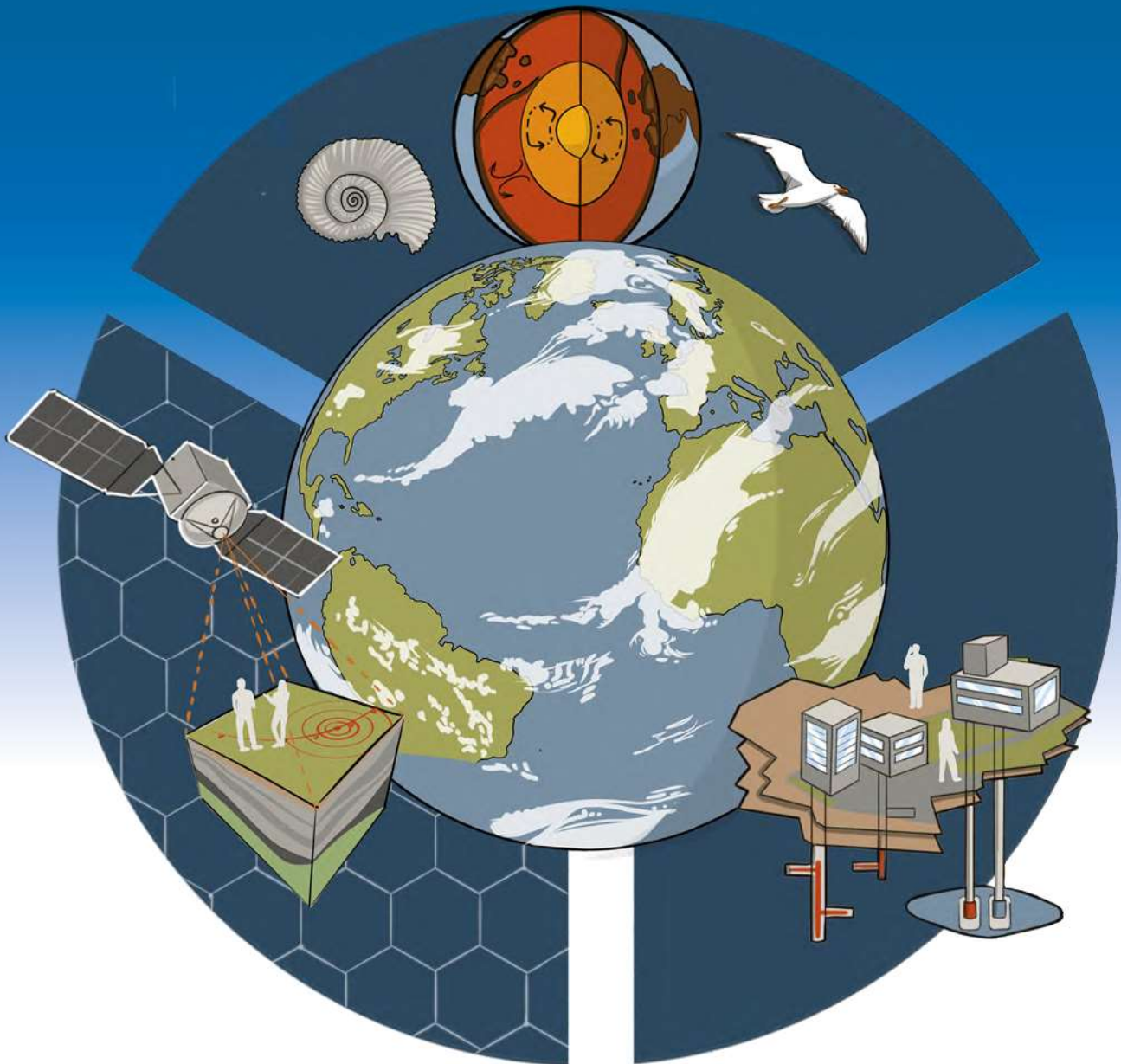


# Zukunftsforschung in den Geowissenschaften

## Entdeckungen · Diagnose · Lösungen



## VORWORT

Liebe Leserinnen und Leser,

in diesem White Paper präsentieren wir Zukunftsperspektiven für die geowissenschaftliche Forschung. Sie soll in großen, interdisziplinären Verbundprojekten umgesetzt werden. Mit diesen Vorschlägen wollen wir der Verantwortung der Geowissenschaften gerecht werden, einen Beitrag zu den großen und drängenden Fragen unserer Zeit zu leisten.

Diese Zukunftsperspektiven umfassen vor allem Lösungsvorschläge zur Abmilderung der großen Krise des Erdsystems und damit der Menschheit – des menschengemachten Klimawandels. Wir zeigen beispielhaft auf, wie der Wandel, dem die Erde ausgesetzt ist, mittels moderner Methoden gemessen und mit innovativen IT-Verfahren quantifiziert werden kann und wie daraus Strategien zum Umgang mit diesem Wandel entwickelt werden können.

Eine Stärke der Geowissenschaften lag schon immer in dem Streben nach Entdeckungen. Deshalb zeigen wir hier auch, wie wir faszinierende Erkenntnisse zur Erde und dem Leben gewinnen werden. Mit den zukünftigen Planetenmissionen und der Entdeckung anderer „Systeme“ auf den vielfältigen Arten der Exoplaneten sind wir zunehmend herausgefordert, ganz anders über das Erdsystem zu denken.

Die Schrift konzentriert sich dabei auf die Forschungsthemen der „festen Erde“. Sie zielt darauf ab, die Stärke unserer Disziplinen im gemeinsamen Vorgehen für die großen Fragen zu nutzen. Es liegen bedeutsame Aufgaben vor uns, die eine intensive, engagierte und aktive Beteiligung aller in den Geowissenschaften tätigen Menschen fordern. Hier wollen wir Wege dahin aufzeigen.

Dieses White Paper wurde gemeinsam von der Arbeitsgruppe „Verbundprojekte“ des DVGeo mit Unterstützung einer externen Autorenschaft verfasst. Die Gruppe setzt sich aus Personen verschiedener Karrierestufen aus allen Disziplinen der Geowissenschaften der festen Erde und der Planetenforschung zusammen.

Wir erheben nicht den Anspruch, vollständig zu erfassen, welche Themen in den Geowissenschaften erforscht werden. Unser Ziel ist es, Anregungen zu geben, wie die neue Ära der Geowissenschaften in interdisziplinären Verbundprojekten gestaltet werden kann. Der Aufruf zu Verbundprojekten schließt keinesfalls innovative Forschung in disziplinären Einzelprojekten aus. Diese stellen das Rückgrat für geowissenschaftliche Innovation dar und werden dies auch in Zukunft tun.

Die Kapitel wurden einem Begutachtungsverfahren unterworfen, an dem 52 unabhängige Expertinnen und Experten aus allen geowissenschaftlichen Disziplinen im In- und Ausland beteiligt waren. Diesen und den externen Autorinnen und Autoren sowie jenen, die bei der Redaktion geholfen haben, gilt unser herzlicher Dank.

Friedhelm von Blanckenburg  
Sprecher der AG Verbundprojekte im DVGeo

Alexander Nützel  
Präsident Dachverband der Geowissenschaften

# INHALT

Zusammenfassung und Empfehlungen .....	4
<b>1. Entwicklung eines belebten Planeten</b>	
1.1 Innere Dynamik der Erde und anderer Planeten .....	6
1.2 Die Ko-Entwicklung der Erde und des Lebens .....	10
1.3 Biodiversität im Erdsystem .....	14
1.4 Von der terrestrischen zur extraterrestrischen Kryosphäre .....	18
1.5 Vulkanismus und Magmensysteme .....	22
Ein Nationales Geosphären-Observatorium .....	26
<b>2. Diagnose und Simulation des Erdsystems und seiner Interaktionen</b>	
INFOBOX: Umweltseismologie .....	28
2.1 System Erdkruste .....	29
INFOBOX: Komplexe Systeme .....	33
2.2 Dynamik der Erdoberfläche .....	34
2.3 Unsichtbares Wasser im Erdsystem .....	38
2.4 Künstliche Intelligenz, Big Data und numerische Simulation in den Geowissenschaften .....	42
Ein Erdoberflächen Observatorien-Netzwerk zur Diagnose gekoppelter Prozesse .....	46
<b>3. Lösungen bereitstellen und Handlungsoptionen eröffnen</b>	
3.1 Mineralische Rohstoffe im System Erde .....	48
3.2 Natürlicher Wasserstoff – Baustein für die Energieversorgung? .....	52
INFOBOX: Naturbasierte Lösungen für Klimaschutz, Klimaanpassung und Biodiversitätsschutz .....	55
3.3 Von der Natur lernen – neue geoinspirierte Materialien und Prozesse .....	56
3.4 Urbane Geowissenschaften für eine nachhaltige Stadtentwicklung .....	60
3.5 CO <sub>2</sub> -Entnahme – ein Beitrag zu „Netto-Null“ .....	64
INFOBOX: Nutzung des Untergrundes .....	68
Weiterführende Strategieschriften und Übersichts-Publikationen .....	69
Impressum .....	73

## Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Menschheit steht vor beispiellosen Herausforderungen. Klimawandel und Biodiversitätsverlust als gleichzeitige planetare Krisen erfordern innovative Wege, unsere Lebensgrundlagen zu sichern. Verantwortungsvolle und langfristig angelegte Lösungen benötigen den Erhalt der Natursysteme unter gleichzeitiger intelligenter Bereitstellung von Rohstoffen und innovativen Materialien. Zuverlässige Methoden der CO<sub>2</sub>-Speicherung und der sicheren Nutzung des Untergrundes müssen entwickelt werden. Auch der Schutz vor zunehmenden Naturgefahren und -risiken spielt eine zunehmende Rolle. All dies geschieht vor dem Hintergrund der wachsenden Einsicht, dass die Komponenten und Prozesse des Erdsystems auf vielfältige Weise miteinander verwoben und gekoppelt sind. Der Mensch ist in diesem System heute ein geologischer Akteur. Lösungen für diese Herausforderungen sind nicht mehr denkbar, ohne dass diese Wechselwirkungen mit all ihren Auswirkungen verstanden und einbezogen werden.

Gleichzeitig rufen die Fragen nach der Entstehung der Erde, des Lebens und der Frage, ob wir allein im Universum sind, in der Öffentlichkeit wie auch in der Wissenschaft Faszination und den Drang nach Entdeckungen hervor.

Der Zukunftsreport „Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel“ der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina aus dem Jahr 2022 hat Strategien als Rahmen für die Erdsystemwissenschaft entwickelt, um durch geeignete strukturelle und inhaltliche Maßnahmen die Fähigkeit der Geowissenschaften zu stärken, den aktuellen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen zu begegnen.

Das vorliegende White Paper versieht in einem nächsten Schritt die in dem Leopoldina-Zukunftsreport dargelegten Empfehlungen mit Perspektiven für ihre Umsetzung in den Geowissenschaften der festen Erde. Wir zeigen Beispiele für Forschungsthemen in drei Themenblöcken auf. (1) Entwicklung eines belebten Planeten; (2) Diagnose und Simulation des Erdsystems und seiner Interaktionen; und (3) Bereitstellung von Lösungen und Eröffnung von Handlungsoptionen. Weil die Vorgänge im Erdsystem heute mit großem Detail vermessen werden können, werden außerdem beispielhafte innovative Beobachtungsinfrastrukturen für die Erde und andere Planeten vorgeschlagen. Zudem werden zukunftsweisende, themenübergreifende Methoden und Konzepte in Infoboxen kurz vorgestellt.

Heute ist keiner dieser Themenblöcke – wie auch viele andere geowissenschaftliche Fragen von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung – in seiner Dimension noch durch einzelne geowissenschaftliche Fachdisziplinen lösbar. Stets sind übergreifende, interdisziplinäre bis hin zu transdisziplinären Konsortien notwendig. Geowissenschaftliche Verbundprojekte haben schon in der Vergangenheit in der Erforschung des Erdsystems den größten Impact bei der Lösung von Fragen erster Ordnung liefern können (z. B. Internationale Bohrprogramme ICDP und IODP). Nur so werden sich auch die oben genannten Zukunftsfragen am besten angehen lassen. Sie bieten zugleich Argumente für die strategische Neubesetzung von Professuren.

Zu solchen strategischen Verbundvorhaben wollen wir mit diesem White Paper anregen und schlagen beispielhafte Themen und Forschungsfragen vor. Sie umfassen das Spektrum von der erkenntnisgetriebenen Grundlagenforschung zu Teilen des Systems Erde bis zur Frage nach angewandten Lösungsstrategien. Der Fokus liegt auf innovativen Themen im weiteren Bereich der „festen Erde“ und anderer Planeten und Monde – einschließlich der Wechselwirkungen der verschiedenen Sphären. Zugleich bedeutet die Auswahl keinesfalls den Ausschluss weiterer relevanter und faszinierender Themen. Das White Paper stellt exemplarisch Fragen mit herausragender Relevanz sowie Aktualität aus der laufenden wissenschaftlichen und öffentlichen Debatte.

Die hier vorgeschlagenen Ansätze zu ihrer Beantwortung ergeben dabei schließlich mehrere Felder, für die hier Empfehlungen vorgeschlagen werden.

## Erdsystemwissenschaften – eine zentrale Säule im Wissenschaftssystem

Die großen Fragen sind einerseits von der Faszination für neue Entdeckungen und den Fragen nach unserer Herkunft geprägt. Andererseits sind sie für die Daseinsvorsorge der Gesellschaft von essenzieller Bedeutung. Die Erdsystemwissenschaften mit ihrem systemorientierten Ansatz sind somit die zentrale Disziplin für die Zukunftsfragen der Menschheit. Die Geowissenschaften sind zu zwei Aufgaben besonders herausgefordert: die Bereitstellung von Georessourcen für eine nachhaltige, klimaschonende Wirtschaft und die Minderung der Folgen von Naturgefahren und -risiken der festen Erde, wie auch der Folgen des Klimawandels. Ohne das Wissen der Geowissenschaften der festen Erde ist die anstehende Transformation nicht zu leisten.

## Verbundprojekte als idealer Umsetzungsrahmen

Alle Kapitel dieses White Paper machen deutlich, dass interdisziplinäre Verbundprojekte am ehesten geeignet sind, um bei den großen Fragen entscheidenden Erkenntnisgewinn zu erzielen. Keine der zahlreichen geowissenschaftlichen Einzeldisziplinen kann die komplexen Zusammenhänge im Erdsystem allein entschlüsseln oder zu den Zukunftsherausforderungen angemessen beitragen. Mit den Fördermaßnahmen der DFG für Forschungsverbünde, den Förderprogrammen des BMBF und den Exzellenzclustern bestehen in Deutschland im internationalen Vergleich einzigartige Umsetzungsmöglichkeiten.

## Strategisches Vorgehen für die Entwicklung von Verbundprojekten

Verbundprojekte erfordern höchst unterschiedliche Planungsstadien und Zeithorizonte. Ein erfolgreiches Verbundprojekt entsteht am besten durch ein stufenweises Vorgehen (Beispiel: eine Forschergruppe könnte sich zu einem SPP und dann zu einem SFB entwickeln). Die Leitungen der Hochschulen sollten bei dieser Entwicklung einbezogen werden und sie strategisch begleiten. Professuren, Organisationseinheiten und Laborkapazitäten sowie Nachwuchsgruppen müssen parallel und systematisch aufgebaut werden. Die Integration von universitärer und außeruniversitärer Forschung ist ein wesentliches Element. Auch wird es Handlungsoptionen geben, deren Umsetzung nur durch die Verbindung mit den Sozial-, ökonomischen-, Bio-, oder Ingenieurwissenschaften gelingen wird.

## Observatorien und verteilte Beobachtungsinfrastruktur

Die Diagnose des Erdsystems benötigt integrierte Observatorien. Sie beobachten die interne Dynamik des Planeten, seine Deformation, die geomorphologischen, hydrologischen, biologischen und sedimentologischen Prozesse an der Erdoberfläche mit kontinuierlichem Monitoring von der Satellitenbeobachtung bis zu Multiparameterobservatorien an der Erdoberfläche und in Bohrungen. Eine wesentliche Rolle wird dabei in Zukunft einem disziplinübergreifenden Systemansatz in der Observierung von Erdsystemteilen zukommen. Wesentliche Impulse zu den System-Zusammenhängen sind auch von der Beobachtung anderer, erdähnlicher Planeten und Monde zu erwarten.

## Geodaten

Big Data, KI-Methoden und High Performance Computing Infrastrukturen sind für das Gelingen moderner Forschungsverbünde unabdingbar. Um die mit öffentlichen Mitteln gewonnen Daten nach den FAIR-Prinzipien digital verfügbar zu haben und mit modernen KI-Methoden zu analysieren, müssen zentrale Repositorien über die NFDI4-Earth-Initiative hinaus entwickelt werden.

## Qualifizierung des Nachwuchses für den akademischen und wirtschaftlichen Sektor

Viele der Vorhaben in diesem Bericht (Geothermie, Wasserstoff, Geo-Ressourcen, CO<sub>2</sub> einfangen, urbane Strukturen, Naturgefahren, Observatorien und Planetenmissionen) werden gemeinsam mit dem privaten Sektor betrieben werden müssen. Hier ergibt sich eine große Chance, dem prognostizierten Mangel an Fachkräften mit Geo-Kompetenz entgegenzuwirken. Der von großen Verbundvorhaben besonders profitierende Nachwuchs wird eine stärker interdisziplinär denkende Generation sein, die geowissenschaftliche Lösungen umsetzen und auch mit Personen und Institutionen im nicht-akademischen Bereich kommunizieren kann.

# 1. Entwicklung eines belebten Planeten

## 1.1 Innere Dynamik der Erde und anderer Planeten

Unser Wissen über die innere Dynamik der Erde und der vielfältigen Exoplaneten hat sich in den letzten zehn Jahren dramatisch erweitert. Zentrale Fragen können nun beantwortet werden, so zum Beispiel nach dem Ursprung der Plattentektonik, nach vermuteten Relikten eines tiefen „Magmaozeans“ aus der Frühzeit der Erde und ob sich erddynamische Konzepte auch auf Planeten des inneren Sonnensystems oder auf erdähnliche Exoplaneten übertragen lassen. Mit Hilfe von Hochdruckexperimenten, geophysikalischen, geochemischen und Simulationsmethoden sowie den noch ausstehenden Planetenmissionen sind große Entdeckungen zu erwarten.

### a) Von den Bausteinen zum bewohnbaren Planeten

Die tiefe Erde, also der Erdmantel und der darunter liegende Erdkern, ist für die menschliche Wahrnehmung ein scheinbar statischer Bereich. Sie scheint nicht an den vielfältigen Wechselwirkungen an der Oberfläche des Erdsystems beteiligt zu sein. Mantel und Kern sind die ältesten Teile der Erde, die bereits kurz nach ihrer Entstehung vor 4,56 Milliarden Jahren angelegt wurden. Betrachten wir die tiefe Erde über diesen Zeitraum, ergibt sich das Bild eines hochdynamischen, ständig in Veränderung befindlichen Körpers. Seine Entwicklung ist eng mit der des Lebens auf der Erde verwoben. Zum Verständnis unserer Nachbarplaneten im Sonnensystem und zur Suche nach Exoplaneten, auf denen es Leben geben könnte, ist die Struktur und Dynamik des Planeteninneren eines der wichtigsten Kriterien. Die für uns unzugängliche tiefe Erde und ihre erdgeschichtliche Entwicklung kann heute in zuvor unerreichtem Detail sichtbar gemacht werden.

