 1988). Diese Aktivität wird durch zahlreiche Vorkommen von Stromatolithen im Erdzeitalter des Archaikums bezeugt. Vorläufer der Cyanobakterien entwickelten dann auch die oxygene Photosynthese, bei der Sauerstoff aus Kohlendioxid mit Hilfe von Licht produziert wird. Der zunächst freigesetzte Sauerstoff wurde jedoch sofort wieder verbraucht, der O_2 -Gehalt der Atmosphäre blieb daher für lange Zeit sehr niedrig. In den Ozeanen gelöste Fe-Ionen wurden oxidiert und als Eisenoxid in sogenannten gebänderten Eisenformationen abgelagert. Diese machen heute 90 Prozent aller wirtschaftlich genutzten Eisenerze aus.

Eine sehr lange Zeitspanne mit relativ stabilem Klima war auf unserer Erde notwendig, damit komplexes Leben entstehen konnte. Erst vor etwa 700–800 Millionen Jahren nämlich entwickelte sich beispielsweise mehrzelliges Leben in den Meeren, die ersten Landpflanzen erst etwa 300 Millionen Jahre später. Warum geschah dies so spät?

Sauerstoff in der Atmosphäre

Vor etwa 2,4 Milliarden Jahren waren insbesondere im Meer leicht oxidierbare Stoffe weitestgehend aufgebraucht, sodass Sauerstoff in die Atmosphäre gelangen konnte. Obwohl es sich dabei nur um Promille oder Prozent des heutigen Wertes handelte, wird dies als „*Great Oxygenation Event*“ bezeichnet. Damit war die Oxidation des Planeten Erde relativ weit vorangeschritten, da ab diesem Zeitpunkt auch auf den kontinentalen Landmassen Eisensulfidverbindungen oxidiert und als Rotschichten abgelagert wurden. Der zunehmende Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre erlaubte den energiereichen Stoffwechsel der Atmung und später dann die Entwicklung vielzelliger Lebewesen in den Ozeanen. Vor etwa 600–500 Millionen Jahren waren Sauerstoffsinken weitgehend gesättigt und der Anteil in der Atmosphäre stieg auf mehr als zehn Prozent an. Mit heute vergleichbare Sauerstoffkonzentrationen um etwa 20 Prozent wurden erst vor ca. 350 Millionen Jahren erreicht. Bereits vor etwa 750–400 Millionen Jahren erlaubte der relativ hohe Sauerstoffgehalt einen zunehmend effektiven Schutz durch eine Ozonschicht (O_3), die dann später auch vielzelligen und großen Landlebewesen die Existenz ermöglichte. Nur durch die Ozonschicht konnte das Leben das schützende Meer verlassen und das Land erobern. Zu guter Letzt ist ein Planet mit sauerstoffreicher Atmosphäre auch vor dem Verlust von Wasser besser geschützt: In hohen Atmosphärenschichten werden fortlaufend Wassermoleküle durch UV-Licht gespalten. Dadurch kann freiwerdender Wasserstoff der Erde verloren gehen, da das Erdschwerefeld dieses Molekül nicht beliebig lange halten kann. Dieser Verlustprozess wird durch Sauerstoff in zweierlei Hinsicht vermindert oder verhindert: Zum einen wird durch Sauerstoff energiereiche UV-Strahlung effektiv absorbiert, zum anderen kann bereits durch Spaltung entstandenes H auch schnell wieder zu H_2O oxidiert werden.

Sauerstoff und komplexes Leben

So ermöglichte der atmosphärische Sauerstoff die Entwicklung des Lebens, von einfachen Algen und Bakterien zu den ersten vielzelligen Lebewesen wie z. B. Schwämmen, der Ediacara-Fauna gegen Ende des Präkambriums und den bilateralsymmetrisch gebauten Lebewesen während der Radiation im Kambrium (541–485 Millionen Jahren vor heute), als viele der heutigen Tierstämme entstanden, u. a. mit Gehirn, Augen und Körpersegmentierung. Während dieser Zeit fand die Entwicklung des Lebens ausschließlich im Wasser statt, bis sich dann im Silur vor ca. 440 Millionen Jahren die ersten Landpflanzen und im darauffolgenden Devon die ersten Landwirbeltiere entwickelten. Während im Erdmittelalter (beginnend vor 252 Millionen Jahren) die Saurier das Land dominierten, übernahmen die Säugetiere erst in der Erdneuzeit (beginnend vor 66 Millionen Jahren) die dominante Rolle im Tierreich. Aus diesen entwickelten sich dann auch Primaten und letztendlich Hominiden und der moderne Mensch. Ein ausführliches interdisziplinäres Kapitel zum Thema Evolution und Umwelt findet sich im Teil „Konzepte“ dieses Buches (→Evolution).

So lebensfreundlich uns unsere heutige Geo-, Atmo- und Biosphäre erscheinen mag, ist sie doch ein empfindlich austariertes System im dynamischen Gleichgewicht. Fluktuationen wichtiger Parameter dieses Systems waren in der Erdvergangenheit beträchtlich und führten immer wieder zu Klimaschwankungen und zum Vergehen und Entstehen biologischer Spezies, wie z. B. das Massenaussterben am Ende des Erdmittelalters. Unsere Zivilisation ist noch einmal empfindlicher gegenüber natürlichen und anthropogenen Störungen, die im nachfolgenden Abschnitt behandelt werden.

Umweltgefahren, Naturkatastrophen und Naturrisiken in den Geowissenschaften

Die Geowissenschaften untersuchen Ursachen und Eintrittshäufigkeiten von Umweltgefahren und spielen damit eine wichtige Rolle in der interdisziplinären *Hazard*forschung (→Risiko). Sie fokussieren sich dabei auf die physikalischen und chemischen Prozesse von Geogefahren und der damit verbundenen Katastrophen. Primäres Ziel dieser Forschung ist es, quantitative Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten katastrophaler Umweltereignisse zu ermitteln, praktikable und ökonomisch sinnvolle Maßnahmen der Vorkehrung aufzuzeigen und letztendlich diese Ereignisse vorherzusagen.

Naturkatastrophen sind besonders dramatische, natürlich auftretende Umweltereignisse, deren Schäden über ein alltäglich akzeptables Niveau hinausgehen und deren Folgen oft nur durch weitreichende politische Entscheidungen und Maßnahmen gemindert werden können, die oft überregionale bis internationale Koordinierung erfordern (Hellbrück und Kals 2012). Naturkatastrophen sind daher Extremfälle von für den Menschen schädlichen Ereignissen, die als *Geogefahren* („*geohazards*“) natürlichen Ursprungs sind und daher weitgehend ohne Einwirkung des Menschen ablaufen. Der Begriff *Georisiko* („*georisk*“) beinhaltet neben der Ein-

trittswahrscheinlichkeit für ein solches natürliches Ereignis immer auch dessen Schadenspotential. Die für gesellschaftliche Entscheidungsprozesse relevante Abschätzung und Bewertung von Risiken ist daher ein kultureller Prozess, bei dem die naturwissenschaftlich ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten und der zu erwartenden Schaden in Relation zu Kosten und anderen gesellschaftlichen Faktoren gesetzt werden (→Risiko).

Die Verwendung des Begriffs Naturkatastrophe soll dabei keine politische und gesellschaftliche Verantwortung für die mit derartigen Ereignissen verbundenen Schäden ausblenden (Felgentreff und Glade 2008). Denn auch wenn Umweltereignisse unbeeinflusst vom Menschen stattfinden, können deren Auswirkungen sich dramatisch unterscheiden. Beispielsweise sind bei Erdbeben nicht die natürlich eintretenden seismischen Erschütterungen tödlich, sondern primär die von Menschen errichteten Gebäude, die als Folge eines Erdbebens einstürzen. Erdbebensicheres Bauen oder eine Nachrüstung von Häusern und anderer Infrastruktur kann ohne Zweifel Todesfälle und materielle Schäden verhindern oder minimieren, hat aber ihren Preis und oft auch andere Nachteile, wie z. B. ästhetische Veränderungen an historischen architektonischen Wahrzeichen. Darüber hinaus wird eine klare Abgrenzung zwischen natürlichen und technischen Katastrophen (z. B. eine Explosion in einer chemischen Fabrik oder eine Havarie in einem Kernkraftwerk) dadurch erschwert, dass beide oft im Verbund auftreten. Ein Beispiel hierfür ist der Austritt radioaktiven Materials aus den Reaktorgebäuden von Fukushima (Japan) als mittelbare Folge des Tōhoku-Erdbebens im Jahre 2011 und der dadurch ausgelösten Tsunami.

Aufgrund der engen Verzahnung zwischen geologischen Prozessen und menschlichen Aktivitäten, die sich sowohl verstärkend als auch verhindernd auswirken können, überlappen sich geowissenschaftliche und geographische Ansätze (→Geographie) in der Erforschung von Geogefahren. Diese Forschung und ihre Anwendungen sind darüber hinaus in politische und soziale Rahmenbedingungen eingebunden (→Politikwissenschaften, →Soziologie). Erdbeben und Vulkanausbrüche beispielsweise sind stochastische Ereignisse, deren Zeitpunkt und Intensität gegenwärtig gar nicht bzw. nur mit gravierenden Unsicherheiten vorhersagbar sind. So gab es vor dem Erdbeben von L'Aquila im Jahre 2009 zwar zahlreichere kleine Vorbeben, das Eintreten des katastrophalen Erdbebens mit etwa 300 Toten kam dagegen unerwartet (Abbott und Nosengo 2014). Aufgrund der ausgebliebenen Warnung wurden die den italienischen Zivilschutz beratenden Seismologen angeklagt und auch in erster Instanz verurteilt. Dieser Fall löste eine heftige Diskussion aus, ob wissenschaftlich begründete Prognosen mit ihren immanenten Fehlern Grundlage juristischer Bewertungen bilden können. Das in der Revision aufgehobene Urteil wurde von Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern weltweit mit Erleichterung aufgenommen (Abbott und Nosengo 2014).

Endogene Geogefahren wie Erdbeben und Vulkanausbrüche setzen extrem hohe Energiemengen frei, die sich weiträumig und langfristig auf Mensch und Umwelt auswirken können. Beide Ereignisse können auch Tsunamis auslösen, die insbesondere Küstenregionen gefährden. Da diese energetischen Ereignisse auf Vorgänge im Inneren der Erde zurückzuführen sind, die

primär mit geophysikalischen Methoden nachzuweisen sind, werden endogene Geogefahren auch als geophysikalische oder geologische Naturgefahren bezeichnet (Höppe 2008). Eine besondere Kategorie stellen Naturgefahren dar, die mit dem Impakt extraterrestrischer Gesteinskörper (Meteoriten) einhergehen, die in ihren Auswirkungen mit endogenen Extremereignissen vergleichbar sein können, aber hier aus Platzgründen nicht näher besprochen werden.