**Von der starren Lithosphäre zur Plattentektonik.** Auf den ersten Blick zeigen Erdmantel und Kern einen tiefenabhängigen Lagenbau in ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung. Auf den zweiten Blick aber ist der Erdmantel selbst chemisch gesehen heterogen. Angetrieben durch die Wärmekraftmaschine Erde haben Konvektion und Plattentektonik zu dieser komplexen Struktur geführt. Es wird derzeit kontrovers diskutiert, ob es durch die gesamte Erdgeschichte hindurch Plattentektonik in ihrer heutigen Form gab. Die meisten Untersuchungen favorisieren eine frühe Erde mit einer starren und festen oberen „Lithosphäre“ aus Kruste und oberem Mantel, die sich weder intern verformte noch wieder in den Erdmantel subduziert wurde (das sogenannte „Stagnant Lid“ Modell, das auch den heutigen Mars, Merkur sowie den Mond charakterisiert). Gemäß geochemischer Untersuchungen und Modellierungen nahm vor ca. 3 Milliarden Jahren das Volumen kontinentaler Kruste und der Vulkanismus durch Subduktion stark zu. Andere innere Planeten des Sonnensystems haben nach derzeitigem Stand keine Plattentektonik. Warum das so ist und welche Rolle Wasser und der Wärmetransport in Mantel und Kern für die Initiierung der Plattentektonik spielten sind ungelöste Kernfragen der Geodynamik.

Von besonderem Wert zum Verständnis des tiefen Erdmantels sind Magmen, die als Resultat anomal heißer Mantelströmungen („Plumes“) entstehen. Sie liefern einen geochemischen Fingerabdruck aus dem Erdinneren – vermutlich nahe der Kern-Mantel-Grenze. Hier finden sich möglicherweise noch Relikte aus der allerfrühesten Erdgeschichte, als die Erde wegen der höheren Temperaturen von einem flüssigen „Magmaozean“, bedeckt gewesen sein muss. Dieser Magmaozean wurde vermutlich durch einen Impakt erzeugt, bei dem auch der Mond entstand. Lange ging man davon aus, dass diese Relikte aus der Erdfrühzeit durch Mantelkonvektion homogenisiert wurden. Die Messung von Zerfallsprodukten kurzlebiger Radionuklide und Edelgaszusammensetzungen ergaben nun ein anderes Bild. Demnach sind im Erdmantel und -Kruste Gesteine noch aus den ersten 100 Millionen Jahren der Erdgeschichte erhalten geblieben. Das Einsetzen der Plattentektonik stellt eine Schlüsselfrage dar, ebenso wie die Herkunft von flüchtigen Substanzen („Volatile“) – wie z. B. Wasser – auf der Erde, deren Einbau in den Erdmantel sowie die genaue Entstehung der Erdatmosphäre. Faszinierend sind die Rückkopplungseffekte zwischen der Atmosphäre und dem Erdmantel. So nahm vor ca. 2,45 Milliarden Jahren durch die zunehmende mikrobielle Photosynthese der Gehalt von freiem Sauerstoff in der Erdatmosphäre zu. Diese Zunahme ist durch markante Änderungen in den Gehalten einiger redox-sensitiver Elemente sowie dem Oxidationsgrad des Erdmantels sichtbar.

**Das Erdmagnetfeld und der tiefe Erdmantel.** Die chemisch-mineralogische Komplexität und der Wärmetransport im unteren Mantel beeinflusst auch die Fließdynamik des äußeren Kerns und das Erdmagnetfeld. Veränderungen des magnetischen Feldes haben Auswirkungen auf heutige und vergangene biologische Systeme, wie magnetotaktische Bakterien oder auf Zugvögel. Die Stärke des Erdmagnetfeldes bestimmt zudem den Schutz der Atmosphäre und der Lebewesen vor Sonnenwind und anderer ionisierender Strahlung. Die Dynamik dieses „Geodynamos“ im Erdkern und der Einfluss auf Veränderungen in der Stärke und Ausrichtung des Erdmagnetfeldes sind offene Fragen. Auf der globalen Skala ist die Komplexität des tieferen Mantels durch die Verteilung von Regionen mit reduzierter seismischer Geschwindigkeit („large low shear-wave velocity provinces“ LLSVP) unter dem südlichen Afrika und unter dem südwestlichen Pazifik erahnbar. Der Ursprung kleinräumiger Regionen, die besonders niedrige seismische Geschwindigkeiten aufweisen und eventuell durch partielle Schmelzen nahe der Kern-Mantel-Grenze erzeugt werden („ultra-low velocity zone“ ULVZ) ist rätselhaft. Sie könnten Relikte eines tiefen Magmaozeans darstellen oder durch Kern-Mantel Reaktion entstanden sein. Nun stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss dieser Strukturen auf das Erdmagnetfeld an der Oberfläche ist.

Die Dynamik des Erdmantels ist von den Materialeigenschaften seiner Minerale und eventuell vorhandenen Schmelzen abhängig. Im Mantel sind dies Silikate und Oxide, im Kern Eisenlegierungen. Untersuchungen an Materialien der tiefen Erde zeigen, dass ihre mechanischen Eigenschaften (also Druck und Temperatur sowie Baufehler in der atomaren Struktur) auch von der Dynamik von Deformationsprozessen abhängen, sie also ratenabhängig sein können. Die Art der Minerale oder Schmelzen und ihre Korngrenzen können mechanische Eigenschaften von Gesteinen, chemische Transportprozesse und den Wärmetransport im Erdmantel immens beeinflussen. So können mikroskopische Materialeigenschaften globale Prozesse beeinflussen. Wie genau aber dies unter den Extrembedingungen der tiefen Erde geschieht, ist für viele Materialien zu erkunden.

## b) Erdähnliche Planeten

Diese Prinzipien lassen sich auch auf die Planeten des inneren Sonnensystems und auf erdähnliche Exoplaneten anwenden. Eine wichtige Erkenntnis aus den über 5.500 bisher entdeckten Exoplaneten ist ihre erstaunliche Vielfalt in ihrer Zusammensetzung als auch der Eigenschaften ihrer Umlaufbahnen. Der aktuelle Datensatz enthält hauptsächlich große, volatilreiche Planeten mit kurzen Umlaufzeiten, aber auch terrestrische Körper bis zu einigen Erdmassen. Viele dieser Exoplaneten befinden sich in unmittelbarer Nähe ihrer Sterne, möglicherweise mit einem Magmaocean, und bieten Einblicke in die frühen Phasen der Erdentwicklung. Aufgrund der enormen Energie, die den Planetenbildungsprozess begleiten, haben wahrscheinlich auch Merkur, Venus, Mars und der Mond in ihrer frühesten Geschichte eine Magmaoceanphase durchlaufen. Auf diesen Körpern sind aufgrund fehlender Plattentektonik oder einer schnelleren Abkühlung bis heute chemische und physikalische Zeugnisse von jenen Magmaoceanen erhalten geblieben. Ähnlich wie im Sonnensystem befinden sich nur wenige entdeckte terrestrische Exoplaneten in der habitablen Zone ihres Sterns, in der flüssiges Wasser vorhanden sein könnte. Mit zukünftigen Missionen wird die Entdeckung kleiner, erdähnlicher Exoplaneten voraussichtlich zunehmen. Zusammen mit Fortschritten in der spektroskopischen Beobachtung der Atmosphäre von Exoplaneten könnte die Suche nach habitablen Planeten in verschiedenen Stadien ihrer Entwicklung bald Realität werden. Durch eine Vielzahl geplanter Probenrückführmissionen wird in den nächsten Jahrzehnten eine deutlich größere Anzahl von Proben unserer benachbarten Planeten und dem Asteroidengürtel für geochemische und mineralogische Untersuchungen zur Verfügung stehen. Deshalb ist es umso wichtiger, die Verbindungen zwischen den Geowissenschaften der Erde, den Planetenwissenschaften sowie der Exoplanetenforschung zu stärken.

## c) Methoden

Trotz der dramatischen Entwicklungen zum Kenntnisstand der inneren Dynamik der Erde als auch der Exoplaneten sind wir noch weit davon entfernt, das Zusammenwirken von Konvektion, Wärmetransport, chemischer Reaktion und Materialeigenschaften sowie ihre Beiträge zur Selbststeuerung des Erdsystems quantitativ analysieren zu können. Um diese Fähigkeit zu entwickeln, benötigen wir eine integrierte Anwendung der folgenden vier Aktivitäten auf den relevanten Größen- und Zeitskalen mit einer weit engeren Verbindung zwischen den beteiligten Disziplinen als dies bisher der Fall war:

**Globale Beobachtung.** Die Tiefenstruktur der Erde kann jetzt mit einer Vielzahl von Strukturbeobachtungen abgebildet werden. Insbesondere Schwerefeld-Messungen, Seismologie und Magnetotellurik ergeben zusammen umfassende und komplementäre Einblicke in das Erdinnere. Die Interpretation der riesigen entstehenden Datenmengen erfordern moderne Inversionsverfahren und andere neue Analyse-Algorithmen. Dabei werden 3D-Tiefenmodelle mit bisher unerreichter Auflösung zur Heterogenität des Erdmantels entstehen. Mit Kenntnis der Materialeigenschaften können sie zu einem kohärenten Modell der tiefen Erde entwickelt werden.

**Neue geochemische Tracer.** Mittels einer Reihe neuer und verbesserter geochemischer und isotopengeochemischer Tracer kann ein vollständigeres, und zum Teil auch völlig neues Bild der Erde seit der frühesten Entstehungsgeschichte rekonstruiert werden. Sie geben Auskunft über die Herkunft der Bausteine der Erde und der flüchtigen Elemente, über globale Recyclingprozesse im Erdmantel und über den Einfluss von freiem atmosphärischem Sauerstoff während der letzten 2,45 Milliarden Jahre auf diese Recyclingprozesse. Eine wichtige Frage bezieht sich hierbei auf die Beimengung extraterrestrischen Materials (das „Late Veneer“) und seines Alters.

**Hochdrucklaborexperimente.** Wie die physikalischen Eigenschaften der Minerale im Erdmantel und ihre Baufehler sich unter hohem Druck und Temperatur ändern, wie Minerale miteinander reagieren bzw. Elemente oder Isotope austauschen und wie diese schließlich das Deformationsverhalten des Mantels beeinflussen, lässt sich heute durch neue experimentelle Methoden der Hochdruckmaterialforschung ermitteln. Diese simulieren extreme Bedingungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Dazu stehen heute z. B. Synchrotron- und Neutronenstrahlung an neuen Strahlungsquellen und Freie-Elektronenlaser zur Verfügung. An diesen Einrichtungen können Deformationsverhalten oder die Kinetik von Mineralumwandlungen und -reaktionen durch in-situ-Messungen mit hoher Zeitauflösung im Femto/Pikosekundenbereichen bestimmt werden.

**Computer Simulation, Künstliche Intelligenz (KI), Machine Learning und Supercomputer.** Mit diesen neuen Möglichkeiten können heute detaillierte geodynamische Mantel- und Kernmodelle simuliert werden. Das Ziel sind realitätsgetreue 4D-Simulationen mit adäquater räumlicher Auflösung und die Abbildung von Veränderungen auf geologischen Zeitskalen. Mit Erdoberflächenprozess- und Klimamodellen können Rückkopplungen zwischen den Kompartimenten des gesamten Erdsystems erfasst werden, vom Hadaikum bis heute. Sie können Hypothesen für die Superkontinent-Zyklen und geologische Extremereignisse (z. B. Snowball Earth) testen. Aufatomarer Skala können mit quantitativen Materialsimulationen Materialeigenschaften unter Bedingungen bestimmt werden, die durch Laborexperimente nicht zugänglich sind. Algorithmen basierend auf maschinellem Lernen und tiefen neuronalen Netzen erlauben schon heute quantitative Materialsimulationen mit ab-initio-Präzision auch auf Systemgrößen bisheriger klassischer Potentiale (bis zu 10<sup>4</sup>-mal größere Zellen und längere Zeiten). KI-basierte Optimierung wird ein wichtiges Werkzeug für die Entwicklung von realistischen Modellen von Materialien der Erde und ihrer Eigenschaften bei extremen Bedingungen sein.

**Planetenwissenschaften.** Mehrere Nationen planen eine größere Zahl von Missionen bemannter und unbemannter Raumsonden zu anderen planetaren Körpern. Hier werden durch Probenrückführmissionen (z. B. Perseverance, Artemis, Osiris Rex, Hayabusa) mehr extraterrestrischen Proben zur Verfügung stehen. Sie werden fundamental neue Einblicke in geodynamische Prozesse auf benachbarten Himmelskörpern im Sonnensystem ermöglichen. Auch das Verständnis der Eigenschaften und Zusammensetzung diverser planetarer Körper in unserem Sonnensystem wird durch spektroskopische Verfahren in Folge dieser Missionen rapide zunehmen. Mit diesen und neuen Modellierungsansätzen können in anderen Sternensystemen mehr erdähnliche Exoplaneten entdeckt und charakterisiert werden. So können geodynamische Prozesse auf der Erde in einen planetaren Kontext eingeordnet werden.

#### d) Schnittstellen zu anderen Bereichen

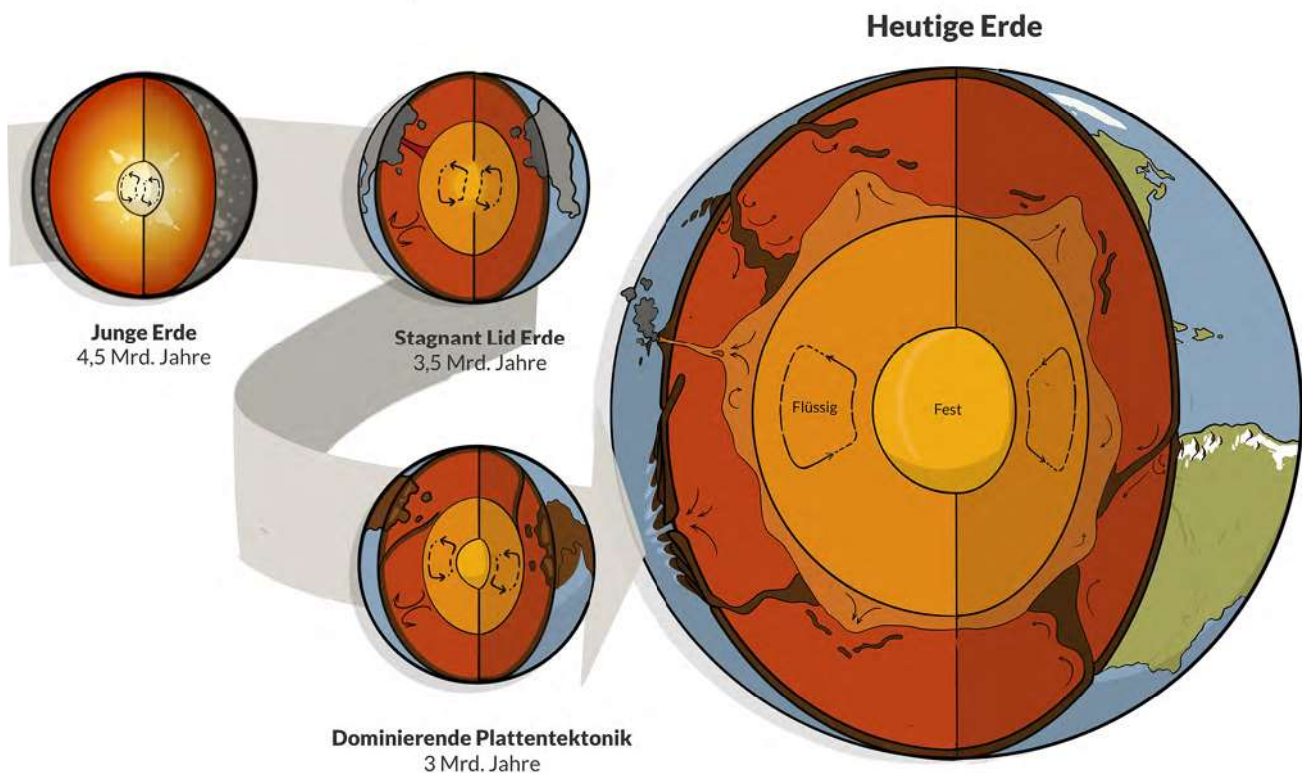
Das vertiefte Verständnis der Struktur und Dynamik des Erdinneren ist Grundlage für Fragen zum Einfluss der festen Erde auf die Entwicklung der Atmosphäre und des Klimas (1.4 Kryosphären) und damit auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde (1.2 Ko-Entwicklung Erde-Leben). Die geodynamischen Prozesse verursachen Erdbeben (2.1 System Erdkruste)



sowie die Bildung von Gebirgen, die durch die Prozesse der Erdoberfläche mit dem Erdklima rückgekoppelt sind (2.2 Dynamik der Erdoberfläche). Die Bildung der Erdkruste ist ein wichtiger Schritt in der Anreicherung kritischer Elemente, die auch zur Bildung nutzbarer Georessourcen führt (3.1 Mineralische Rohstoffe). Die Erforschung der inneren Dynamik der Erde wird auf methodische Ansätze zur Analyse großer Datenmengen zurückgreifen (2.4 Data Sciences).

## e) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

„Earthscope“ ist ein weltweit operierendes seismisches und geodätisches Netzwerk der USA; „COMPRES“ – Consortium for Materials Properties Research in Earth Sciences, ist ein US-amerikanisches Netzwerk für die Hochdruck Materialphysik. „Computational Infrastructure for Geodynamics“ (CIG) ist ein weltweites Konsortium für die Entwicklung und Verbreitung von Software für die Geophysik und in verwandten Bereichen des Erdsystems. Für die Detektion und Charakterisierung von habitablen Exoplaneten betreiben eine Reihe europäischer Nationen ESO (European Southern Observatory) und derzeit den Bau von ELT (Extremely Large Telescope). Die European Space Agency ESA plant den Start des „PLATO“ Weltraumteleskopes zur Beobachtung potenziell habitabler Planeten. Für Probenrückführmissionen (z. B. Perseverance, Artemis, Osiris Rex, Hayabusa) ist es wichtig, Laborkonsortien für die Untersuchung von Proben anderer Himmelskörper im geodynamischen Kontext zusammenzustellen.



Die Entwicklung des Inneren der dynamischen Erde von ihrer Entstehung bis heute.

## 1.2 Die Ko-Entwicklung der Erde und des Lebens

Die Erde hat sich über einen Zeitraum von etwa 4,5 Milliarden Jahren von einem unwirtlichen Gesteinskörper mit glutflüssiger Oberfläche und toxischer Atmosphäre zu einem von Leben wimmelnden Planeten entwickelt. Die Evolution des Lebens ist eng mit der Entwicklung der festen Erde und ihrer Hydro- und Atmosphäre verbunden. Neue Fragen zu den systemischen Verbindungen zwischen Litho-, Atmo-, Hydro- und Biosphäre können jetzt mit sauberen Bohrverfahren, modernen Biomarkern, Metallisotopenuntersuchungen, neuentwickelten Datierungsmethoden und Mars Rückholmissionen zu transformativen Erkenntnissen führen.