Von geowissenschaftlicher Seite geht es bei der Erforschung von Erdbeben primär darum, deren Verbreitung, Häufigkeit, Intensität und mögliche Auswirkungen zu quantifizieren. Weiterhin erzeugen Erdbeben seismische Wellen, die tiefe Bereiche der Erde durchqueren und mit Hilfe von Seismometern aufgezeichnet werden können. Diese seismischen Signale liefern Informationen über die Struktur und Materialeigenschaften der tiefen Erde, die mit anderen Methoden (z. B. Bohrungen) unzugänglich sind. Erdbeben werden primär durch tektonische Bewegungen der festen Lithosphärenplatten ausgelöst, die beispielsweise durch Satelliten des *Global Positioning Systems* (GPS) gemessen werden können. Die Grenzflächen zwischen diesen Lithosphärenplatten stellen seismogene Zonen dar, an denen sich Erdbeben häufen. Die mit der Plattenbewegung verbundene Deformation von Gesteinspaketen kann allerdings auch in innere Plattenbereiche übertragen werden. Ebenso bauen vertikale Bewegungen der Lithosphäre (z. B. durch Hebung nach dem Abschmelzen von Gletschern) Spannungen in Gesteinen auf, die auch fern von Plattengrenzen Erdbeben auslösen können. Daher ist die gesamte Erdoberfläche grundsätzlich seismischen Gefahren ausgesetzt, wenn auch mit regional stark unterschiedlichen Häufigkeiten und Intensitäten. Die Paläoseismologie untersucht Spuren vergangener Erdbeben in geologischen Archiven, deren Altersstellung durch verschiedene Datierungsmethoden ermittelt werden kann. Damit lassen sich in vielen Fällen seismische Wiederholungsraten an aktiven Störungssystemen bestimmen. Schwache Ereignisse sind dagegen nur schwer nachzuweisen, da sie in diesen Archiven nur geringfügige oder gar keine Spuren hinterlassen. Extremereignisse treten allerdings besonders selten auf, sodass ihre Wiederholungsraten und Auswirkungen oft nur ungenau vorhersagbar sind. So traten Erdbeben wie das Sumatra Ereignis im Jahre 2004 mit einer seismischen Momentenmagnitude von >9 in den vergangenen 100 Jahren weltweit nur dreimal auf (Schwanke, Podbregar und Lohmann 2009).

Vulkane gefährden direkt etwa zehn Prozent der Weltbevölkerung (Tilling und Lipman 1993). Ihre Verbreitung hängt ebenfalls stark mit den Bewegungen lithosphärischer Platten zusammen. Die in vulkanischen Eruptionen freigesetzte Energie wird mit dem Aufstieg heißen geschmolzenen Gesteins aus Tiefen von typischerweise etwa 100–150 km in oberflächennahe Bereiche der Kruste transportiert. Dieser Magmenaufstieg ist über geophysikalische und geochemische Methoden nachweisbar, wie zum Beispiel durch das Aufspüren von Erdbebenschwärmen, Oberflächenhebungen oder verstärktem oder heißerem Austreten von Gasen in vulkanischen Fumarolen oder Solfataren. Vulkanausbrüche gehen dann mit der zumindest teilweisen Entleerung dieser Magmenreservoirs einher, die sich oft in Tiefen von wenigen

Kilometern unter der Erdoberfläche angesammelt haben. Vulkanismus auf der Erde ist zu etwa 75 Prozent an divergente Plattengrenzen gebunden, an denen sich Platten voneinander wegbewegen (Global Volcanism Program 2013). Diese Vulkane befinden sich meist untermeerisch in Meerestiefen von 2 bis 3 km und ihre Ausbrüche verlaufen in der Regel vom Menschen unbemerkt. Eine Ausnahme ist Island, wo eine solche Plattengrenze übermeerisch austritt. Vulkane an konvergenten (sich aufeinander zubewegenden) Plattengrenzen haben dagegen ein sehr hohes Gefahrenpotential, da ihre Eruptionen aufgrund hoher Gasgehalte und der zähflüssigen Natur der dort gebildeten Schmelzen besonders explosiv sind. Außerdem sind die betroffenen Küstenregionen, wie entlang des pazifischen Feuerrings mit seinen zahlreichen Vulkanen, oft dicht besiedelt. Die meisten der weltweit 566 Vulkane, für die in historischer Zeit Ausbrüche belegt sind (Global Volcanism Program 2013), befinden sich an solchen konvergenten Plattengrenzen. Vulkane innerhalb von Platten wie z. B. in Riftzonen bilden den Rest. Darunter fällt auch der Vulkanismus in der Eifel, der trotz des Fehlens historischer Eruptionen nicht als erloschen gilt. Vulkanische Prozesse mit hohem Gefährdungspotential sind insbesondere hochbewegliche und weitreichende Gas- und Partikelgemenge (pyroklastische Ströme) sowie vulkanische Schlammströme (Lahare). Lavaströme dagegen können zwar Infrastruktur beschädigen, sind aber in der Regel aufgrund ihres langsamen Fließens für den Menschen nicht tödlich. Vulkanische Erdbeben und Tsunamis stellen weitere potenzielle Gefahrenquellen in der Nähe von Vulkangebäuden an Land bzw. für vulkanische Inseln und angrenzende Küstenregionen dar, während die Auswirkungen in großer Entfernung abgelagerter vulkanischer Aschen oder der Gaseintrag in die Atmosphäre in der Regel nicht direkt tödlich sind, aber langfristig große wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen können. Wie bei Erdbeben sind vulkanische Extremereignisse selten und daher nur unvollständig verstanden. Das größte historische Vulkanereignis, die Eruption des Tambora-Vulkans in Indonesien (Sumbawa) im Jahre 1815, ist als der Auslöser des „Jahres ohne Sommer“ in die Geschichte eingegangen (Behringer 2015). Noch gewaltigere Eruptionen wie die Toba-Eruption (Sumatra) vor ca. 75.000 Jahren sind nur aus geologischen Archiven bekannt. Auswirkungen derartiger Eruptionen hätten mit Sicherheit global spürbare Folgen.

Erdbeben und Vulkaneruptionen als geophysikalische Ereignisse können beim derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik nicht verhindert werden. Selbst eine verlässliche Vorhersage, mit der möglicherweise Schäden verhindert oder begrenzt werden können, ist gegenwärtig nicht (bei Erdbeben) oder nur rudimentär (bei Vulkanen) entwickelt. Allerdings gibt es erfolgreiche Ansätze für effektive Frühwarnung bei seismischen Extremereignissen, wie z. B. das Frühwarnsystem des Japanischen Meteorologischen Dienstes und das als Konsequenz aus der Tsunami-Katastrophe im Indischen Ozean im Jahre 2004 etablierte „*German-Indonesian Tsunami Early Warning System*“. Auch für vulkanische Ereignisse gibt es entsprechende Warnsysteme, wie z. B. das „*Mount Rainier Volcano Lahar Warning System*“, mit dem vom Mount Rainier Vulkan ausgehende Lahare im Großraum Seattle-Tacoma (USA) frühzeitig erkannt werden sollen. Darüber hinaus erlauben es geotechnische Maßnahmen, die

Auswirkungen geophysikalischer Ereignisse zu mildern. Ein Beispiel dafür sind erdbebensichere Bauweise und Infrastrukturmaßnahmen (z. B. eine widerstandsfähige Wasser- und Energieversorgung), die Menschenleben retten und weitere Schäden wie Brände nach Erdbeben reduzieren können (→Vulnerabilität und Resilienz).

Exogene Geogefahren basieren auf Prozessen, deren Antriebsenergie die Sonne ist. Alternativ werden extreme Ereignisse dieser Art als meteorologische, atmosphärische oder hydrologische Naturkatastrophen kategorisiert. Dazu zählen gravitative Massenbewegungen (Erdrutsche, Muren), tropische und außertropische Zyklone, Tornados und andere Wirbelstürme, sowie Flusshochwässer oder Sturmfluten (Felgentreff und Glade 2008). Geotechnische Maßnahmen, wie z. B. das Abtragen oder die Stabilisierung von Hängen, können dabei Schäden verhindern oder minimieren, während größere Ereignisse wie Hurrikane gegenwärtig technisch weder zu verhindern noch zu beherrschen sind. Anders als bei den endogenen Geogefahren Erdbeben und Vulkanismus können allerdings exogene Ereignisse durch menschliches Eingreifen erst ausgelöst oder zumindest in ihren Auswirkungen verstärkt werden. Beispiele für derartige Eingriffe sind Entwaldung zur Schaffung landwirtschaftlicher Flächen oder Flächenversiegelung für Wohn- und Verkehrsbauten, die zu Bodenerosion, ungebremstem Wasserabfluss und damit zu katastrophalen Flusshochwässern führen können. Klimatologische Umweltgefahren haben ebenfalls exogene Ursachen, die durch anthropogene Einwirkungen noch verstärkt werden (→Anthropozän). Dazu zählen Dürren, Hitzewellen, Waldbrände und Meeresspiegelanstieg mit Sturmfluten und Überschwemmungen als Folgegefahren. Da diese Schäden oft langfristig und schleichend sind, ist die geowissenschaftliche Rekonstruktion von Paläoumweltbedingungen besonders wichtig, um eine empirische Grundlage für die Modellierung klimatologischer Umweltgefahren zu schaffen und daraus Entscheidungshilfen für politische und gesellschaftliche Maßnahmen abzuleiten. In Zusammenarbeit mit historischen Kulturwissenschaften (→Geschichte, →Archäologie) können die Geowissenschaften zu einem besseren Verständnis der langfristigen Entwicklung von Mensch-Umwelt-Interaktionen beitragen.

Biogeochemische Stoffkreisläufe und deren Veränderungen durch den Menschen

Ein relativ neuer Teilbereich der Geowissenschaften ist die Biogeochemie (Definition Biogeochemie siehe Box). Die Aufgabe der Umwelt-Biogeochemie besteht vornehmlich darin, die mit der Lebenstätigkeit der biotischen Materie verbundenen Veränderungen in der Verteilung der Elemente sowie die sie auslösenden bzw. kontrollierenden Prozesse und Faktoren in den fünf Sphären der Erdoberfläche (Atmo-, Bio-, Hydro-, Litho- und Pedosphäre) zu untersuchen. Daher behandelt die Biogeochemie oftmals keine rein geowissenschaftlichen Themen, sondern ist auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit vor allem mit den Nachbardisziplinen der →Chemie, →Physik, →Biologie und →Geographie angewiesen. In Abgrenzung zu den Bio-