### a) Die allmähliche Entstehung der heutigen Erde

**Wann und wie entwickelten sich Atmosphäre, Ozeane, Kontinente und die Plattentektonik?** Zum Ablauf und der zeitlichen Entwicklung der Erde und ihrer Teilbereiche besteht noch kein gesamthafes Bild. So wird der Beginn der Plattentektonik auf der heutigen Erde mit ihrer charakteristischen kalten, tiefen Subduktion immer noch kontrovers diskutiert (1.1 Dynamik des Erdinnern). Über die Entstehung, chemische Entwicklung und interne Stratifizierung der kontinentalen Lithosphäre besteht gleichermaßen Uneinigkeit. Diese spielt aber eine zentrale Rolle bei der Bindung, Speicherung und Freisetzung von CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im Zuge ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Immerhin hat sich inzwischen ein Bild der zeitlichen Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre ergeben, in der CO<sub>2</sub> abgenommen und der O<sub>2</sub>-Gehalt zugenommen hat. Beides ist wiederum mit der Entwicklung der Kontinente und der Biosphäre verbunden. Dieses Verständnis des Zusammenspiels zwischen endogener Dynamik und den Bedingungen auf der Erdoberfläche bildet einen Rahmen für die Erforschung evolutionärer Prozesse.

**Wo und wie ist erstmals Leben entstanden?** Die Mechanismen der Entstehung komplexerer, organischer Moleküle, die die notwendigen Grundsteine für das erste Leben gelegt haben, sind immer noch ungewiss. Die ersten selbstreproduzierenden Moleküle könnten einerseits auf der Erde entstanden oder andererseits von Kometen und Meteoriten auf die Erde transportiert worden sein. Es ist unumstritten, dass solche organischen Moleküle in diesen extraterrestrischen Objekten enthalten sind. Wie aus abiotischen chemischen Reaktionen selbstvervielfältigende Moleküle und schließlich Zellsysteme wurden, kann als eine gemeinsame Kernfrage der Biologie und der Geowissenschaften betrachtet werden. Bereits die ältesten sedimentären Gesteine der Erde (ca. 3,8 Mrd. Jahre alt) enthalten organische Überreste, die mit fortschreitenden geochemischen Methoden und der Analyse neuer Proben wichtige Erkenntnisse zum frühesten Leben auf der Erde liefern könnten. Sedimentgesteine aus mehreren Milliarden Jahren Erdgeschichte bilden das primäre Archiv zur Untersuchung der Erdoberfläche. Sie beinhalten klastische Sedimente (Abtragungsschutt von Kontinenten und Vulkaninseln), biogene Sedimente (Überreste von Organismen) und chemische Sedimente (z. B. gebänderte Eisenerze), die zur Entschlüsselung der Entwicklung und Zusammensetzung der Ozeane herangezogen werden. Sollte die Entwicklung von Leben nicht auf die Erde beschränkt gewesen sein, könnten Proben vom Mars oder den Eismonden von Jupiter und Saturn entscheidende geochemische oder biochemische Hinweise auf die Entstehung des Lebens liefern.

**Was stabilisiert die Bedingungen auf der Erdoberfläche für das Leben?** Die Strahlungsintensität der Sonne hat sich im Laufe der Erdgeschichte stark geändert. Die sich ändernde Zusammensetzung der Atmosphäre bewirkte jedoch über den Treibhauseffekt und die Rückkopplungen des Erdsystems, dass auf der Erde stets Temperaturbedingungen vorherrschten, die das Vorkommen von flüssigem Wasser auf der Erdoberfläche ermöglichten. Dies war die Voraussetzung zur Evolution organischen Lebens auf der Grundlage von Proteinen. Über große Teile der Erdgeschichte war und ist die Silikat-Verwitterung vermutlich der temperaturregulierende Schlüsselprozess. Die Etablierung einer relativ starren Lithosphäre (einschließlich ihrer kontinentalen Kruste) in der frühen Erdgeschichte war hierzu eine wichtige Voraussetzung. Erst hierdurch kam es zur Bildung von terrestrischen Landoberflächen und Gebirgen, welche subaerische Verwitterung überhaupt erst ermöglichen konnten. Diese wiederum resultiert in einem Eintrag von Nährstoffen in die Ozeane und in Folge erhöhter biologischer Produktion zur Bindung von CO<sub>2</sub> in marinen Sedimenten. Damit nahmen Krustenentwicklung und Plattentektonik entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Lebens und den klimaregulierenden geologischen Kohlenstoffkreislauf.

Im Laufe der Erdgeschichte kam es immer wieder zu Instabilitäten in den Wechselwirkungen zwischen Gesteinsoberfläche, Ozeanen und Atmosphäre und zur nachfolgenden Wiederherstellung des klimatischen Gleichgewichts. Diese sind beispielsweise in globalen Vereisungen im Neoproterozoikum vor etwa 800 bis 600 Millionen Jahren oder in extremen Treibhaus-Phasen in der Kreidezeit vor etwa 100 Millionen Jahren dokumentiert. Mittels fortschrittlicher (bio)geochemischer und petrologischer Methoden kann ein vertieftes und umfassendes Verständnis zur Entwicklung der frühen Erde und seiner ersten Ökosysteme erlangt werden. Im Kern steht hierbei die Frage, wie und wann sich Umweltbedingungen auf der Erde geändert haben und durch welche Rückkopplungen über einen Zeitraum von mehreren Milliarden Jahren lebensfreundliche Bedingungen aufrechterhalten und so die Entwicklung höherer Lebensformen ermöglichen konnten. Der jetzige Zustand von Venus und Mars zeigt, dass dies nicht selbstverständlich ist. Heute trägt das Leben auf der Erde durch den Kohlenstoffzyklus selbst dazu bei, die Bedingungen auf der Oberfläche des Planeten in einem lebensfreundlichen Korridor zu stabilisieren. Hier gilt es die planetare Selbstregulierung durch neue geobiowissenschaftliche Forschungsansätze zu entschlüsseln.

**Wann kam es zu Diversifikationen der Lebensformen?** Evolutionäre Schritte in der Biologie sollten in einen größeren Kontext mit der Entwicklung des Erdsystems gestellt werden. Die Suche nach kausalen Zusammenhängen zwischen der Entwicklung des Lebens und der Erde selbst bedarf einer verbesserten zeitlichen Einordnung der Ereignisse sowie einer Verfeinerung unseres Verständnisses der Aussagekraft von Biosignaturen. Die Komplexität des Lebens nahm in manchen Abschnitten der Erdgeschichte stufenweise zu. Sie manifestiert sich z. B. in der Evolution von Eukaryoten, dem Entstehen von Tieren oder ihrer explosionsartigen Diversifizierung im Kambrium. Dies muss im holistischen Kontext der sich global ändernden Umweltbedingungen betrachtet werden. Verwandtschaftsverhältnisse unterschiedlicher Lebensformen werden auf der Grundlage genetischer und morphologischer Merkmale aufgedeckt. Insbesondere die Lipidbiosynthese ist von großem Interesse, da Lipide ein geologisches Erhaltungspotential aufweisen und in altem Gestein als „Biomarker“ für die Stammesgeschichte des Lebens („Tree of life“) genutzt werden können.

Charakteristische und systematische Fingerabdrücke unterschiedlicher Spurenelement-Muster in moderner oder fossiler Biomasse erlauben wertvolle Rückschlüsse auf die ursprünglichen Umweltbedingungen. Die Rekonstruktion der Zeitskalen, in denen sich Lebensformen weiterentwickeln und diversifizieren, erfolgt mit Hilfe sogenannter „molekularer Uhren“. Diese sind Gegenstand aktiver Forschung, unterliegen allerdings noch sehr hohen Unsicherheiten. So weisen sie in der Praxis bisher noch große Unterschiede zum Fossilbestand in geologischen Archiven auf. Letztere sind deshalb bisher noch unsere verlässlichste Quelle zur Entschlüsselung evolutionärer Prozesse.

Fortschritte bei Altersdatierungen (auch an organischem Material) und in der Untersuchung der ökologischen Stellung unterschiedlicher Organismen mittels fossiler Biomarker sowie neuer Indikatoren für biogene Prozesse ermöglichen die Identifikation kausaler Zusammenhänge in der Erdgeschichte. Solche Verknüpfungen verdeutlichen das „Wieso“ hinter der Existenz unserer Biosphäre. Entscheidend hierfür ist eine genaue Entschlüsselung der zeitlichen Entwicklung und geographischen Verteilung der Kontinente über die Erdgeschichte, ihres Aufstiegs über den Meeresspiegel und ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung. Damit eng verknüpft ist auch die zeitliche Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und des Klimas.

## b) Methoden

Zentral für die Verbesserung unseres systemischen Verständnisses der Prozesse, die unseren Planeten prägen, ist die Notwendigkeit einer stärkeren Vernetzung der Disziplinen und unterschiedlichen Forschungsansätze. Durch gemeinsame Bearbeitung gut charakterisierter natürlicher Proben, über koordinierte Projekte und mittels integrierter, institutioneller Zusammenschlüsse wird ein wissenschaftlicher Mehrwert erzeugt. Vorbild sind hierbei die marinen und polaren Forschungsprogramme sowie die Tiefbohrprogramme (IODP, ICDP), die jeweils einen entsprechenden Methoden-katalog, Probenlogistik, Probenlager und zugehörige Datenbanken aufgebaut und der Forschung allgemein zugänglich gemacht haben.

**Geologische Beprobung.** Gekoppelte organisch- und anorganisch-geochemische und petrologische Untersuchungen an Sedimentproben aus dem Präkambrium, als auch an Gesteinen der kontinentalen Kruste und des lithosphärischen Mantels werden somit zu einem umfassenderen Verständnis der Erdsystemprozesse führen. Die systematische und statistische Auswertung der gewonnenen großen Datenmengen können dann unter Berücksichtigung von Beprobungs- und Überlieferungseffekten (sampling bias, preservation bias) als Grundlage für geodynamische, klimatische und biologische Modellierungen dienen. Diese ermöglichen somit die Simulation der Entwicklung des Erdsystems und damit eine möglichst quantitative Auswertung der maßgeblichen Rückkopplungseffekte.

**Biologisch-chemische Studien.** Bohrkampagnen mit einem verstärkt biologischen Fokus, bei denen Verunreinigungen mit organischem Material von der heutigen Erdoberfläche vermieden werden kann, sind für kombinierte organisch-anorganische Studien erforderlich. Die Diagnose organischer und anorganischer Strukturen für die Suche nach frühem Leben muss mit neuen und verbesserten geochronologischen Werkzeugen verknüpft werden. Die erheblichen methodischen Fortschritte der letzten Jahre eröffnen die Möglichkeit der Datierung einer Vielzahl geologischer Proben, für die bisher keine genauen Alter bestimmt werden konnten. Extreme ökologische Milieus sowie Bedingungen analog zu denen der frühen Erde bleiben weiterhin im Fokus der Geomikrobiologie. Hinzu kommt die Weiterentwicklung und Kombination anorganisch- und organisch-geochemischer Werkzeuge, inklusive molekularer Biomarker sowie die Quantifizierung biogen-beeinflusster Fraktionierungen von Spurenelementen und stabiler Metallisotope. Diese sollten von neuen Ansätzen zur Bestimmung komponentenspezifischer Kohlenstoffisotopenmuster und sogenannter „Clumped Isotopes“ (Isotopenvariationen von Molekülen) begleitet werden. Intensivierte Studien zu biotischen und abiotischen Auswirkungen auf den Ursprung von organischen Strukturen werden es uns in Zukunft erlauben, Lebensspuren besser von Pseudofossilien zu unterscheiden. Die Nutzung neuer Methoden aus der Polymerchemie kann möglicherweise den Zugang zu verschlüsselter biologischer Information im Kohlenstoff aus den ältesten Sedimentgesteinen ermöglichen. Letztendlich kann der Zugang zu extraterrestrischen Materialien (z. B. einer Mars-Rückholmission) einen Einblick in die präbiotische Chemie und den Ursprüngen des Lebens liefern.

**Notwendige Infrastruktur.** Durch Vernetzung von Bio- und Geowissenschaften und ihrer Teildisziplinen kann die Erforschung der Entwicklung des frühen Erdsystems und der planetaren Habitabilität in den Fokus genommen werden. In Zukunft muss auch die Infrastruktur für die Archivierung einer großen Menge an wertvollem Probenmaterial geschaffen werden, ähnlich der IODP-Kernlager, in denen die Proben gelagert und kuratiert werden.

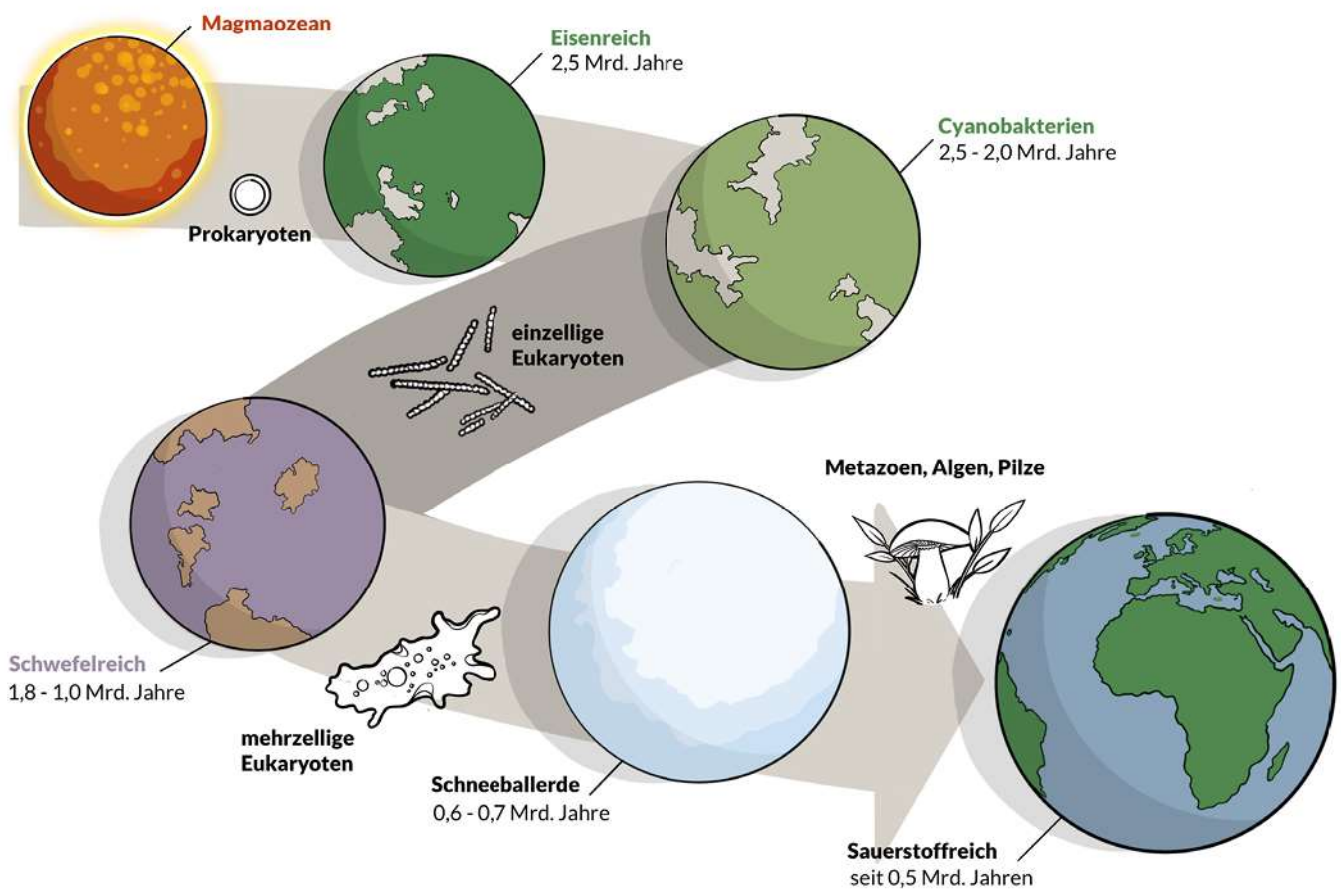
**Globale Modelle.** Sämtliche Daten und Erkenntnisse, die aus den unterschiedlichen empirischen Studien gewonnen werden, müssen letztendlich in globale Modelle einfließen, damit die natürlichen Regelkreise verstanden und quantifiziert werden können. Hierbei muss es in Zukunft gelingen, numerische Modelle zu entwickeln, die einzelne Sphären (Litho-, Atmo-, Hydro- und Biosphäre) des Erdsystems durch die geologische Zeit mittels Simulation zusammenführen.

### c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Der Vergleich der Erde mit anderen terrestrischen Planeten und planetaren Körpern ermöglicht eine Abgrenzung der maßgeblichen Parameter, die eine Bewohnbarkeit zulassen – oder eben nicht mehr zulassen. Arbeiten zum verbesserten Verständnis genetischer Beziehungen sowie zur Biosynthese leisten einen direkten Beitrag zu Forschungsthemen der Biologie und Pharmazie. Die methodische Weiterentwicklung im Bereich der Spurenelement- und Isotopenanalytik findet bereits Anwendung in der Boden- und Pflanzenkunde sowie in der Biomedizin, der Biochemie, der Festkörperphysik und der Archäologie. Die komponentenspezifische Isotopenanalytik, welche aktuell nur im geowissenschaftlichen Umfeld erforscht wird, könnte in Zukunft in Nachbardisziplinen eingesetzt werden. Beispiele sind Beiträge zur Doping-Kontrolle, Authentifizierung von Lebens- und Arzneimitteln sowie zur Früherkennung metabolischer Fehlfunktionen beim Menschen. Die Entwicklung des Lebens auf der Erde ist zudem eng gekoppelt an Schlüsselprozesse auf der Erdoberfläche (2.2 Dynamik der Erdoberfläche) sowie an Prozesse im tiefen Inneren der Erde (1.1 Dynamik des Erdinnern). Hierdurch wird auch die Entwicklung von Biodiversität in der Erdgeschichte entscheidend geprägt (1.3 Biodiversität im Erdsystem).

**d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Ein Forschungskonsortium in Nordcee (Dänemark) untersucht die Koevolution des Lebens und die Chemie der Erdatmosphäre und der Ozeane. Das Projekt „Co-evolution of Life and Planet“ an der University of Austin, Texas konzentriert sich auf die Bewohnbarkeit der frühen Erde und der terrestrischen Planeten. Beispiele für ICDP Konsortien zum Anstieg des Sauerstoffgehaltes in der frühen Erde sind – GOE-DEEP und GRIND für den Ediacarium-Kambrium Übergang.



Ko-Evolution von Atmosphäre, Ozeanen, Kontinenten und Leben im Laufe der Erdgeschichte.

## 1.3 Biodiversität im Erdsystem

Biodiversität unterstützt im Erdsystem die Stabilität und Funktion von Ökosystemen und beeinflusst die Klimaregulierung und Nährstoffkreisläufe. Sie wird sowohl durch geologische und klimatische Faktoren geformt und wirkt sich auch umgekehrt auf Geosphäre, Atmosphäre und Hydrosphäre aus. Angesichts der Biodiversitäts- und Klimakrise ist es entscheidend, die Interaktionen zwischen Biodiversität und geologischen Prozessen sowie deren Einfluss auf evolutionäre und ökologische Dynamiken zu verstehen.