wissenschaften stehen nicht die Lebewesen und deren Gemeinschaften im Vordergrund des Interesses, sondern deren Umwelt und dessen Beeinflussung durch natürliche und anthropogen überprägte Vorgänge. Häufig wird der Mensch, und insbesondere seine mit der industriellen Revolution zunehmende Beeinflussung der Umwelt, als entscheidender Störfaktor der natürlichen Stoffkreisläufe dargestellt. In vielen Ökosystemen haben die menschlichen Eingriffe Reservoir, Flüsse und die chemischen Ausprägungsformen von z. B. Spurenmetallen (z. B. Arsen, Blei und Quecksilber), gegenüber deren natürlichen Vorkommen außerordentlich verändert (Matschullat, Tobschall und Voigt 1997). Die durch die menschliche Tätigkeit hervorgerufene Beschleunigung biogeochemischer Prozesse und Veränderung der Elementkreisläufe von z. B. Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff und Phosphor haben heute Dimensionen angenommen, die mit erdgeschichtlichen Evolutionsprozessen vergleichbar sind (Matschullat, Tobschall und Voigt 1997; Steffen, Crutzen und McNeill 2007). Im Vergleich zu geochemischen Verwitterungsprozessen, die die Erdoberfläche und Erdatmosphäre auf langfristigen Skalen beeinflussen (Millionen Jahre – siehe auch Abschnitt oben „Karbonat-Silikat-Zyklus“), hinterlassen die Veränderungen der biogeochemischen Kreisläufe wie z. B. von Kohlenstoff (durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen) schon innerhalb von relativ kurzen Zeiträumen (Jahre bis Jahrhunderte) deutliche Spuren auf der Erdoberfläche (→Klimawandel).

Biogeochemie

Die Biogeochemie (altgriechisch *βίος bios* = Leben, *γη ge* = Erde, *γεω- geo-* = Erde betreffend, *χημεία chemeia* = Chemie) ist eine interdisziplinäre Systemwissenschaft, deren Themenkreis alle fünf geochemischen Sphären umfasst: Biosphäre, Erdatmosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre und Lithosphäre. Als Begründer der Biogeochemie gilt der russische Wissenschaftler Vladimir Vernadsky (1863–1945), dessen Buch „*The Biosphere*“, erstmalig erschienen im Jahre 1926, eine Physik der Erde als lebendiges Ganzes formulierte. Die Biogeochemie ist ein Teilbereich der modernen Geowissenschaften und untersucht die chemischen, biologischen und physikalischen Prozesse, welche dem Aufbau und den Funktionen von Ökosystemen zu Grunde liegen. Der Bereich der Forschung befasst sich im Wesentlichen mit den Prozessen und dem Stoffhaushalt, d. h. Stoffflüssen in und aus Systemen, sowie den Stoffumsätzen im System selbst. Die Bilanzierung der Flüsse erfolgt meistens an den Systemgrenzen. Eine bedeutende Rolle spielen die Stoffkreisläufe der Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor und wie diese durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden.

Die Aktivitäten des Menschen greifen in vielen Fällen nachhaltig in die Stoffkreisläufe vieler Elemente ein: lokal, regional und global. So übersteigen die Emissionen aus anthropogenen

Quellen häufig jene natürlicher Herkunft um ein Vielfaches (Matschullat, Tobschall und Voigt 1997; Bliefert 2002; Steffen, Crutzen und McNeill 2007). Besonders deutlich zeigen sich diese Veränderungen am globalen biogeochemischen Phosphor- und Stickstoffkreislauf. Durch den erhöhten Eintrag von Nährstoffen, wie z. B. Stickstoff und Phosphor, kommt es zur Überdüngung (Eutrophierung) von Ökosystemen (siehe auch Erläuterungen weiter unten zu den Umweltproblemfeldern), die meist mit nachteiligen Folgen für die Ökologie der Gewässer und ihrer Nutzbarkeit durch den Menschen verbunden ist. Die Änderungen des globalen biogeochemischen Kohlenstoffkreislaufes – vor allem die durch den Menschen bedingten erhöhten Emissionen von Kohlendioxid und Methan – haben jetzt schon einen erheblichen Einfluss auf das Klima der Erde (→Klimawandel).

Um die natürlichen biogeochemischen Stoffkreisläufe von chemischen Elementen und Verbindungen zu verstehen und von anthropogenen Änderungen abzugrenzen, werden geowissenschaftliche Rekonstruktionen der Vergangenheit anhand von Umweltarchiven durchgeführt. Zu den Umweltarchiven zählen z. B. Gletschereis, Böden, Moore, Bäume, Höhlenablagerungen und Sedimentkerne aus marinen und terrestrischen Ablagerungen. Diese Archive geben einen Einblick in den Luft- und Wassertransport von Stoffen auf Zeitskalen von Monaten bis Millionen Jahren. Das Verständnis der natürlichen Gesamtkreisläufe von Elementen ist deshalb eine Voraussetzung, um den anthropogenen Einfluss zu verstehen.