### a) Biodiversität entsteht durch komplexe Rückkopplungen mit geologischen Faktoren

Biodiversität ist mehr als Artenvielfalt. Sie umfasst die biologische Vielfalt aller lebenden Organismen und ihrer Lebensräume an Land, im Süßwasser, in den Ozeanen sowie in der Luft mit all ihren genetischen, molekularen und funktionellen Facetten. Die Biosphäre ist ein komplexes Netz von Wechselwirkungen, das die Stabilität des Erdsystems sicherstellt und gleichzeitig das Überleben und Wohlergehen des Menschen ermöglicht. Sämtliche Prozesse auf der obersten Schicht der Erde werden durch das Leben beeinflusst. Ein Rückgang der Biodiversität führt zu einem Rückgang von Ökosystemleistungen, wie Nahrungssicherheit, der natürlichen Klimaregulierung und damit dem menschlichen Wohlbefinden.

In Anbetracht der derzeitigen gekoppelten Klima- und Biodiversitätskrise ist ein Beitrag der Geowissenschaften zur Dynamik des natürlichen Biodiversitätswandels sowie den Wechselwirkungen von Geodynamik, Klima und Biodiversität dringlich. Wie weit können wir gehen, um Beobachtungen zu Klimakrisen der erdgeschichtlichen Vergangenheit auf die heutige Situation zu übertragen? Wie hängt die Biodiversität von anderen Kompartimenten im Erdsystem ab und unterscheiden sich diese Abhängigkeiten auf verschiedenen Zeitskalen? Sind sie sogar vorhersagbar? Wie abhängig sind Vulnerabilitäten von der Evolutionsgeschichte und den geologischen Rahmenbedingungen?

**Rückkopplung zwischen Geodynamik und Biodiversität:** Klimatische Veränderungen haben nachweislich einen großen Einfluss auf die Biodiversität, sowohl regional als auch global und auf kurzen Zeitskalen ebenso wie über Jahrmillionen. Doch neben dem Klima hat auch geodynamische Aktivität eine zentrale Bedeutung auf die Biodiversität. Die räumliche Trennung von Populationen ist meistens der erste Schritt zur Artbildung. Sie wird zu einem großen Teil durch plattentektonische Prozesse gesteuert. Ein neugebildeter Ozean oder ein sich neu auftürmendes Gebirge können für landbewohnende Arten unüberwindliche Barrieren darstellen. Aufsteigende Gebirge verändern auch Landschaften und Entwässerungsmuster. So war zum Beispiel der Aufstieg der Anden in Südamerika für die sehr hohe Biodiversität im Amazonasgebiet mitverantwortlich. Jüngere Forschung zeigt auch, dass Gebirge nicht nur einen Einfluss auf die Biodiversität haben, sondern umgekehrt auch die Artenvielfalt einen Einfluss auf Erosionsprozesse und die Heterogenität von Bodentypen hat.

**Biodiversität in den Ozeanen:** Auch im Ozean ist auf langen Zeitskalen die Abtrennung von Ozeanbecken mit einer Zunahme der Artbildungsrate mariner Organismen verknüpft. Auch die Entstehung von Biodiversitäts-Hotspots – hochdiversen und gleichzeitig verwundbaren Regionen mit einem großen Anteil von endemischen Arten – ist an Land wie im Meer dem komplexen Zusammenspiel von Klima, Tektonik und Nährstoffen geschuldet. Neben Zirkulations- und Sedimentationsmustern ist es vor allem die Habitat-Komplexität, die einen entscheidenden Einfluss auf regionale Biodiversität hat. Lokal spielt durch den geologischen Untergrund determinierter Nährstoffmangel eine überraschend große Rolle in der Artenvielfalt und auch im Meer sind eher nährstoffarme Regionen durch hohe Biodiversität gekennzeichnet. Selbst auf den großen räumlichen Skalen sind noch viele Fragen ungeklärt: Warum war während des Eozäns der mediterrane Tethys-Ozean ein Zentrum der Artenvielfalt und warum ist es heute das Korallendreieck im Westpazifik? Wie genau entstehen latitudinale Biodiversitätsgradienten? Waren zu hohe Temperaturen wirklich verantwortlich für die erdgeschichtlich häufig beobachteten Niedergänge der Artenvielfalt in Äquatornähe oder sind eher regionale tektonische Begebenheiten steuernd gewesen?

**Regulierende Wirkung der Biodiversität:** Ein bisher wenig beleuchtetes Thema ist auch umgekehrt die Auswirkung von Biodiversität auf andere Bereiche des Erdsystems. Insgesamt hat die Evolution komplexen Lebens zu einer größeren Resilienz gegenüber Klimaveränderungen geführt. Mehrere ökologische Studien zeigen, dass Biodiversität sehr wichtig für die Klimaregulation ist. Überraschend ist, dass nicht nur die Biomasse, sondern auch die Artenvielfalt des Planktons eine entscheidende Rolle beim Export von organischem Material auf den Meeresboden spielt und somit dem Treibhauseffekt entgegenwirkt. Eine größere Artenvielfalt von Kieselalgen bewirkt zum Beispiel ein besseres Verhaken der Skelette und damit höhere Absinkgeschwindigkeit. Selbst wenige Arten können sehr große ökologische Effekte haben und stellen somit Schlüsselarten, sowohl positiver als auch negativer Art. Berühmt sind die Wölfe im Yellowstone National Park, die nach ihrer Wiedereinführung in den 1990er Jahren eine erhebliche Steigerung der Biodiversität bewirkten. Durch die Eindämmung der Huftierpopulation konnte sich die Baum-Vegetation erholen, was die Ausbreitung von Bibern förderte. Diese wiederum sorgten nun sogar für veränderte Flussläufe. Somit lassen sich letztlich geologische Auswirkungen auch auf kleine Veränderungen in den Biodiversitätsmustern zurückführen. Der Einfluss von Biodiversität auf Flussläufe scheint über die Evolution von Pflanzen bereits seit Urzeiten zu bestehen, aber bisher fehlen quantitative Analysen.

**Sauerstoff in der Erdatmosphäre:** Sauerstoff war und ist entscheidend für die Biodiversität von Tieren. Die plötzliche Entfaltung tierischen Lebens um die Präkambrium-Kambrium-Grenze vor ca. 540 Mill. Jahren wäre ohne einen signifikanten Anstieg des Sauerstoffs in den Ozeanen und der Atmosphäre nicht möglich gewesen. Mögliche Erklärungen für den erhöhten Sauerstoffgehalt sind erhöhter Nährstoffeintrag in die Ozeane, erhöhte Planktonproduktion in Kombination mit verstärkter Kohlenstoff-Fixierung. Die höheren Sauerstoffkonzentrationen ermöglichten erstmals in der Erdgeschichte den hohen Stoffwechsel von räuberischen Tieren, was wiederum eine „Rüstungsspirale“ im Meer auslöste und letztlich zur „Kambrischen Explosion“, also der Entstehung vieler neuer Arten, führte. Auch der Gigantismus von Gliedertieren im Karbon vor ca. 300 Mill. Jahren (Libellen mit mehr als 60 cm Flügelspannweite und Tausendfüßer mit 2 m Länge) war vermutlich durch hohe Sauerstoffkonzentrationen ermöglicht worden. Die genauen Kopplungen von Sauerstoffkonzentrationen und Biodiversität sind aber noch unzureichend verstanden, auch weil sowohl Proxydaten als auch Modellierungsergebnisse nur sehr ungenaue Schätzungen erlauben.

Es ist durchaus plausibel, dass zum Beispiel die Evolution der Pferde und anderer großer Herbivoren nicht nur eine Reaktion auf die zunehmende Versteppung der Kontinente war, sondern diese auch selbst förderte. Wie kann man den Einfluss des Lebens auf Klima und Erdsystem quantitativ besser fassen? Wodurch zeichnen sich Schlüsselarten aus, von denen ein besonders großer Effekt auf das Erdsystem auszugehen scheint? Wie lässt sich die Koevolution von Leben und unbelebtem Erdsystem besser fassen?

**Massenaussterben:** Einer der größten Erträge der paläontologischen Biodiversitätsforschung ist die Erkenntnis von sogenannten Massenaussterben. Diese stellen geologisch kurze Episoden, in denen die Aussterberaten von zahlreichen Organismen-Gruppen signifikant über dem „normalen“ Hintergrund-Aussterben lag. Nach neueren Analysen kann es je nach Zähl- und Standardisierungsmethode zwischen 3 und 6 große Massenaussterben gegeben haben. Gemeinsam ist allen Aussterbeereignissen, dass sie erhebliche Auswirkungen auf die Evolution des Lebens auf der Erde hatten. In Anbetracht der oft diskutierten Möglichkeit, dass wir uns bereits am Beginn oder in der Mitte eines neuen Massenaussterbeereignisses befinden, ist es umso wichtiger der Frage nach den ökologischen und evolutionären Langzeitfolgen von Aussterbeereignissen zu klären. Wie lange dauert die Erholung von einem Massenaussterben? Wie stark ist die Dauer der Erholungsphase abhängig von der Intensität des Aussterbens oder eher von der Fortdauer von Stressfaktoren? Wie sind Aussterberaten und Speziationsraten zeitlich gekoppelt? Wie stark veränderten sich im Zusammenhang mit der Erholung der Biosphäre nach Aussterbeereignissen andere Komponenten des Erdsystems (z. B. Hydrosphäre, Geosphäre, Atmosphäre)? Kurzfristige Schockereignisse wie der Asteroideneinschlag an der Kreide-Paläogen-Grenze vor 66 Millionen Jahren hatten sicher ganz andere Folgen als langzeitliche Hitzephasen wie an der Perm-Trias-Grenze vor 252 Millionen Jahren.

**Biodiversität und die Raum-Zeitskala:** Eine große Herausforderung zur Beantwortung dieser Fragen liegt in der Überbrückung von Raum-Zeitskalen. Inwiefern lassen sich Erkenntnisse, die aus geologischen Zeitskalen resultieren, auf Projektionen für die nächsten Dekaden und Jahrhunderte übertragen? Wir haben Hinweise darauf, dass zum Beispiel die Verwundbarkeit von Arten gegenüber Umweltveränderungen zeitskaleninvariant ist. Arten, die unter Laborbedingungen schon bei geringen Veränderungen eine hohe Sterblichkeit aufweisen, haben auch auf geologischen Zeitskalen ein höheres Aussterberisiko. Im Gegensatz dazu gibt es auch Beispiele für eine starke Skalenvarianz. Dazu gehören beispielsweise Raten geologischer, klimatischer und evolutionärer Veränderungen. Der Zusammenhang zwischen beobachteten Raten von geobiologischen Veränderungen (z. B. Klimawandel, Evolutionsraten, Diversitätsveränderungen) und den Zeitskalen, über die solche Veränderungen beobachtet werden, unterliegt einem Potenzgesetz: Für jede Zunahme der Größenordnung in der Zeitspanne der Beobachtung wird die Größenordnung der scheinbaren Rate kleiner. Das ist nicht nur in Lücken in der fossilen Überlieferung begründet, sondern vor allem damit, dass kein geobiologischer Prozess kontinuierlich stattfindet. Ähnlich wie bei einer langen Reise mit dem Auto spielt für die beobachtete Durchschnittsgeschwindigkeit weniger die Höchstgeschwindigkeit als vielmehr die Anzahl und Länge von Pausen eine Rolle. Auf kurzen Reisen ist die Durchschnittsgeschwindigkeit höher, weil wenig oder keine Pausen gemacht werden, während auf langen Reisen auch bei Rasern die Durchschnittsgeschwindigkeit durch Pausen gedrückt wird. Da geologische Pausen oft in sedimentären Lücken liegen, erschwert uns dieser Zusammenhang die Einordnung der heutigen Biodiversitätskrise in den erdgeschichtlichen Rahmen.

## b) Methoden

Um die genannten Fragen anzugehen, ist deshalb die Erarbeitung eines Werkzeugkastens zur Überbrückung von Raum-Zeitskalen wichtig. Einerseits können wir empirisch (z. B. über Meta-Analysen) ermitteln, welche Klima- und Biodiversitätsvariablen eher skaleninvariant sind und welche stark von Raum-Zeitskalen betroffen sind. Die geeignetste Methode zur Überbrückung von Skalen sind einerseits „Upscaling-Modelle“, andererseits Simulations-Modellierungen von Populationen mit stochastischer Optimierung. Molekular-phylogenetische Methoden sind wichtig, um auch für schlecht fossil überlieferte Gruppen die Zeitlichkeit der Diversifizierung zu bestimmen. Die Verfälschungen der tatsächlichen Biodiversität durch taphonomische Filter betreffen zeitliche wie räumliche Muster. Die Weiterentwicklung sogenannter Probenstandardisierungsverfahren kann Beobachtungslücken in Raum und Zeit teilweise ausgleichen. Bei Analysen zur Biodiversität ist ein stärkerer systemischer Ansatz wichtig, der über einfache Ursache-Wirkungszusammenhänge hinausgeht und alle Wechselwirkungen zwischen den Sphären des Erdsystems mit einbezieht. Besonders relevant ist hier die Beurteilung von Kaskadeneffekten, bei der zum Beispiel die Einführung eines Räubers in ein Ökosystem sogar zu geologischen Veränderungen führen kann. Eine Kombination von Mesokosmos-Experimenten und mechanistischen Modellen ist dafür vielversprechend.

Neben diesen methodischen Ansätzen brauchen wir eine viel feiner aufgelöste und geographisch homogenisierte Inventur der Biodiversität in der Erdgeschichte, als wir sie derzeit haben. Die existierenden Daten sind zeitlich zu grob aufgelöst und geographisch zu heterogen verteilt, um entscheidend zu den zentralen Fragen der Biodiversität im Erdsystem beizutragen. Abhilfe kann hier ein erweiterter globaler Zensus des fossilen Lebens schaffen, der mit den besten verfügbaren stratigraphischen Methoden zeitlich möglichst fein aufgelöst ist und geographische Lücken im Fossilinventar geschlossen hat. Ein solcher Datensatz müsste eng mit gleich aufgelösten geologischen Daten verknüpft werden. Dies erfordert eine neue Gewinnung von Primärdaten, die nach einem Standard-Protokoll parallel Fossil- und Proxy-Daten zu Erdsystemparametern erhebt und dabei auf die Schließung geographischer Lücken abzielt. Die geringste Datendichte zur Paläo-Biodiversität ist im globalen Süden. Deshalb sind auch internationale forschungspolitische Initiativen nötig, um über „Shared-Benefit“ Ansätze nicht nur vereinzelte Forschende, sondern ganze Institutionen des globalen Südens in einen neuen Zensus des früheren Lebens einzubinden.

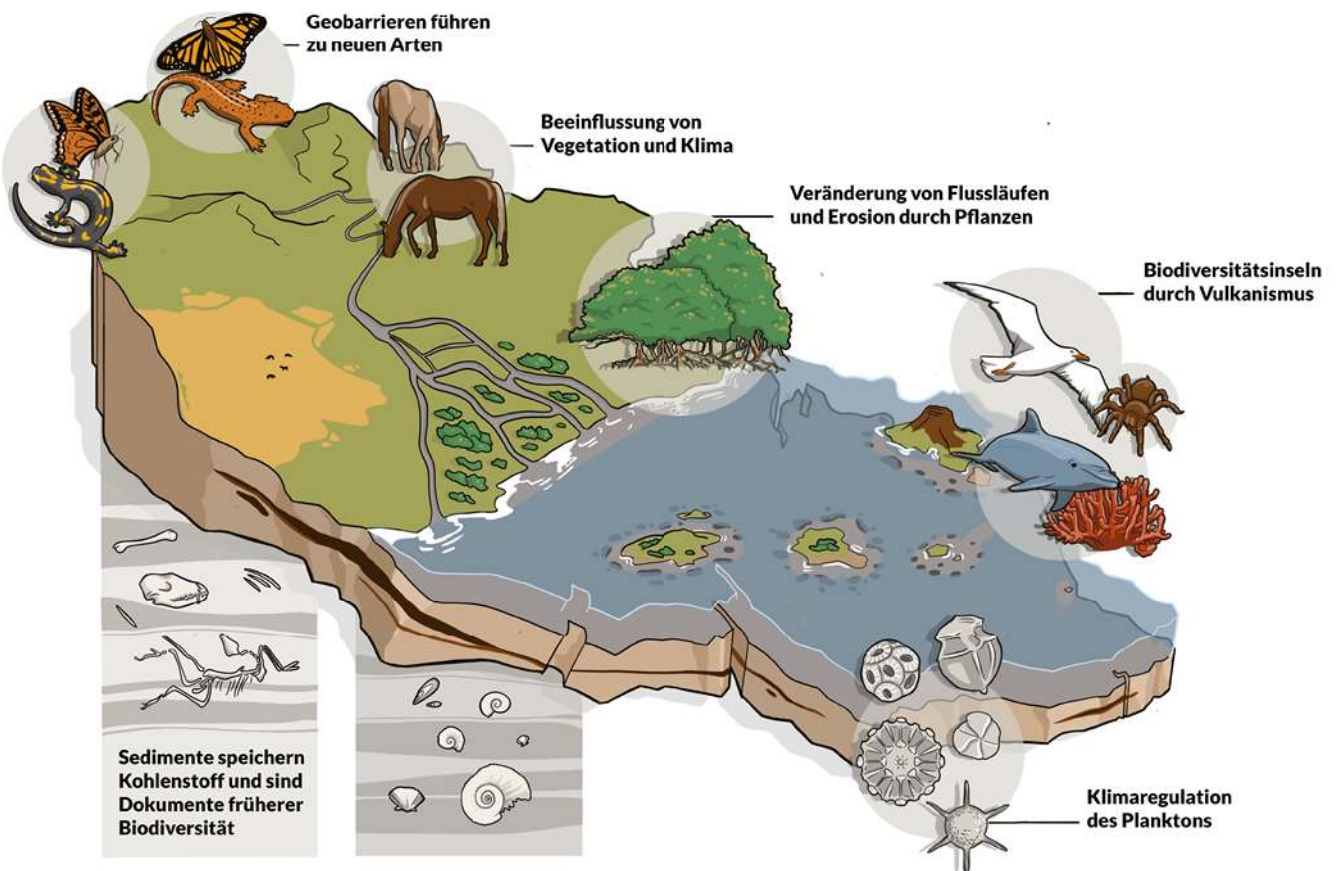


### c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Dieses Feld ist eng mit der Entstehung des Lebens auf der Erde (1.2 Entwicklung Erde-Leben) verknüpft. Erst als die geologischen Voraussetzungen für eine belebte Erde vorhanden waren, konnte Biodiversität eine signifikante Rolle im Erdsystem spielen. Auch die Dynamik der Erdoberfläche (Kapitel 2.2) ist maßgeblich durch Biodiversität beeinflusst. Die Kopplung von Biodiversität und Klima spielt eine zentrale Rolle in den naturbasierten Lösungen für Klimaanpassung und -minderung (Infobox Naturbasierte Lösungen). Die durch menschliche Aktivitäten voranschreitende Biodiversitätskrise macht Forschungsinitiativen in diesem Bereich essenziell.

### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Biodiversität wird über Fernerkundungsinitiativen wie dem Copernicus-Programm der EU oder dem NASA-Biodiversitätsprogramm erforscht. Biodiversitäts-Monitoring wird in GEO BON (Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network) und das Langzeitbeobachtungsnetzwerk ILTER (International Long-Term Ecological Research Network) betrieben. Biodiversitätsfragen werden in vielen nationalen und internationalen Gremien untersucht; vor allem der Weltbiodiversitätsrat (IPBES, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) ist zu nennen. Für Klimaauswirkungen ist die Arbeitsgruppe II des Weltklimarates (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) zuständig. In beiden Gremien werden allerdings geowissenschaftliche Aspekte noch wenig berücksichtigt. Wichtigste Dateninfrastrukturen für Biodiversitätsdaten sind die Global Biodiversity Information Facility (GBIF) und die Paleobiology Database (PBDB).



Kopplung von Biodiversität und Klima im Erdsystem heute und in der Erdgeschichte.

## 1.4 Von der terrestrischen zur extraterrestrischen Kryosphäre

In den Planetenwissenschaften gelten die extraterrestrischen Kryosphären als Schlüsselkomponenten für die Beantwortung einiger der grundlegendsten Fragen zum Leben außerhalb der Erde. Für die Untersuchung der irdischen Kryosphäre stehen uns eine Vielzahl von Methoden und Techniken zur Verfügung, während Planetenmissionen wertvolle Informationen über andere planetare Körper liefern. Mit gemeinsamen Untersuchungen der terrestrischen und der extraterrestrischen Kryosphären kann ein übergreifender Kontext für die planetare Entwicklung gebildet werden.

### a) Von der Erde über den Mars bis zu den Eismonden

Eis ist im Sonnensystem allgegenwärtig. Es wurde auf vielen planetaren Körpern dokumentiert, von Asteroiden und Kometen, über Eismonde, Polarregionen auf der Erde und dem Mars bis hin zu dauerhaft beschatteten Kratern auf dem Mond und sogar auf dem Merkur, dem sonnennächsten Planeten. Da der Mars einst Wasser auf seiner Oberfläche führte und man davon ausgeht, dass die Eismonde unter ihrer Eiskruste Wasserozeane beherbergen, sind sie wichtige Ziele für die Suche nach Leben außerhalb der Erde.

Auf der Erde dient Eis als Frischwasserspeicher sowie als Fenster in vergangene Umweltbedingungen. Es konserviert Mikroorganismen und auch Frostleichen bis zur Größe von Mammuts über Tausende von Jahren. Auf der Erde wurden in subglazialen Wasser unter Tausenden von Metern Eis, Pilze, Archaeen und vor allem Bakterien gefunden. Kilometerdicke Eispanzer, die unterirdische Ozeane auf Eismonden im äußeren Sonnensystem bedecken, könnten lebensfreundliche Bedingungen aufweisen. Auf dem Mars dokumentieren die Nord- und Südpolkappen dessen jüngere Klimaentwicklung. Auf der Erde sind Polarregionen von besonderer Bedeutung, um Hypothesen zu testen, die die Entstehung und Entwicklung von Eisumgebungen anderswo im Sonnensystem aufzeigen.

**Terrestrische Systeme in Vergleichsstudien:** Meer- und Schelfeis in der Antarktis und Arktis sind die besten terrestrische Analoga, um Prozesse an den Grenzflächen zwischen der überlagernden Eisschicht und dem darunter liegenden Ozean zu untersuchen. Schmelz- und Gefrierprozesse wie auf der Erde sind auch auf Eismonden zu erwarten und beeinflussen Eisdicke sowie die Zirkulation und Chemie der Ozeane. Auf Körpern des äußeren Sonnensystems können diese Eispanzer Mächtigkeiten von bis zu dutzenden oder sogar hunderten Kilometer erreichen. Hingegen umfassen die mächtigsten Eisschichten auf der Erde weniger als „nur“ 5 km. Auch terrestrische Permafrost-Bedingungen außerhalb der Arktis und Antarktis werden oft als Analoga benutzt, um extraterrestrische geomorphologische Prozesse zu analysieren.

**Entwicklung von Leben auf Eismonden?** Der durch das Eis vermittelte Materialaustausch zwischen der Eisoberfläche und dem Ozean darunter ist entscheidend für die Eignung der Eismonde als Habitat für einfache Lebensformen. Grenzflächen und hydrologische Systeme in der äußeren Eisschicht liefern wertvolle Informationen über die Chemie des Ozeans. Durch die Bestrahlung der Oberfläche mit hochenergetischen Teilchen entstehen Oxidationsmittel wie Wasserstoffperoxid, die in den darunter liegenden Ozean transportiert werden. Zusammen mit reduzierenden Verbindungen, die durch die gezeitengetriebene hydrothermale Aktivität am Grunde der subkrustalen Ozeane entstehen, könnte dies ein chemisches Ungleichgewicht schaffen. Dieses wiederum könnte die treibende Kraft für die Entwicklung von Leben sein.

**Mars-Kryosphäre:** Auf dem Mars befinden sich große Wassereisreservoirs in den Polkappen, im Untergrund in mittleren Breiten sowie möglicherweise in äquatorialen Regionen. Diese Eisreservoirs sind über lange Zeitskalen entstanden und durch das vorherrschende Marsklima beeinflusst worden. Mit der Untersuchung der Mars-Kryosphäre kann das Klima und die geologische Entwicklung des Planeten entschlüsselt werden. Ziele für die in-situ-Ressourcennutzung (ISRU) für die künftige Erkundung durch den Menschen können so identifiziert werden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang einmal mehr terrestrische Analoga. Verwitterungsprozesse verlaufen auf dem Mars ähnlich schnell wie auf der Erde, so dass viele auf dem Mars ablaufende Prozesse wie granuläres Fließen durch Erd-Analogien, beispielsweise wie Permafrostgebiete, interpretiert werden können.

Die Antarktis und hocharktische Gebiete sind die besten irdischen Analogien zu den Marspolkappen. Ähnlich wie die Antarktis sind die Marspolkappen von kilometerdickem Eis bedeckt, das mit dem felsigen Untergrund in Kontakt steht. Die antarktischen Trockentäler und hocharktischen Permafrostgebiete bieten also die Möglichkeit, marsähnliche geomorphologische und geochemische Prozesse zu beobachten. Die Fläche der Marspolkappen ist vergleichbar mit der der polaren Eisschilde auf der Erde; jedoch bestehen die Marspolkappen neben Wassereis auch aus CO<sub>2</sub>-Eis und Staub. Die polaren Schichtablagerungen auf dem Mars wurden mit Radar untersucht und deuten auf geschichtete Strukturen hin, die Klimavariabilität aufzeigen.

**Subglaziale Seen:** Eine faszinierende und zugleich umstrittene Entdeckung sind die salzhaltigen subglazialen Seen am Südpol des Mars, die durch helle Radarreflexionen entdeckt wurden. Auch in den terrestrischen Permafrostgebieten finden sich in weiten Regionen der Hocharktis hochsaline Bereiche (z. B. „Kryopegs“), die ebenfalls kaum erforscht sind. Das Vorhandensein von flüssigem Wasser in einer so kalten Region auf dem Mars ist rätselhaft, denn die Temperaturen können dort bis auf -153 °C sinken. Auf der Erde gibt es subglaziale Seen in der Antarktis, wie den Wostoksee, der unter 3 km Eis liegt. Wenn es heute tatsächlich noch subglaziale Seen auf dem Mars geben sollte, müssen die Bedingungen für ihre Entstehung tiefergehend erforscht werden.

## b) Methoden

Die Entschlüsselung der kryosphärischen Prozesse auf extraterrestrischen Welten erfordert einen multidisziplinären Ansatz, der sich auf die terrestrische Polarforschung stützt. Im Gegenzug haben extraterrestrische Welten das Potenzial, neue Einsichten in solche Prozesse unter anderen Bedingungen zu vermitteln, als wir sie von der Erde kennen. Missionsdaten, Modellierungen, Feldarbeit und Laborexperimente sind zu integrierende Schlüsselkomponenten.

**Missionen und satellitengestützte Messungen.** Zukünftige Radar-, Laser-Altimeter- und Schwerefeldmessungen sind notwendig, um die Eishüllen der Monde des äußeren Sonnensystems und die Wechselwirkung der Polarregionen mit der Marsatmosphäre zu untersuchen. Auf der Erde haben ESA's Cryosat-2 und NASA's ICESat-2 entscheidend zum Verständnis der Eisdynamik und Auswirkung des Klimawandels beigetragen. Radargeräte könnten auf dem Mars das Klimaarchiv in polaren Schichtablagerungen entschlüsseln. Bei eisbedeckten Monden fehlen solche Messungen bisher. Mit der ESA-Mission JUICE und der NASA-Raumsonde Europa Clipper werden im nächsten Jahrzehnt die ersten Radar- und Laser-Höhenmessungen der Jupitermonde erwartet. Diese Daten, kombiniert mit hochauflösenden Aufnahmen von der Oberfläche, werden unser Prozessverständnis der extraterrestrischen Kryosphären revolutionieren. Sie werden die auf unserem eigenen Planeten ablaufenden Prozesse in einen interplanetaren Zusammenhang stellen.

In-situ-Messungen durch Bohrungen und Eisbohrkernentnahmen sind die beste Methode, die chemische Zusammensetzung des Eises und der Ozeane unserer Erde zu erforschen. Diese Untersuchungen sind dringend erforderlich, um das astrobiologische Potenzial der extraterrestrischen Kryosphären zu quantifizieren und zugängliche ISRU-Standorte auf dem Mars zu finden. Bis solche Untersuchungen zur Verfügung stehen, stammt unser Wissen über die Zusammensetzung des Eises und seiner Wechselwirkung mit dem Ozean aus Fernerkundungsdaten und Messungen der Exosphäre aus nahen Vorbeifügen und aus der Umlaufbahn.

**Modellierungsarbeit.** Mit der sich immer weiter steigenden Rechenleistung und Fortschritten bei numerischen Methoden sind aktuelle Modelle in der Lage, komplexe physikalische Prozesse in der Kryosphäre zu erfassen und Szenarien auf globaler Skala zu testen. Die Orbitalentwicklung des Mars wird stark von Änderungen der Neigung der Rotationsachse beeinflusst, während die der Eismonde durch Wechselwirkungen mit den Bahnen anderer Himmelskörper gesteuert wird. Modelle können zeigen, wie diese Entwicklungen die Verteilung des Eises und die Dicke der Kryosphäre über lange Zeiträume beeinflussen. Globale Klimamodelle (GCM) entschlüsseln physikalische Prozesse in der Marsatmosphäre und ihre Wechselwirkung mit Eisreservoirs. GCMs wurden jetzt für die Untersuchung der Zirkulation in den unterirdischen Ozeanen auf Eismonden angepasst. In diesen Simulationsmodellen stammen viele Erkenntnisse aus der Eisdynamik der Erde. Thermische Modelle zur Bildung von unterirdischen Seen und

Soletaschen in den Hüllen von Eismonden oder an der Basis von Polkappen auf dem Mars basieren auf terrestrischen Analogmodellen von wie z. B. Salztransportmodellen.

In der Zukunft ist es erforderlich, solche Modelle miteinander zu kombinieren und die Wechselwirkung zwischen Untergrund, Oberfläche und potenzieller Atmosphäre zu untersuchen. Kombinierte Modellierungsstudien befassen sich mit der Wechselwirkung zwischen Eis und Ozean auf Eismonden, der Rolle der Polkappen für den thermischen Zustand des Marsuntergrunds und dem Austausch zwischen Eisreservoirs und der Marsatmosphäre. Diese Modelle erweitern unser Wissen über kryosphärenrelevante Prozesse auf räumlichen und zeitlichen Skalen sowie über die derzeitigen Messmöglichkeiten hinaus.

**Feldarbeit und terrestrische Analoga.** Die Untersuchung terrestrischer Analoga und die Analyse ihrer Vergleichbarkeit zu Eislandschaften auf dem Mars und den Eismonden ist eine entscheidende Strategie. Geomorphologische und morphometrische Analysen von analogen Standorten in der Antarktis und der Arktis geben Aufschluss zur Gletschererosion, den Eisfluss und die Kopplungseffekte zwischen Eis, dem darunter liegenden Ozean und – im Falle von Mars – der Atmosphäre. Mit Radarkampagnen auf der Erde kann in die Struktur tieferer Eisschichten hineingeblickt werden und so Modelle der darunter liegenden Ozeane verbessert werden. So können sie auf den Mars und Eismonde angewendet werden.

Terrestrische Analoga sind auch die beste Möglichkeiten, unsere Instrumente zu testen, bevor wir sie zur Erforschung extraterrestrischer Welten schicken. Sie sind für die Erprobung neuer Instrumente und Messverfahren für die künftige Erforschung des Weltraums, als auch für die Ausbildung von Wissenschafts- und Instrumententeams unerlässlich. Eine Vielzahl von Tests können so durchgeführt werden: das autonome Fahren von Rovern, das Sammeln von Mars-Proben, von Kamerasystemen und Software zur Navigation auf dem Saturnmond Titan, von Bohrern und Seismometern oder zur Erkundung subglazialer Seen als Vorbereitung für den Zugang zu unterirdischen Ozeanen des Saturnmondes Enceladus oder des Jupitermondes Europa. Es gibt bereits mehrere Datenbanken für terrestrische Analoga mit ausführlichen Beschreibungen der Lage des Feldes, des geologischen Kontextes und der technologischen Infrastruktur. Diese Datenbanken müssen ständig aktualisiert und gepflegt werden, um die aktuellen Informationen über solche Standorte zu liefern.

**Laborstudien.** Die Bedingungen zu testen, für welche es auf unserem eigenen Planeten keine Entsprechung gibt, können manchmal nur durch Laborstudien erfolgen. Darüber hinaus können solche Arbeiten die Grundlage für die Kalibrierung von Instrumentendaten bilden, die Interpretationen von Beobachtungen unterstützen und numerische Modellierungsstudien verbessern. Experimentelle Arbeiten zur Rheologie von Eis und Eisgemischen können einen wichtigen Beitrag zum Erforschen von Eistektonik, Massenschwund, Deformation und Eisflussprozessen leisten. Laborexperimente zur Bestimmung thermophysikalischer Parameter von Eis unter extremen Bedingungen informieren über den thermischen und dynamischen Zustand von Eis auf anderen Planeten. Laborexperimente, die Informationen über die physikalischen (thermische und strukturelle) und chemischen (einschließlich Verunreinigungen wie Salze und Staub) Eigenschaften von Eis enthalten, sind Grundlage zur Interpretation von Fernerkundungsdaten. Mit den Resultaten aus Laborexperimenten zum Gefrieren, Schmelzen und Sublimieren können die Prozesse an den verschiedenen Eisgrenzen (d. h. Eis-Ozean, Eis-Atmosphäre und Eis-Boden-Grenzen) physikalisch parametrisiert werden. Astrobiologische Laborstudien, die derzeit einen immer größeren Raum in der Forschung einnehmen, liefern entscheidende Aspekte zu den Bedingungen, unter denen sich Leben außerhalb der Erde entwickeln könnte.

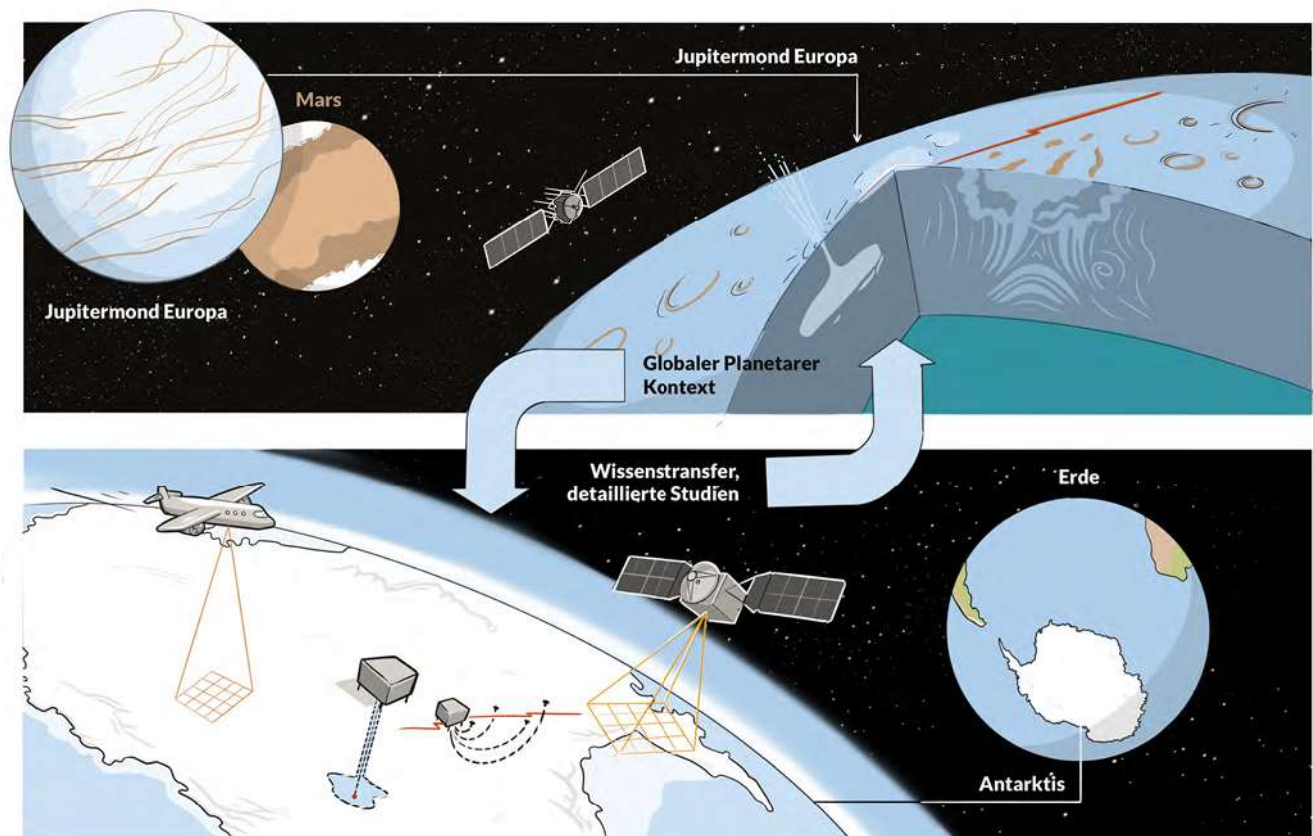
## c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Die Rückkopplungen zwischen Kryosphäre, Atmosphäre, und dem Untergrund machen aus den Planeten erst ein „System“ (Infobox Komplexe Systeme). Die Verfügbarkeit von Wasser ist Voraussetzung für die Bewohnbarkeit anderer Planeten für außerirdische Lebensformen und für die künftige Besiedlung durch den Menschen. Eine Gegenüberstellung der Bedingungen extraterrestrischer Kryosphären kann als Zukunftsvorhersage für unseren eigenen Planeten im Kontext der planetaren Umgebungen im Sonnensystem zu völlig neuen Einsichten führen. Die Kryosphärenforschung auf der Erde

kann von gemeinsam entwickelten Messverfahren (Infobox Umweltseismologie) und Erkundungskampagnen zu analogen Standorten profitieren. Dies ist wichtig, weil die Kryosphäre auf der Erde stark vom Klimawandel betroffen ist. Darüber hinaus können gemeinsame Forschungsstudien zur terrestrischen und extraterrestrischen Kryosphäre das öffentliche Bewusstsein und Engagement für den Zustand des Erdklimas und ganz generell die Faszination für Entdeckungen stärken.