Durch das Auftreten massiver Umweltprobleme (z. B. der großflächige Einsatz des Insektenvernichtungsmittels DDT – Dichlordiphenyltrichlorethan – und die Eutrophierung von Gewässern, sowie die Bildung von Smog in den Städten [→Chemie]) rückte die biogeochemische Forschung in den 1960er in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Als Meilenstein der Umwelt-Biogeochemie wird das Buch „Der stumme Frühling“ von Rachel Carson (Carson 1963) angesehen. Dieses umweltwissenschaftliche Buch wurde bereits 1962 veröffentlicht und dokumentiert die nachteiligen Umweltauswirkungen, die durch den Einsatz von Pestiziden entstehen. Dies führte zu einer Wende in der nationalen Pestizidpolitik der Vereinigten Staaten, namentlich zu einem landesweiten Verbot von DDT für landwirtschaftliche Zwecke und trug dazu bei, eine Umweltbewegung anzuregen, die zur Gründung der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde führte.

Später in den 1980er Jahren wurde durch das Waldsterben, die Versauerung von Seen, das polare Ozonloch in der Stratosphäre und durch die Nuklearkatastrophe in Tschernobyl einer breiten Öffentlichkeit die Notwendigkeit umfassender Umweltstudien zum Verbleib von Luft-, Wasser- und Bodenschadstoffen bewusst. Durch die rasante Zunahme klimawirksamer Gase in der Atmosphäre und sich in der Folge schnell verändernde globale Oberflächentemperaturen und ansteigende Meeresspiegel hat die geowissenschaftliche Umweltforschung in diesen Bereichen in den letzten zwei Dekaden stark zugenommen. Zudem sind in den letzten Jahren der Eintrag und Verbleib von Mikroplastik in der Umwelt in den Fokus wissenschaftlicher Studien und öffentlicher Debatten geraten. Durch die detaillierte Untersuchung des Stoffhaushalts von Ökosystemen erhofft man sich grundlegende Aufschlüsse über Funktion und Steue-

rung von Ökosystemen und somit ein besseres Verständnis der Problemursachen und der Umweltverschmutzung.

Mit Hilfe von biogeochemischen Ansätzen werden verschiedene aktuelle Umweltproblemfelder untersucht wie z. B. die Boden- und Gewässerversauerung; terrestrische und aquatische Eutrophierung; Kohlendioxid- und Methan-Kreislauf und Klimawandel; die chemische Veränderung der Atmosphäre und ihre Folgen für Tiere, Menschen und die Vegetation; Pestizidverbreitung; Waldsterben und Eutrophierung; Ozonzerstörung in der Stratosphäre und Ozonbildung in der Troposphäre; Lachgas- und Stickoxidemissionen und die Phosphorproblematik. In der letzten Dekade wurden diese Umweltprobleme zunehmend auch mit dem Begriff der „planetaren Grenzen“ in Verbindung gebracht und diskutiert. Als planetare Grenzen oder Belastungsgrenzen der Erde (*planetary boundaries* – neun planetare Grenzen wurden anfänglich festgelegt) werden ökologische Grenzen der Erde bezeichnet, deren Überschreitung die Stabilität des Ökosystems und die Lebensgrundlagen der Menschheit gefährden (Rockström et al. 2009). Einige der planetaren Grenzen wurden bereits überschritten, zu denen auch die biogeochemischen Stoffkreisläufe von Stickstoff- und Phosphor gehören (→Anthropozän). Phosphor und Stickstoff sind als Dünger in der Landwirtschaft, aber auch in der industriellen Nutzung nahezu unverzichtbar geworden. Die exzessive Ausbringung dieser Stoffe und dadurch bedingte Eutrophierung von Gewässern und Böden gefährden zahlreiche Ökosysteme und wirken sich auf die Gesundheit von Mensch und Tier aus.

Die industrielle Stickstofffixierung hat mengenmäßig die biologische Stickstofffixierung bald erreicht. In der Landwirtschaft werden durch Düngemittel und Viehzucht große Mengen an Stickstoff in die Umwelt eingebracht. Zudem gelangen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und von Biomasse Stickoxide in die Atmosphäre. Die Auswirkungen von Stickstoff sind vielfältig und von der eingetragenen Stickstoffverbindung abhängig. So tragen in der Landwirtschaft Emissionen von Lachgas als eines der stärksten klimawirksamen Gase direkt zum Treibhauseffekt bei. Als Nitrat sammelt es sich in Gewässern und Böden und kann von Bakterien zu Nitrit umgewandelt werden, das für zahlreiche Organismen giftig ist. Die in der EU-Grundwasserrichtlinie europaweit einheitlich festgelegte Qualitätsnorm von 50 mg Nitrat je Liter wurde in der deutschen Grundwasserverordnung als Schwellenwert ebenso verankert. Dennoch weisen im Berichtszeitraum 2008 bis 2014 ca. 18 Prozent der Messstellen des repräsentativen EUA-Grundwassermessnetzes (Messnetz für die Berichterstattung an die Europäische Umweltagentur) Nitratgehalte über dem Schwellenwert von 50 mg je Liter auf (→Rechtswissenschaften).

Phosphor (hauptsächlich in Form von Phosphaten) ist ein unersetzlicher Grundstoff jeglichen Lebens und wird in Pflanzen und Tieren sehr schnell umgesetzt. Allerdings sind die Prozesse, die Phosphate über Böden oder Meere bewegen sehr träge, was den natürlichen Phosphorkreislauf zu einem der langsamsten biogeochemischen Kreisläufe macht. Die Umsetzung aus natürlichen Quellen wird auf ca. drei Millionen Tonnen Phosphor pro Jahr geschätzt. Seit Beginn der industriellen Düngemittelproduktion wurden zusätzlich große Mengen an Phosphor

vom Menschen ausgebracht. Der anthropogene Eintrag von Phosphor entspricht ungefähr dem fünf- bis sechsfachen der natürlichen Mobilisierung. Von den weltweit abgebauten ca. 200 Millionen Tonnen Rohphosphor (aus Apatit und Phosphorit) pro Jahr werden 80 Prozent zu Dünger verarbeitet, um die Nahrungsmittelversorgung zu sichern. Denn vor allem der Fleischhunger der westlichen Welt und der neue Wohlstand in aufstrebenden Ländern treiben die Nachfrage nach Dünger für Futtermittel in die Höhe.