**d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Die „International Mars Ice Mapper Mission“ befindet sich derzeit in der Konzeptionsphase. In terrestrischen Analoga (z. B. die Arctic Mars Analog Svalbard Expedition – AMASE) werden in Messkampagnen Instrumente für zukünftige Missionen getestet. Eismonde wurden sowohl in der langfristigen Strategie „Voyage 2050“ der ESA als auch im „Decadal Survey“ der NASA als vorrangige Ziele für die zukünftige Erforschung des Sonnensystems empfohlen. Insbesondere der Saturnmond Enceladus, von dem man annimmt, dass er die wichtigsten Voraussetzungen für Habitabilität besitzt, wurde von einem Expertenausschuss als optimales Ziel für eine große L4 Mission der ESA mit einer Startmöglichkeit in den frühen 2040er Jahren identifiziert.



Mit den Erkenntnissen aus detaillierten Messungen der Eisregionen auf der Erde können Prozesse in extraterrestrischen Kryosphären entschlüsselt werden. Diese wiederum stellen unseren eigenen Planeten in einen planetaren Kontext.

## 1.5 Vulkanismus und Magmensysteme

Magmatische Prozesse stellen die wichtigste Verbindung zwischen dem Inneren von planetaren Körpern und ihrer Oberfläche und Atmosphäre dar. Sie sind für die Entstehung von Kontinenten und großen Erzlagerstätten verantwortlich und beeinflussen die Erdatmosphäre und damit das Klima. Die Entschlüsselung der zugrunde liegenden, oft nichtlinearen Prozesse erfordert eine Verbindung von Laborexperimenten und Geländebeobachtungen. Durch Entwicklung eines generellen numerischen Modells magmatischer Systeme kann es nun gelingen, Zeitpunkte, Abläufe und Entwicklung der Ausbrüche von Vulkanen zu prognostizieren.

### a) Magmen auf der Erde und anderen planetaren Körpern

Bildung, Transport, Intrusion und Eruption von Schmelzen bilden zusammen magmatische Systeme, die das Innere von planetaren Körpern mit ihrer Kruste und der Oberfläche verbinden. Diese werden daher auch als „transkrustale magmatische Systeme“ bezeichnet. Solche Systeme werden von internen Prozessen, wie Änderungen in den Druck- und Temperaturbedingungen infolge der Konvektionsbewegungen im festen Erdmantel und tektonischer Bewegungen in der Kruste beeinflusst. Diese Systeme werden allerdings auch durch Veränderungen beeinflusst, die an der Oberfläche ablaufen (wie Erosion und Sedimentation oder Vereisungen). Magmatische Systeme verbinden zudem eine Vielzahl von Prozessen, die über ganz unterschiedliche Zeiträume ablaufen. Vulkane und die dazugehörigen Fördersysteme sind über hunderttausende oder sogar Millionen Jahre aktiv, während Vulkaneruptionen innerhalb von Minuten Material explosiv in die Atmosphäre entlassen.

Hieraus ergeben sich aber eine Reihe von Notwendigkeiten. So müssen die Systeme auf unterschiedlichen Zeitskalen untersucht werden, so dass die Modelle letztendlich in der Lage sind, alle Teilprozesse mit ihrer jeweiligen Prozessrate abzubilden. Außerdem müssen Erkenntnisse aus den unterschiedlichen Stockwerken des Erdsystems – also vom oberen Erdmantel durch die gesamte Kruste bis an die Erdoberfläche – zusammengefügt werden, die traditionell Forschungsgegenstand unterschiedlicher Teildisziplinen der Geowissenschaften sind. Die Herausforderungen auf dem Weg zum Erstellen eines quantitativen Modells erwachsen aus der Tatsache, dass magmatische Systeme komplex sind (Infobox Komplexe Systeme), so dass an vielen Punkten nichtlineare Prozesse und Kippunkte eine entscheidende Rolle spielen. Beispielsweise muss der Grad der Aufschmelzung eines Gesteins einen gewissen Schwellenwert überschreiten, bevor sich die Schmelze in Bewegung setzen kann, oder die Eruption eines Vulkans wird schlagartig ausgelöst, sobald in der Magmakammer ein kritischer Druck erreicht ist.

**Transkrustale magmatische Systeme entschlüsseln.** Die moderne Menschheit hat seit der Industrialisierung noch keinen wirklich großen Vulkanausbruch erlebt, auch wenn Supervulkane in der Erdgeschichte regelmäßig ausgebrochen sind. Aber selbst moderate Vulkanausbrüche haben für das betroffene Gebiet gravierende Auswirkungen. In Zukunft brauchen wir ein physikalisch fundiertes Modell magmatischer Systeme, um zu erkennen, welche Signale eine große Eruption ankündigen oder ob zur Entstehung eines Supervulkans außergewöhnliche Ereignisse oder geologische Konstellationen auftreten müssen.

In den letzten Jahrzehnten wurden bei der Quantifizierung magmatischer Prozesse große Fortschritte erzielt. Wir verfügen heute über grundlegende Erkenntnisse darüber, wie und wo Schmelzen entstehen, wie und mit welcher Rate sich die Zusammensetzung dieser Schmelzen verändert und warum Vulkane ausbrechen. Wir können auf Feldbeobachtungen von ausbrechenden Vulkanen und auf in der Tiefe kristallisierte magmatische Körper zurückgreifen. Auch verfügen wir über verschiedene geophysikalische Beobachtungen, die – zumindest grob – Aufschluss über die Tiefenstruktur der Kruste unter aktiven Vulkansystemen geben. Selbst bei über der Wasseroberfläche ausbrechenden irdischen Vulkanen und bei jenen, wo intensive Beobachtungen direkt am Vulkanrand oder mittels Fernerkundung per Satellit durchgeführt werden können, sind die Rückkopplungsmechanismen zwischen äußeren Einflüssen und dem Eruptionsstil jedoch noch nicht vollständig quantifizierbar.

Etwa zwei Drittel der ungefähr  $35 \text{ km}^3$  Magma, die pro Jahr auf der Erde entstehen, werden unter Wasser entlang der mittelozeanischen Rücken produziert. Diese Bereiche sind mittlerweile in einigen ausgewählten Lokalitäten sehr gut untersucht, trotz der technischen Hindernisse, die mit ihrer Erkundung verbunden sind. Die Entstehung und Intrusion von Magmen in Abhängigkeit von Spreizungstätigkeit der tektonischen Platten und die Kopplung der magmatischen Tätigkeit mit Erdoberflächenprozessen werden kontrovers diskutiert, ebenso wie die genauen Mechanismen der magmatischen Akkretion der Ozeankruste.

Die Verknüpfung von oberflächennahen und in der Tiefe stattfindenden magmatischen Prozessen ist nur realisierbar, wenn die Bewegungen von Magmen und Schmelzen im Mantel und in der Kruste quantifiziert werden. Dies muss auch das Verhalten von Gasen und gelösten, flüchtigen Komponenten im Magma mit einschließen, da magmatische Entgasung ein entscheidender Faktor beim Ablauf von Eruptionen ist. Die Bestimmung der Geschwindigkeiten und Zeitskalen in und mit denen die einzelnen Teilprozesse ablaufen, sind hier von besonderer Wichtigkeit. Insgesamt sind deshalb Ansätze gefordert, die Laborexperimente mit Geländebeobachtungen verbinden und die gewonnenen Daten in numerische Simulationen einfließen lassen. Über die Interpretation der zahlreichen Daten aus dem geologischen Gesteinsarchiv und aus der Beobachtung der aktuellen magmatischen Aktivität kann es letztendlich gelingen, magmatische Systeme in ihrer gesamten räumlichen und zeitlichen Dynamik zu entschlüsseln.

**Magmatische Systeme auf dem Mond und anderen Planeten.** Dank planetarer Missionen und gesammelter Mondproben und Meteoriten von Mars und Mond haben wir Einblicke in magmatische Prozesse auf erdnahen planetaren Körpern erhalten. Die großen vulkanischen Zentren auf dem Mars gehören zu den auffälligsten geologischen Oberflächenstrukturen des Planeten Mars. Nur wenige Millionen Jahre alte Lavaströme sowie seismische Ereignisse deuten darauf hin, dass dort die tektonische Aktivität – möglicherweise in Verbindung mit magmatischen Prozessen – immer noch im Gange ist. Die Oberfläche der Venus ist auf allen räumlichen Skalen vollständig von vulkanischen Merkmalen dominiert und die Magellan-Mission lieferte entsprechende deutliche Hinweise auf aktiven Vulkanismus. Die sogenannten „Tesserae-Terrains“, die vermutlich durch voluminöses partielles Schmelzen basaltischer Kruste entstanden sind, machen etwa 8 % der Planetenoberfläche aus. Bei ihrer Bildung könnte auch Wasser eine Rolle gespielt haben. Die auffälligsten vulkanischen Merkmale auf dem Merkur sind die sogenannten nördlichen Vulkanebenen, die sich vermutlich in einem einzigen voluminösen Ereignis gebildet haben. Auf dem Mond sind die Mare-Basalte vulkanischen Ursprungs und sein jüngster Vulkanismus deutet auf eine Aktivität bis vor etwa 1,2 Milliarden Jahren hin. Der größte Teil der beobachteten vulkanischen Oberflächen all dieser Körper ist basaltisch, d. h. sie bestehen aus wenig entwickelten Magmen, die mehr oder weniger direkt aus dem Inneren der planetaren Körper an die Oberfläche traten. Auf dem Mars wurden jedoch auch höher entwickelte Gesteinszusammensetzungen festgestellt, die eine mehrstufige Entwicklung belegen.

Generell sind die Prozesse, die bei der Bildung und Entwicklung von Magmen und Vulkanen auf der Erde ablaufen, von zentraler Bedeutung für das Verständnis dieser Vorgänge auf anderen Planeten. Numerische Modelle magmatischer Systeme, die für die Erde entwickelt wurden, können prinzipiell auf andere Welten übertragen werden. Zumindest sofern die entsprechenden physikalischen Parameter, wie Mächtigkeit und Aufbau von Mantel und Kruste des planetaren Körpers, bekannt sind oder abgeschätzt werden können. Bedeutende Unterschiede bestehen beispielsweise in den Werten für die Gravitationsbeschleunigung, die im Vergleich zur Erde beim Mond bei einem Sechstel, bei Merkur und Mars bei etwa einem Drittel und bei der Venus bei 90 % liegt. Diese Abweichungen wirken sich z. B. auf den Druck und damit auf die Entgasung von Magmen aus. Auch die Auftriebskraft des Magmas und damit sein Aufstieg durch Mantel und Kruste werden so beeinflusst. Ähnlich ist die gravitative Abtrennung von Kristallen aus der Schmelze, die für die chemische Entwicklung von Magmen von zentraler Bedeutung ist. Numerische Modelle sind prinzipiell in der Lage, solche von der Erde abweichenden Parameter zu berücksichtigen und damit auch extraterrestrische magmatische Systeme zu simulieren.

**Integrierte, quantitative magmatische Modelle.** Eine zentrale Herausforderung bei der Entschlüsselung von Prozessen besteht darin, alle Beobachtungen zusammenzuführen und damit ein quantitatives Modell des gesamten magmatischen Systems zu entwickeln, aus dem sich überprüfbar Vorhersagen ableiten lassen. In dieser Hinsicht lernt die Erforschung magmatischer Prozesse gegenwärtig von anderen wissenschaftlichen Disziplinen wie der Tektonik und der Klimamodellierung. Dort existieren solche physikalisch basierten, quantitativen Modelle seit Jahrzehnten und bilden die Grundlage für Vorhersagen. Wenn wir magmatische Prozesse in gleichem Maße quantifizieren und zu einem Punkt gelangen wollen, an dem wir kurz- und langfristige Prognosen über zukünftige Vulkanausbrüche treffen können, müssen wir solche umfassenden dynamischen Modelle entwickeln. Dafür müssen die kontrollierenden, allgemeingültigen Faktoren für Vorhersagemodelle erkannt und parametrisiert werden, egal wo und unter welchen äußeren Bedingungen der Vulkan steht. Um dieses Ziel zu erreichen, hat die Modellierung der Prozesse des Erdinneren im Vergleich zur Klimamodellierung einige Hürden zu überwinden. Beispielsweise überspannen die Prozesse, die im Erdinneren ablaufen zum Teil sehr unterschiedliche Zeitskalen. Vieles entzieht sich auch der direkten Beobachtung, so dass das Überprüfen der Modelle in der Natur ungleich schwieriger ist. Außerdem werden Magmenbewegungen innerhalb der Erde bisher mit anderen numerischen Codes modelliert als ihr explosiver Auswurf an der Oberfläche, ihre Fragmentierung, Entgasung und Ausbreitung in die Atmosphäre. Eine Vereinheitlichung oder zumindest intensive Verknüpfung dieser Modellierungen stellt eine Herausforderung dar.

Mit Hilfe neuer Modellansätze, die in der Lage sind die relativ langsamen Prozesse des Erdinneren mit explosiven Eruptionseignissen zu verknüpfen, kann es gelingen ein integriertes quantitatives physikalisch-chemisches Modell magmatischer Systeme von der Quelle bis zur Atmosphäre zu entwickeln. Dieses kann mit den Beobachtungen und experimentellen Befunden abgeglichen werden, aufbauend auf einer Vielzahl von Geländebeobachtungen und Daten aus den unterschiedlichsten geowissenschaftlichen Subdisziplinen. Darüber hinaus bilden Untersuchungen auf der Erde, wo eine Fülle von Informationen direkt zugänglich ist, die Basis zur Entschlüsselung magmatischer Systeme auf anderen planetaren Körpern. Dies trägt letztlich dazu bei, einen globalen Überblick über die magmatischen Prozesse auf Planeten zu gewinnen. Dieser könnte uns wiederum helfen, Prozesse zu identifizieren, die die Erde zu einem einzigartigen Ort im Sonnensystem machen.

## b) Methoden

Die großen Herausforderungen bei der Erstellung eines quantitativen Modells für Magmensysteme liegen einerseits bei den erforderlichen technischen Entwicklungen im Bereich der numerischen Modellierung mehrphasiger Systeme, sowie der Kopplung und Integration von chemisch-mineralogischen mit numerischen Modellen. Andererseits auch bei dem disziplinübergreifenden, kooperativen Charakter des Vorhabens, der einen integrierten Ansatz zwischen allen beteiligten Disziplinen der Geowissenschaften erfordert (z. B. Vulkanologie, Geophysik, Petrologie, Geochronologie, Geochemie, Geodäsie, Atmosphärenforschung, numerische Modellierung). Die Ergebnisse von Fernerkundung, Geländestudien, Probenanalysen und Laborexperimenten müssen direkt in die quantitativen Modelle einfließen. Bisherige Ansätze in dieser Richtung beschränken sich nur auf Teile des magmatischen Systems oder adressieren die Prozesse nur auf qualitative Art und Weise. Viele kleinskalige Prozesse können in großmaßstäblichen Modellen nicht aufgelöst werden. Parametrisierungen dieser Prozesse müssen zudem (weiter)entwickelt und mit Experimenten kalibriert werden, ähnlich wie die Wolkenbildung in Klimamodellen berücksichtigt wird. Hierbei sollte aber immer im Bewusstsein bleiben, dass numerische Modelle keine detailgetreuen Kopien der Erde in allen Einzelheiten sind. Sie nutzen Vereinfachungen und Approximationen und fokussieren auf einzelne Fragestellungen in unterschiedlich starkem Detail.

## c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

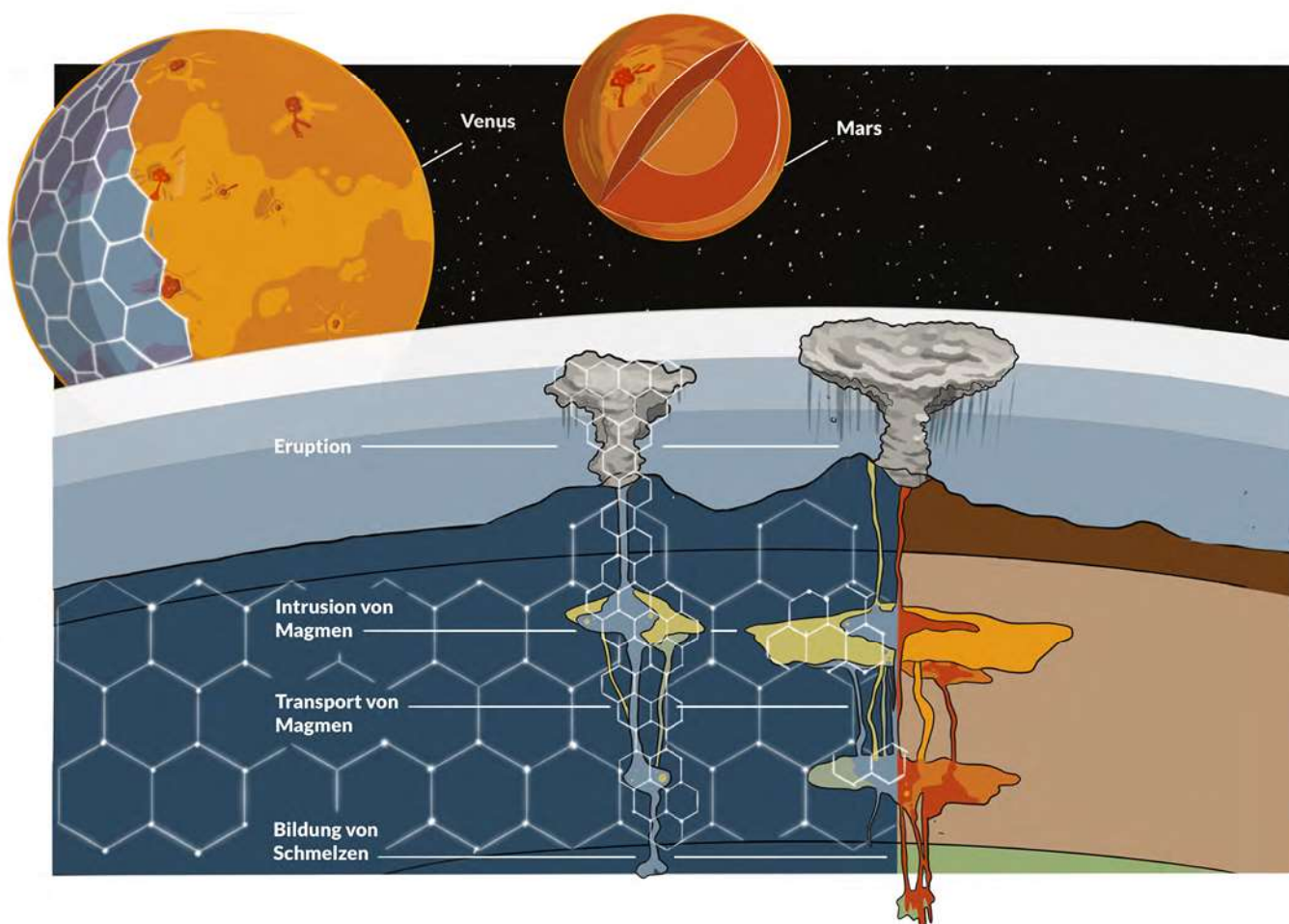
Die Erstellung eines integrierten Modells für Magmensysteme erfordert eine enge Interaktion zwischen den Geowissenschaften der festen Erde und der Atmosphärenforschung. Hierbei profitieren die Geowissenschaften von der Erfahrung der Atmosphärenwissenschaften bei der Entwicklung und Anwendung quantitativer Modelle des Erdsystems. Im Gegenzug stellen die Geowissenschaften Informationen zum Eintrag potenziell klimawirksamer, vulkanischer Auswurfprodukte (fest und gasförmig) in die Atmosphäre zur Verfügung. Verbindungen zu den Ingenieurwissenschaften



werden im Bereich der Geländebeobachtung zur Entwicklung von beispielsweise chemischen, spektroskopischen und seismischen Instrumenten benötigt. Bei der Modellierung ergeben sich Verknüpfungen zur Katastrophenforschung im regionalen Bereich (2.1 System Erdkruste), aber auch bezüglich der Migration nach Naturkatastrophen. Ein quantitatives Modell von magmatischen Systemen im marinen Bereich wird in die Ozeanographie und die Meeresbiologie hineinwirken. Die Bildung vieler Metallagerstätten ist an magmatische Systeme gebunden (3.1 Mineralische Rohstoffe). Hier werden ökonomische Interessen mit angesprochen, die die moderne, technische Welt mit Rohstoffen versorgen. Ein umfassendes, auf die Erde geeichtes Modell von Magmensystemen könnte auf andere Planeten mit Atmosphären angewandt werden. Wissenschaftliche Fragestellungen könnten so definiert und Vorhersagen getroffen werden, die von künftigen Planetenmissionen getestet werden können.

#### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Das Ziel des Global Volcanism Projects (GVP) der Smithsonian Institution ist es, Informationen über die globale vulkanische Aktivität der letzten 10.000 Jahre zu dokumentieren und zu verstehen. Das Projekt KMT (Krafla Magma Testbed) auf Island hat zum Ziel eine aktive Magmenkammer zu erbohren und damit erstmalig Proben aus einem solchen aktiven System zu erhalten. Das Yellowstone Volcano Observatory (YVO) des USGS ist ein Konsortium aus mehreren öffentlichen Einrichtungen im Nordwesten der USA, die das Yellowstone-Gebiet in Bezug auf Gefahrenpotential, Erdbeben und magmatische Tätigkeit überwachen.



Zwischen der Entstehung von Gesteinsschmelzen im Inneren von Planeten und dem Ausbruch von Vulkanen an ihrer Oberfläche liegen komplexe, transkrustale Magmensysteme, die in numerischen Modellen simuliert werden.

## Ein Nationales Geosphären-Observatorium

Für ein quantitatives Verständnis der dynamischen Prozesse im Tiefen Erdinneren und der Erdkruste werden spezifische Beobachtungswerkzeuge benötigt. Das hier vorgeschlagene Observatorium besteht aus in ganz Deutschland verteilten Tiefbohrungen und ermöglicht eine holistische Betrachtung der gesamten Geosphäre. Wie das auch vorgeschlagene Erdoberflächen-Observatorium folgt es der Logik dieses White Papers, ein interdisziplinäres, systemorientiertes Multiparameter-Observatorium für ein zukunftsorientiertes Monitoring und eine Analyse vernetzter Erdsystemkomponenten zu skizzieren.

### Geosphäre beproben und kartieren: Ein Netzwerk wissenschaftlicher Tiefbohrungen

Bisher wurde der geologische Untergrund vor allem für spezifische Nutzungen in begrenzten Regionen exploriert, wie für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe, Extraktion von Erdöl und -gas oder Grundwasser. Da diese in wenigen Regionen bzw. spezifischen Horizonten aufgesucht wurden, bestehen signifikante Wissenslücken für den Großteil der Geosphäre. Vor diesem Hintergrund wird der Aufbau eines innovativen Nationalen Geosphären-Observatoriums in Deutschland vorgeschlagen. Für eine gleichmäßige Datenbasis soll dazu eine große Zahl (ca. 400) an tiefen, gekernten Bohrungen (2–5 km) abgeteuft und der Untergrund mit modernsten Methoden biologisch, chemisch, petrophysikalisch und mineralogisch untersucht und charakterisiert werden. Neben solitären Tiefbohrungen sollen an verschiedenen Orten auch Cluster von Tiefbohrungen entstehen, um höher aufgelöste grundlegende Informationen zu gewinnen. Um den Untergrund gezielt zu kartieren, werden neben vertikalen Bohrungen standortabhängig auch abgelenkte Bohrungen durchgeführt. Durch hydraulische Tests in verschiedenen Horizonten können lokale, auch variierende sowie anisotrope hydrodynamische Eigenschaften bestimmt werden. Zu den Tiefbohrungen sind begleitend flache Bohrungen sinnvoll. Sie sollen zum Monitoring der wassergesättigten Kritischen Zone dienen. So kann die Präkonditionierung dieser oberflächennahen Zone für Verwitterung durch Prozesse in der Tiefe, wie durch Brüche zum Beispiel, auf einzigartige Weise aufgeklärt werden. Durch diesen deutschlandweiten Datensatz können über das reine Beobachten hinaus Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten erfasst werden. So ergibt sich die Möglichkeit, einen digitalen Zwilling (auch „digitaler Schilling“ genannt) des Untergrundes als Grundlage für weitere Planung, Forschung und Nutzung zu erstellen.

### Geosphären-Erkundung: Beobachtungen für ein fundiertes Prozessverständnis

Die Bohrungen werden mit modernster Sensorik (z. B. Seismometerketten, Glasfasersensoren) ausgestattet. Damit werden unter anderem die aktiven instantanen Bewegungen (natürliche und menschenverursachte Seismizität) aufgezeichnet sowie langsame Deformationen erfasst. Die Daten werden in Echtzeit übertragen, und mithilfe klassischer und KI basierter Verfahren ausgewertet. Diese Konzeption ermöglicht die Entwicklung neuer räumlich fokussierbarer seismischer Array-Verfahren unter Berücksichtigung von Phasen-, Amplituden- und Richtungsinformationen. Die erhöhte Empfindlichkeit

## OBSERVATORIUM

aufgrund der Unterdrückung von Oberflächenrauschen in Bohrlöchern ermöglicht insbesondere die Detektion kleiner Erdbeben sowie die präzise Lokalisierung seismischer Ereignisse. Mit komplementären Satelliten-basierten Verfahren werden mittels integrativer Auswertung der Tiefbohrungsdaten die Spannungsentwicklung und das Deformationsverhalten der Erdkruste zeit- und tiefenaufgelöst beobachtet und quantifiziert.

So entsteht ein Geosphären-Observatorium mit der Ausdehnung der Bundesrepublik Deutschland. Durch die große Anzahl räumlich verteilter Sensoren wird der Aufbau der Erde detailliert abgebildet und die heutigen Prozesse in Erdkruste, Erdmantel und Erdkern in einer erheblich höheren Auflösung beobachtet. Durch die Kombination von Einzelbohrungen und Clustern können die Beobachtungen auf spezifische, bisher wenig bekannte Geosphärenbereiche fokussiert werden.

Die Daten aus den Bohrungen werden mit den bestehenden Systemen der geowissenschaftlichen Observatorien und Datenbanken wie Seismologische Observatorien der BGR und der Länder, BFO, GeoLab, World Stress Map, Bodenbewegungsdienste verknüpft. Sie sollen auch mit den in Deutschland angesiedelten Standorten des Erdoberflächenobservatoriums verbunden werden. Für eine globale Abdeckung werden sie mit globalen Netzwerken (Geofon, Global Seismographic Network, ICDP, IOPD) an ausgewählten Standorten außerhalb Deutschlands ergänzt.

Der vorgeschlagene Ansatz ermöglicht ein detailliertes und systemisches Verständnis der dynamischen Erde im Sinne der Theorie komplexer Systeme.

### Aktualität, Relevanz, Innovation und Transfer

Das Nationale Geosphären-Observatorium liefert ein holistisches Verständnis der Interaktionen in der Geosphäre von der Inneren Dynamik (1.1) über Magmatische Systeme (1.5) bis hin zur Biodiversität im Erdsystem (1.3). Dabei werden Georessourcen untersucht, vom „unsichtbaren Wasser“ (2.4), über die Bildung von Wasserstoff (3.5) und mineralischen Rohstoffen (3.1) bis hin zur CO<sub>2</sub>-Reduktion (3.3). Das Observatorium liefert die für eine ökonomisch erschwingliche und sichere Energie- und Rohstoffversorgung erforderlichen hochaufgelösten Informationen zum Aufbau des Untergrundes, zur Seismizität, Entwicklung des Spannungsfelds und dem komplexen Wärme- und Grundwasserfluss. Damit liefert das Vorhaben wesentliche Daten für die ressourcenschonende Bewirtschaftung des Untergrundes und stärkt gleichzeitig den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschland. So können z. B. Gefährdungen durch eine konkurrierende Untertagebewirtschaftung (Geothermie, Rohstoffgewinnung, Energiespeicherung, Wasserversorgung) reduziert und synergetische Lösungen entwickelt werden.

Für das Nationale Geosphären-Observatorium sollen neue Technologien entwickelt und eingesetzt, sowie innovative Nutzungsansätze getestet werden, so in den dynamischen Forschungsfeldern der Geowissenschaften, der KI, der Sensortechnologie und Sensorintegration. Der Wirtschaftsstandort Deutschland wird so durch Innovationen u. a. im Bereich der Bohrtechnik und bei geophysikalischen Dienstleistungen gestärkt, wie vor ca. 30 Jahren, als das Kontinentale Tiefbohrprojekt (KTB) Maßstäbe für eine Untertageforschung gesetzt hat. Heute bilden die damaligen Innovationen das Rückgrat des modernen Bohrlochbergbaus – weltweit.

## Umweltseismologie

Die Umweltseismologie nutzt Informationen, die von zahllosen Quellen permanent als kontinuierliche seismische Signale erzeugt werden. Dazu gehören die Ozeane, die Atmosphäre, aber auch anthropogene Quellen wie Verkehr und Industrieanlagen. Damit unterscheidet sich die Umweltseismologie, die in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat, von der klassischen Erdbebenseismologie. Die genutzten Signale oder Vibrationen werden „Rauschen“ genannt. Die Erkenntnis, dass man mit dem Rauschen quasi permanent – also zeitabhängig – das oberflächennahe Erdinnere abbilden kann, kam einer kleinen wissenschaftlichen Revolution gleich. Die Umweltseismologie hat somit in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Die Umweltseismologie konzentriert sich auf den Einsatz seismologischer Techniken zur Untersuchung und Überwachung der Prozesse an der Erdoberfläche. Es ist ein sich rasant entwickelndes Forschungsfeld, das den Geowissenschaften völlig neue Möglichkeiten eröffnet. So können wir hören, wie Gletscher beim Schmelzen abrutschen und zerbrechen. Wir können auch hören, wie der Boden austrocknet. Wir können zudem vorhersagen, wann und wie Sturzfluten flussabwärts ankommen werden, bevor sie eintreffen. Wir erkennen auch, wie der Untergrund aufgeweicht, wann Erdbeben entstehen und wir können Änderungen der Permafrostgrenzen beobachten.

Dabei spielen auch völlig neue Messtechniken eine zentrale Rolle, welche die klassischen Seismometermessungen ergänzen. Vor allem ist dabei das „**distributed acoustic sensing (DAS)**“ zu nennen. Bei der DAS Methode wird ein für andere Zwecke bereits existierendes Glasfaserkabel genutzt, um die Deformation des Untergrundes entlang der Kabel durch seismische Wellen mit extrem hoher räumlicher Auflösung zu beobachten. Die Kombination der Rauschanalyse mit DAS hat somit enormes Potenzial, klimarelevante Phänomene u. a. im Untergrund zu beobachten. Sogar die Beobachtung von Meeresströmungen und anderen marinen Prozessen mittels transozeanischer Glasfaserkabel steht in Aussicht.

Die Untersuchung von Hintergrundvibrationen der Erde eröffnet noch weitere Möglichkeiten. Nicht nur können wir Phänomene wie die oben genannten in Echtzeit verfolgen. Die Geowissenschaften gewinnen auch wichtige Erkenntnisse über die Ursachen dieser Vorgänge. So z. B. zu Veränderungen in den Untergrundeigenschaften aufgrund von Umweltfaktoren wie Temperatur oder Änderungen im Wasserfluss. Die Schwingungen und Veränderungen im Untergrund können uns Aufschluss über eine Reihe potenzieller Naturgefahren geben, z. B. zum Kalben von Eisbergen, der Dynamik von Gletschern, Magmabewegungen in Vulkanen, Erdbeben, Schneelawinen, Felsstürze, Wirbelstürme oder Sturzfluten. Viele dieser Phänomene sind vom Klimawandel beeinflusst. Somit kann die Umweltseismologie beitragen, Erkenntnisse zur Häufigkeit, Intensität und zum geografischen Auftreten dieser Gefahren durch die sich verändernden Klimabedingungen zu treffen.

Ein interessanter Faktor der Umweltseismologie hat noch völlig unerschlossenes Potenzial. Diese Methodik ist zwar neu, sie baut aber teilweise auf Daten auf, die bereits seit Jahrzehnten existieren. Mit der Methode können wir somit Kenntnisse zur Dynamik von Veränderungen in der Umwelt und ihrer Vergangenheit gewinnen.

Die Umweltseismologie ist eine nicht-invasive und kosteneffiziente Methode, um neuartige Informationen über die dynamischen Prozesse an der Erdoberfläche zu gewinnen. Die Interpretation der Signale erfordert jedoch die interdisziplinäre Zusammenarbeit über die Grenzen der Geowissenschaften hinweg.

## 2. Diagnose und Simulation des Erdsystems und seiner Interaktionen

### 2.1 System Erdkruste

Durch die Plattentektonik wird die Erdkruste ständig unter Spannung gesetzt. Die Reaktion darauf ist komplex nichtlinear und hängt von stofflicher und struktureller Heterogenität ab. Genaue Vorhersagen von Naturkatastrophen wie Erdbeben und Vulkanausbrüchen bleiben deshalb schwierig. Um hier Fortschritte zu erzielen, müssen Prozesse und Systemkomponenten mit hoch aufgelösten Beobachtungen, Datenanalysen mit KI-Methoden und Modellentwicklungen erfasst werden. Daraus können Warnzeichen identifiziert und Frühwarnsysteme optimiert werden.

#### a) Von Naturgefahren und Risiken zu ihrer Antizipation

Plattentektonik steuert Bewegungen, tektonischen Spannungsaufbau und Magmatismus in und auf der Erdkruste. Die Erdkruste selbst ist ein hochkomplexes heterogenes Ensemble aus verschiedenen Mineralen und Gesteinskomplexen. Sie ist charakterisiert durch vielfältige Komponenten, die miteinander verbunden sind und zu nichtlinearem Verhalten neigen. Systeme wie die Erdkruste, die aus zahlreichen miteinander gekoppelten Komponenten bestehen, können sich zu einem kritischen Punkt hin entwickeln. Wenn dieser Punkt erreicht wird, können sie durch nichtlineare Vorgänge sehr rasch ihren Zustand wechseln, wie etwa bei Naturkatastrophen. So wird der mechanische Zustand der Erdkruste etwa durch den Aufbau von Spannung verändert. Auch die Eigenschaften des Gesteins können sich ändern und wirken so auf den Zustand der Erdkruste ein. Maßgebend sind dabei Prozesse wie die Änderung des Porenfluiddruckes im Gestein, des Gesteinsgefüges oder stoffliche Änderungen durch Mineralreaktionen. Bewegt sich das System Erdkruste dabei in die Nähe eines kritischen Punktes, können kleine weitere Veränderungen zur Überschreitung von Schwellenwerten führen und damit z. B. Erdbeben oder schnelle Kriechprozesse (sogenannte „langsame Erdbeben“) ausgelöst werden. Die Komplexität ist erheblich und genaue Vorhersagen über Zeit, Ort und Magnitude von solchen Erdbebenereignissen sind nicht möglich.

**Kritischer Systemzustand.** Die Erdkruste befindet sich global zwar nahe, aber regional unterschiedlich nahe am kritischen Punkt bezüglich der Versagensgrenze. Der genaue Systemzustand ist in der notwendigen Auflösung in Raum und Zeit unbekannt. Dies gilt auch für andere Naturgefahren der festen Erde wie Vulkaneruptionen, Berggrutsche oder Erdfälle. Trotz der Fortschritte in der Beobachtung und im Verstehen von Vorläuferphänomenen in diesen Fällen ist es bis heute unklar, ob es tatsächlich zur Eruption oder zum Abrutschen kommt (z. B. die 2023 erfolgte Vulkaneruption in Island, bei der bis zuletzt nicht eindeutig war, ob sie stattfinden würde). Auch in diesen Fällen sind die durch eine Vielzahl von Prozessen gekoppelten Systemkomponenten der Erdkruste beteiligt, ein komplexes Verhalten zeigen und zum kritischen Zustand in der Erdkruste führen. Diese „selbstorganisierte Kritikalität“ von Erdsystemkomponenten (Infobox Komplexe Systeme) zeigt sich dabei sowohl auf der zeitlichen als auch auf der räumlichen Skala. Sie ist in ihrer Gänze nicht vollständig erfasst. Zahlreiche geologische Prozesse zeigen Skaleninvarianz über ein großes Spektrum (z. B. Erdbeben, Berggrutsche und Deformationsstrukturen), andere dagegen zeigen sprunghafte Verhaltensänderungen bei Skalenübergängen. Dazu gehören insbesondere Prozesse mit Phasenübergängen von einem Aggregatzustand in den anderen, wie etwa bei explosivem Vulkanismus oder bei Bodenverflüssigung durch Erschütterungen. Noch komplexer wird es, wenn ein Ereignis eine Kaskade von Folgeereignissen triggert – so wie beim Erdbeben 2011 in Japan. Aber reicht unser Verständnis von der Skalenabhängigkeit im Erdsystem aus, um sicher zu wissen, auf welchen räumlichen und zeitlichen Skalen wir kritische Systemzustände mit dem Potential für Naturgefahren für den Menschen beobachten müssen?

**Komplexes Systemverhalten.** Die instrumentelle Überwachung des Systems Erdkruste und die Analyse geologischer Archive ermöglichen es heute, Wahrscheinlichkeiten für Orte und Magnituden von Naturgefahren zu benennen. Dazu tragen Fortschritte z. B. bei der seismologischen und geodätischen Erfassung von Deformation und Oberflächen-

bewegungen, der Messung vulkanischer Entgasung oder Änderungen der Chemie von Tiefenwässern oder bei der paläoseismologischen und strukturellen Analyse von Störungssystemen und Sedimentablagerungen bei. Aus diesen Wahrscheinlichkeiten lassen sich praktische Folgerungen (z. B. Bauvorschriften, Frühwarnsysteme) ableiten. Aber auch diese Analysen sind in der Regel auf einzelne Parameter fokussiert, mit denen der Gesamtzustand nur unzureichend charakterisiert ist. Zudem erfolgt die Analyse von Ereignissen in der Regel a posteriori; so werden z. B. nach großen Erdbeben Daten aus der Zeit vor dem Erdbeben ausgewertet und auf mögliche Auffälligkeiten hin untersucht. Solche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich geodätisch beobachtbare Erdoberflächenbewegungen einige Monate vor den großen Subduktionsbeben von Chile (2010) und Japan (2011) nicht nur in ihrer Geschwindigkeit geändert haben, sondern sogar in ihrer Richtung. Wir wissen allerdings wenig darüber, wie diese Umkehrungen in den Erdoberflächenbewegungen entstehen und ob sie wirklich prognostisch sind. Hypothesen verweisen darauf, dass es sich möglicherweise um eine Wechselwirkung zwischen Spannungsveränderungen, Mineralreaktionen und der Freisetzung sowie dem Transport von Fluiden handelt, die unter Druck stehen. Ebenso hat die sehr dichte instrumentelle Multiparameterüberwachung des jüngsten Vulkanausbruchs in Island ein sehr präzises Abbild der Prozesse und des Magmentransportes im Vorfeld des Ausbruchs geliefert (1.5 Magma-Vulkanismus). Dadurch wurde eine entsprechende Frühwarnung der lokalen Bevölkerung ermöglicht. Aber gelten diese beispielhaften Beobachtungen auch für andere Subduktionsbeben, oder für vergleichbare Veränderungen vor starken intrakontinentalen Erdbeben wie 2023 in der Türkei und in Marokko? Und gelten diese Beobachtungen auch für die eher explosiven Vulkaneruptionen an konvergenten Plattenrändern?