Die Gefahr, dass dieser Rohstoff bald zur Neige geht, wurde in der letzten Dekade unter dem Begriff der Phosphorkrise zusammengefasst. Die Prognosen, wann die weltweiten Vorräte erschöpft sein werden, schwanken zwischen 100 und 300 Jahren (Cordell und White 2011). Es ist vorhersehbar, dass der Hunger einer stetig wachsenden Weltbevölkerung die Nachfrage nach dem wichtigen Nährstoff, der in nahezu jedem Mehrkomponenten-Dünger steckt, weiter verstärken wird. Insbesondere für Länder wie Deutschland, die keine eigenen Vorkommen haben, könnte es dann schwer werden, den Bedarf zu decken. Angesichts der essenziellen Bedeutung von Phosphor ist es nur schwer nachvollziehbar, warum die Menschheit so verschwenderisch damit umgeht. In der Landwirtschaft nehmen Ackerpflanzen den ihnen zugeachten Phosphatdünger oftmals nur zu einem kleinen Teil auf. Den Überschuss spült der Regen in naheliegende Gewässer und meist über Flüsse in den Ozean, wo es zur Eutrophierung kommt und damit zu einer großen Gefahr für Wassertiere und -pflanzen. Ebenso große Verluste verursacht die menschliche Verdauung. Etwa zwei Gramm Phosphor scheidet jeder Mensch pro Tag aus. Über die Toilette gelangt der Phosphor in die Kläranlagen und endet zum großen Teil im Klärschlamm, der heutzutage oft verbrannt und deponiert wird – mitsamt dem kostbaren Nährstoff.

Biogeochemie, Geo-Engineering und Anthropozän

Die massiven Veränderungen der Umwelt sind vor allem durch das enorme Wachstum der Bevölkerung und der Verbreitung konsumintensiver Lebensstile bedingt. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Weltbevölkerung verzehnfacht und seit 1950 („*Great Acceleration*“) ungefähr verdreifacht. Wir leben also nicht mehr in einer leeren, sondern in einer vollen Welt, mit einer limitierten Menge an Rohstoffen. Der *Club of Rome* fordert daher neben einem nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen eine neue Aufklärung (→Nachhaltigkeit; von Weizsäcker und Wijkman 2017), um kurzfristige Denkgewohnheiten und Handlungen des *homo oeconomicus* abzulösen (→Wachstum).

Mit der Industrialisierung ist der Mensch eine geologische Kraft geworden (Crutzen 2002; Steffen, Crutzen und McNeill 2007). Noch nie hat eine Spezies das Gesicht des Planeten Erde in so kurzer Zeit so grundlegend verändert. Die dramatischsten Veränderungen biogeochemischer Kreisläufe setzten in den 1950er Jahren ein und halten weitgehend unvermindert oder sogar verstärkt an. Die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf unserer Erdoberfläche sind unübersehbar und werden durch Aufnahmen aus dem All besonders augenscheinlich (Grant 2016). Wenn nicht eine globale Extremkatastrophe (wie im Abschnitt Naturkatastro-

phen beschrieben) die Menschheit trifft, wird sich die Rolle menschlicher Aktivitäten als dominierende Kraft in der Umwelt weiter verstärken.

In jüngerer Zeit entwickelte sich aus der Biogeochemie heraus auch die Idee des *Geo-Engineering*. Dieser Begriff bezeichnet Überlegungen, auf technischem Weg in biogeochemische Kreisläufe einzugreifen, etwa um die Klimaerwärmung oder die Versauerung der Meere zu bremsen (→Klimawandel).

Der Begriff des „Anthropozäns“ hat sich in vielen wissenschaftlichen und öffentlichen Debatten schon längst etabliert (Bubenzer, Gebhard und Keppler 2019) und wird auch im Rahmen dieses Buches aus interdisziplinärer Sicht weiter behandelt. In den Geowissenschaften wird deshalb schon länger (Lewis und Maslin 2015) diskutiert, ob das „Anthropozän“ offizieller Teil der geologischen Zeitskala wird und damit das Holozän – der gegenwärtige Zeitabschnitt der Erdgeschichte – als neue geologische Epoche ablöst (Zalasiewicz et al. 2019). Die Entscheidung trifft die *International Commission on Stratigraphy* (ICS), ein vornehmlich aus Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern bestehendes Gremium. Aus Sicht der Geowissenschaften bleibt mit großer Spannung abzuwarten, ob die Erde offiziell in ein neues geologisches Zeitalter eingetreten ist (→Anthropozän).

Literaturverzeichnis

- Abbott, Alison, und Nicola Nosenko. 2014. „Italian Seismologists Cleared of Manslaughter.“ *Nature News* 515, Nr. 7526: 171. <https://doi.org/10.1038/515171a>.
- Behringer, Wolfgang. 2015. *Tambora und das Jahr ohne Sommer: wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte*. München: C.H. Beck.
- Berner, Robert A., Antonio C. Lasaga und Robert M. Garrels. 1983. „The Carbonate-silicate Geochemical Cycle and its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide Over the Past 100 Million Years.“ *American Journal of Science* 283, Nr. 7: 641–83. <https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.641>.
- Briefert, Claus. 2012. *Umweltchemie*. Weinheim: John Wiley & Sons. Erstveröffentlichung 1994.
- Bubbenzer, Olaf, Hans Gebhard und Frank Keppler. 2019. „Der Mensch als Geologische Kraft – Das Zeitalter des Anthropozäns.“ *Ruperto Carola, Research Magazine Heidelberg University*, Ausgabe 15/2019: 24–33. Letzter Zugriff am 06. September 2021. <https://heiup.uni-heidelberg.de/journals/index.php/rupertocarola/article/view/24092>.
- Carson, Rachel. 1963. *Der stumme Frühling*. Übersetzt von Margaret Auer. München: Biederstein. Englische Erstveröffentlichung 1962.
- Cordell, Dana, und Stuart White. 2011. „Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security.“ *Sustainability* 3, Nr. 10: 2027–49. <https://doi.org/10.3390/su3102027>.
- Crutzen, Paul J. 2002. „Geology of Mankind.“ *Nature* 415, Nr. 23. <https://doi.org/10.1038/415023a>.
- Felgentreff, Carsten, und Thomas Glade, Hrsg. 2008. *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Feulner, Georg. 2012. „The Faint Young Sun Problem.“ *Reviews of Geophysics* 50, Nr. 2: 1–29. <https://doi.org/10.1029/2011rg000375>.
- Gail, Hans-Peter, und Mario Trieloff. 2017. „Spatial Distribution of Carbon Dust in the Early Solar Nebula and the Carbon Content of Planetesimals.“ *Astronomy & Astrophysics* 606, Nr. A16. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730480>.
- Global Volcanism Program. 2013. „Volcanoes of the World.“ Zugriff am 29. April 2019. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- Grant, Benjamin. 2016. *Overview: A New Perspective of Earth*. Danvers, MA: Amphoto Books.
- Hellbrück, Jürgen, und Elisabeth Kals. 2012. *Umweltpsychologie*. Wiesbaden: Springer.
- Hoffman, Paul F., Alan J. Kaufman, Galen P. Halverson und Daniel P. Schrag. 1998. „A Neoproterozoic Snowball Earth.“ *Science* 281, Nr. 5381: 1342–46. <https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>.

- Höppe, Peter. 2008. „Naturgefahren und Klimawandel: Die Rolle der Versicherungswirtschaft.“ *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 77, Nr. 4: 110–15. Letzter Zugriff am 06. September 2021. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/99539/1/vjh.77.4.110.pdf>.
- Lewis, Simon L., und Mark A. Maslin. 2015. „Defining the Anthropocene.“ *Nature* 519: 171–80. <https://doi.org/10.1038/nature14258>.
- Marty, Bernard. 2012. „The Origins and Concentrations of Water, Carbon, Nitrogen and Noble Gases on Earth.“ *Earth and Planetary Science Letters* 313–314: 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.040>.
- Matschullat, Jörg, Heinz-Jürgen Tobschall und Hans-Jürgen Voigt. 1997. *Geochemie und Umwelt: Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen und Jonathan A. Foley. 2009. „A Safe Operating Space for Humanity.“ *Nature* 461: 472–75. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Schidlowski, Manfred. 1988. „A 3,800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary Rocks.“ *Nature* 333: 313–18. <https://doi.org/10.1038/333313a0>.
- Schwanke, Karsten, Nadja Podbregar und Dieter Lohmann. 2009. *Naturkatastrophen: Wirbelstürme, Beben, Vulkanausbrüche – Entfesselte Gewalten und ihre Folgen*. Berlin: Springer.
- Steffen, Will, Paul J. Crutzen und John R. McNeill. 2007. „The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?“ *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36, Nr. 8: 614–22. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2).
- Tilling, Robert I., und Peter W. Lipman. 1993. „Lessons in Reducing Volcano Risk.“ *Nature* 364: 277–80. <https://doi.org/10.1038/364277a0>.
- Trieloff, Mario. 2009. „Chronology of the Solar System.“ In *Solar System, Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology – New Series, Astronomy and Astrophysics*, herausgegeben von Joachim Trümper, 599–612. Berlin: Springer.
- Trieloff, Mario. 2018. „Noble Gases.“ *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Zugriff am 31. Januar 2020. <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-33>.

- von Weizsäcker, Ernst Ulrich, und Anders Wijkman. 2017. *Come on! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet*. New York: Springer.
- Zahnle, Kevin, Laura Schaefer und Bruce Fegley. 2010. „Earth’s Earliest Atmospheres.“ *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 2, Nr. 10: a004895. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a004895>.
- Zalasiewicz, Jan, Colin N. Waters, Mark Williams und Colin Summerhayes. 2019. *The Anthropocene as a Geological Time Unit: A Guide to the Scientific Evidence and Current Debate*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108621359>.
- Zhukovska, Svetlana V., Hans-Peter Gail und Mario Trieloff. 2008. „Evolution of Interstellar Dust and Stardust in the Solar Neighborhood.“ *Astronomy & Astrophysics* 479, Nr. 2: 453–80. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077789>.