## b) Methoden:

Um signifikante Fortschritte beim Antizipieren von Naturkatastrophen zu erreichen, müssen Änderungen im System Erdkruste, die im Zusammenhang mit Naturgefahren stehen, besser erfasst werden. Dies erfordert erheblichen Forschungsbedarf auf allen Feldern, die es ermöglichen, die komplexe Entwicklung des Systems Erdkruste zu kritischen Zuständen hin quantitativ zu erfassen. Diese Felder reichen von der Beobachtung, über die Daten- und Prozess-Analyse bis zur Modellentwicklung. Durch das erworbene Prozessverständnis können Warnzeichen des Systems Erdkruste identifiziert und für die Frühwarnung und Schadensbegrenzung genutzt werden.

**Beobachtung:** Der Systemzustand der Erdkruste muss in möglichst vielen Komponenten über alle Tiefenbereiche sicherer charakterisiert werden als dies bisher der Fall ist. Dazu sind – je nach Thema und Fragestellung – mehr oder weniger dichte und große instrumentelle Beobachtungsnetze mit Multiparameterkomponenten für Langzeitbeobachtungen notwendig (siehe Observatorien). Eine Schlüsselrolle wird die Weiter-, vor allem aber die Neuentwicklung von Beobachtungsmethoden einnehmen. Diese Beobachtungsmethoden werden evtl. als „Game changer“-Verfahren unsere Kenntnisse von stofflichen, physikalischen und kinematischen Eigenschaften und Veränderungen in und auf der Erdkruste skalenübergreifend und quantitativ voranbringen. Datensätze aus diesen Beobachtungsmethoden werden es ermöglichen, aus der Korrelation von gemessenen Messgrößen und ihren Zeitreihen die Eigenschaften, Systemzustände, die Veränderlichkeit und vor allem die Kopplung der Systemkomponenten zu beschreiben. Um ein möglichst zeitskalenübergreifendes Systemverhalten erfassen zu können, müssen solche instrumentellen Beobachtungen durch geeignete geologische Langzeitarchive komplementiert werden. Eine besondere Rolle kommt dabei stets der Identifikation von Warnzeichen zu, die ein bevorstehendes Überschreiten von lokalen Schwellenwerten anzeigen.

**Von Datenanalyse zur Modellentwicklung:** Auf der Grundlage der o. a. Beobachtungen und Zeitreihen lassen sich Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten quantitativ charakterisieren und in geeigneten Stoffgesetzen formulieren. Eine entscheidende Neuerung wird darin liegen müssen, heterogene Datentypen und ihre Zeitreihen auf die Kopplung von Systemkomponenten und ihren Wechselwirkungen hin zu analysieren. Dies ist notwendig, um ein vollständiges Bild eines Systemzustandes der Erdkruste und seiner Entwicklung zur Kritikalität zu erhalten. Wegen der zu erwartenden enormen Datenmengen werden KI-Verfahren hierbei eine Schlüsselrolle spielen („machine learning“, „probabilistic modeling“). Vor allem werden sich so Zusammenhänge und Muster aus Multiparameterdatensätzen identifizieren lassen, unterstützt u. a. durch experimentelle Studien, auf deren Grundlagen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden können (2.4 Data Sciences). Ein wesentliches unterstützendes Element wird die zunehmende Integration von

Konzepten aus der Theorie komplexer Systeme ausmachen (Infobox Komplexe Systeme). Dies ist zum einen eine unverzichtbare Grundlage für die quantitative Bestimmung von Wechselwirkungen und Entwicklungen auf der Zeitachse. Zum anderen ist es auch eine entscheidende Grundlage für die Modellentwicklung, die eine adäquate quantitative Beschreibung umfasst, bis hin zur Entwicklung eines digitalen Zwillings des betrachteten Systems.

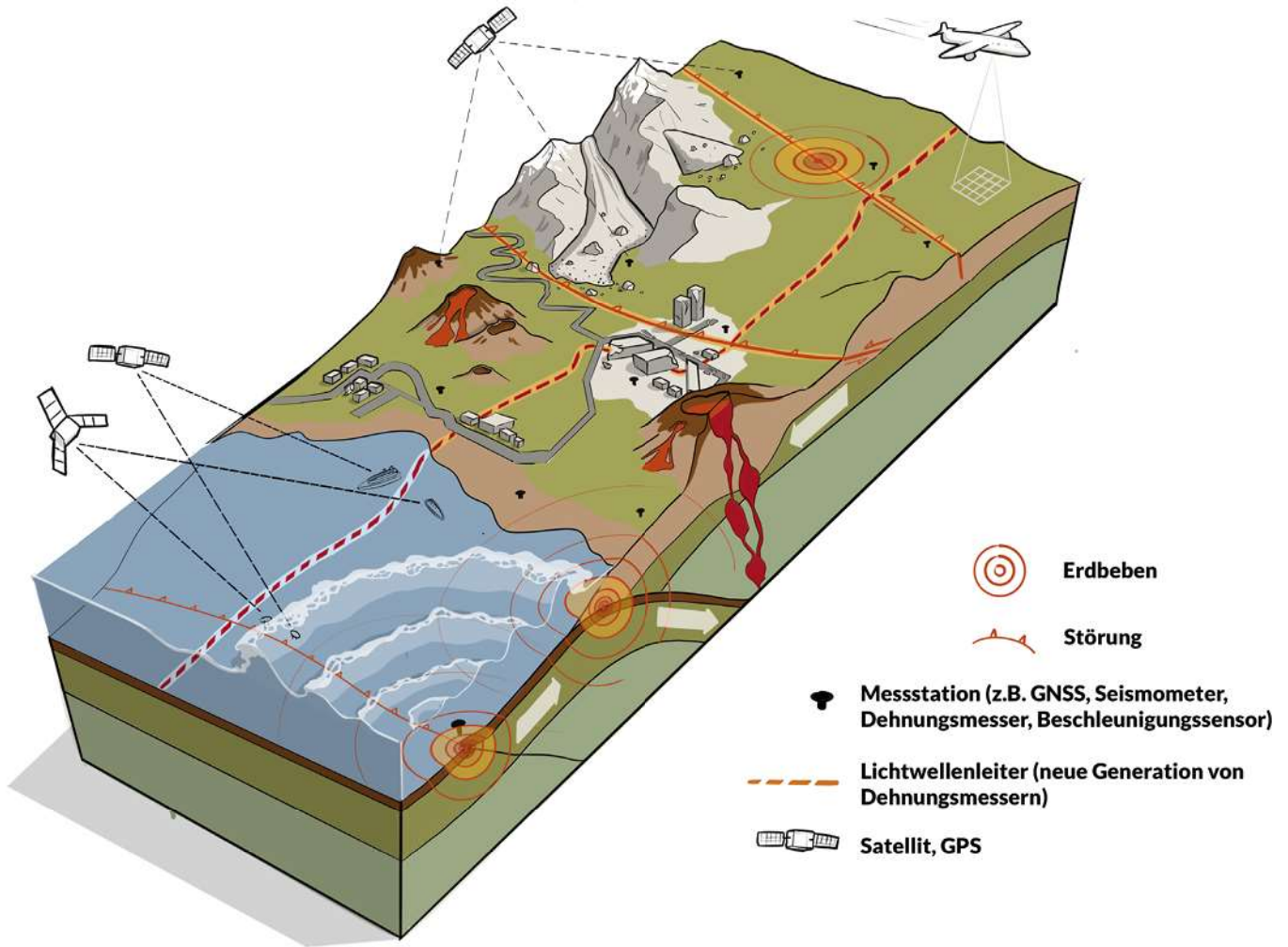
**Antizipation und Systemvorhersage:** Die Modelle müssen sowohl durch instrumentell gewonnene als auch aus Langzeitdaten abgeleiteten kritischen Punkten mit Zustandswechseln gestützt werden (z. B. durch Analyse geologischer Archive). So können wir aus Beobachtungen von Naturkatastrophen Vorstellungen über das Systemverhalten im Umfeld kritischer Zustände entwickeln. Numerische Modellierung – u. a. in Form eines digitalen Zwillings (2.4 Data Sciences) – hat hier eine Schlüsselfunktion zur Stärkung unserer Fähigkeiten, die mögliche zeitliche Nähe zu Naturkatastrophen einzuschätzen. Diese werden einerseits helfen, empirisch gestützte und belastbare Warnsignale zu identifizieren, auf deren Grundlage sich wiederum die Beobachtungssysteme optimieren lassen. Andererseits kann auf dieser Basis die Entwicklung geeigneter Frühwarnsysteme erfolgen, ebenso wie die Optimierung geeigneter Mitigationsmaßnahmen.

### c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Bei größeren Berggrutschen jüngst in den Tiroler Alpen (Fluchthorn, Juni 2023) und in Graubünden (Brienz, Juni 2023) ist wegen der Nähe zur Erdoberfläche eine genaue Überwachung weniger herausfordernd. Doch auch hier sind verschiedene Mechanismen beteiligt, von der niederschlagsbedingten Aufweichung des Untergrundes, des klimaabhängigen Rückganges des Permafrostes als stabilisierendem Faktor, fern-wirkende Auslöser wie Bodenerschütterungen und den Festigkeitseigenschaften der betroffenen Gesteine. Diese Beispiele machen deutlich, dass das System Erdoberfläche wegen seiner engen Interaktion mit dem Klima und dem laufenden Klimawandel eine komplementäre Rolle zum hier beschriebenen System der Erdkruste spielt. Im folgenden Kapitel (2.2 Dynamik der Erdoberfläche) werden diese Aspekte beleuchtet. Insbesondere entsteht auch die Frage, inwiefern die Tektonik-Klima-Interaktion – ein aktives Forschungsfeld seit mehreren Jahrzehnten – in der Lage ist, destabilisierende Wirkungen und kritische Zustände in der Erdkruste zu erzeugen.

### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Das internationale Plattenrandobservatorium IPOC in Chile versucht seit 2007 erste Ansätze dieser Strategie umzusetzen. Weitere Initiativen mit verwandter Ausrichtung sind etwa das International Continental Scientific Drilling Program ICDP und die US-basierte internationale Subduction Zone 4D-Initiative.



Prozesse im Erdinneren treiben tektonische Bewegungen und Stoffumlagerungen an, die bei Überschreiten kritischer Punkte Naturkatastrophen wie Erdbeben und Vulkanausbrüche auslösen können. Mit modernen Überwachungsmethoden und Kenntnis der geologischen Systemzusammenhänge werden Warnsignale für Naturkatastrophen sichtbar.



## Komplexe Systeme

Sogenannte „komplexe Systeme“ zeichnen sich durch Eigenschaften aus, die nicht allein durch die Analyse einzelner Komponenten verstanden werden können. Die multidisziplinäre Theorie komplexer Systeme behandelt die zentrale Frage, wie die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten eines solchen Systems zu kollektivem Verhalten führen. Sie beruht auf mehreren Kernkonzepten: (i) Die **Emergenz** beschreibt das Phänomen, dass größere Organisationseinheiten, Muster und Regelmäßigkeiten ohne einen vorgegebenen Plan durch Interaktionen zwischen kleineren oder einfacheren Einheiten entstehen, die selbst keine solchen Eigenschaften aufweisen (Selbstorganisation; „Das Ganze ist mehr als die Summe der Teile“). (ii) Komplexe Systeme zeichnen sich durch **Nichtlinearität** aus, d. h. kleine Veränderungen in einem Teil des Systems können an anderer Stelle zu unverhältnismäßig großen Auswirkungen führen. Nichtlinearität ist ein Schlüsselmerkmal für das Verständnis von Phänomenen wie Kipppunkten und Phasenübergängen. (iii) Eine wichtige Rolle spielen Rückkopplungsschleifen. Positive **Rückkopplungsschleifen** verstärken kleine Veränderungen und führen zu weiteren größeren Veränderungen und Instabilität bis hin zu Kipppunkten/Phasentransformation, während negative Rückkopplungsschleifen Schwankungen sowie externe Störungen dämpfen und damit Stabilität und Resilienz fördern. In komplexen Systemen dominiert keiner der beiden Rückkopplungs-Typen. (iv) Komplexe Systeme haben die Fähigkeit zur **Adaptation und Evolution**: sie können sich als Reaktion auf ihre Umgebung verändern und weiterentwickeln.

In komplexen Systemen sind oft durch Vielfalt und Heterogenität ausgezeichnete Komponenten in hohem Maße miteinander verbunden, wobei Wechselwirkungen auf verschiedenen Ebenen und Skalen auftreten. Diese Kopplung führt dazu, dass sich die Auswirkungen im gesamten System ausbreiten können, aber nicht unbedingt müssen. Dadurch ist es oft unmöglich, einzelne Komponenten zu isolieren und auch die Auslöser von größeren Änderungen zu identifizieren (sogenannter Schmetterlingseffekt). Komplexe Systeme verfügen auch über die Fähigkeit zur Selbstorganisation, d. h. sie können spontan und ohne äußere Anleitung Muster und Strukturen bilden. Diese gerade das Erdsystem an vielen Stellen charakterisierende Eigenschaft zeichnet sich dadurch aus, dass in erheblichem Umfang Skaleninvarianz besteht – Selbstähnlichkeit über große Skalenbereiche (z. B. Gutenberg-Richter-Gesetz mit seiner skalenübergreifenden Beziehung zwischen Häufigkeit und Magnituden von Erdbeben). Diese Muster und Strukturen bilden oftmals die Grundlage zur Validierung oder Falsifizierung von Modellansätzen. Zudem zeigen solche Systeme eine diffusive Ausbreitung physikalischer Schlüsselparameter (z. B. Stress, Temperatur, Stoff etc.) verbunden mit der Entwicklung hin zu Zuständen, die durch einen Attraktor charakterisiert sind (z. B. kritischer Hangwinkel).

Um Szenarien zu untersuchen und Hypothesen über das Systemverhalten zu testen, werden verschiedene Ansätze verwendet, wie etwa agentenbasierte Modelle oder die Netzwerkanalyse. In den Geowissenschaften ist die Theorie dynamischer Systeme besonders relevant. Sie bietet mathematische Werkzeuge für die Analyse des Verhaltens komplexer, nichtlinearer Systeme im Zeitverlauf. Dieser Ansatz ist nützlich, um stabile Zustände, Oszillationen, chaotisches Verhalten und andere Arten von Attraktoren zu erkennen sowie deren Stabilität und Resilienz zu charakterisieren. Auf diese Weise können Kipppunkte und Regimeänderungen als Bifurkationen mathematisch identifiziert werden, bei denen sich Stabilität und Charakter von Attraktoren qualitativ verändern (z. B. Verlust der Stabilität eines vormals stabilen Systemzustands). In den Geowissenschaften finden sich Anwendungen für die Theorie komplexer Systeme und die beschriebenen Verfahren vor allem in der Klimamodellierung, aber zunehmend auch in der Erdbebenforschung, der Ökosystemanalyse und der Hydrologie.

## 2.2 Dynamik der Erdoberfläche

Die Erdoberfläche reagiert besonders empfindlich auf Änderungen, wenn Schwellenwerte einer der Komponenten der Erdoberfläche überschritten werden. Um diese Schwellenwerte zu erfassen müssen die komplexen Prozesse und Wechselwirkungen im System der Erdoberfläche quantifiziert werden. Diese Quantifizierung kann entweder in Observatorien erfolgen oder in sedimentären Archiven aus der Vergangenheit rekonstruiert werden. So können Rückkopplungsschleifen, Nichtlinearität und emergente Eigenschaften in Modellen unter dem gegenwärtigen Klima- und Biodiversitätswandel vorausgesagt werden.

Kritische Übergänge oder „Kippunkte“ sind Schwellenwerte, an denen sich der Zustand einer Komponente des Erdsystems plötzlich und drastisch ändert, oft als Reaktion auf nur geringfügige Veränderungen der Einflussfaktoren. Die Erdoberfläche hat in ihrer Vergangenheit mehrere solcher kritischen Übergänge erlebt und wird dies auch in Zukunft erfahren. Sie können allmählich oder auch sehr schnell erfolgen (Infobox Komplexe Systeme).

Durch den menschengemachten Klimawandel beschleunigt sich das Tempo der Veränderungen der Erdoberfläche. Temperatur- und Niederschlagsänderungen, Rückzug der Gletscher und Auftauen des Permafrosts gehen mit rapiden Änderungen in der Dynamik der Ozeane einher. Diese Veränderungen beeinflussen die Stoffflüsse von Wasser, Sediment, Gasen und chemischen Elementen. Dabei reagieren diese Flüsse besonders empfindlich an der Erdoberfläche. Dazu gehört die „Kritische Zone“, also die Grenzschicht, die von den Baumkronen bis zur unteren Grenze der verwitterten Gesteinssäule reicht (im Englischen „Critical Zone“ genannt). Auch die Übergänge zwischen Land- und Wasseroberfläche (Meere, Seen) sind empfindliche Grenzflächen. All diese Grenzflächen und -schichten bieten daher die besten Indikatoren für Veränderungen im Systemverhalten der Erde – also für kritische Übergänge zwischen stabilen Zuständen.

### a) Kritische Übergänge erkennen

Aus der geologischen Vergangenheit werden kritische Übergänge immer präziser entschlüsselt. Ein besonders gut charakterisiertes Beispiel, das dem menschengemachten Klimawandel sehr nah kommt, ist die Heißezeit des Paläozän-Eozän-Temperaturmaximums (PETM). Es ereignete sich vor etwa 55 Millionen Jahren als Reaktion auf den plötzlichen Eintrag gewaltiger Mengen von Kohlenstoff in das System Ozean-Atmosphäre. Die Abläufe im PETM konnten mittlerweile durch sorgfältige Anwendung von „Proxies“, also Indikatoren für vergangene Systemzustände, rekonstruiert werden. Den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre bis viele Millionen Jahre zurück in der Erdgeschichte kennen wir aus Verhältnissen der stabilen Borisotope in bis dato unerreichtem Detail. Absolute und relative Datierungsmethoden liefern die genauen Zeitpunkte im PETM. Damals führte eine schnelle globale Erwärmung zu einer Kaskade von Rückkopplungen: Destabilisierung des terrestrischen Kohlenstoffkreislaufs, stark veränderte globale Niederschlagsverteilung und damit der Verwitterung, Artensterben und veränderte Verteilung von Arten, veränderte Ozeanumwälzung und Ozeanchemie. In der Erdgeschichte gibt es weitere Beispiele für derartige Übergänge globalen Ausmaßes. Dazu gehören die Große Sauerstoffanreicherung (Oxygenierung) der Atmosphäre oder die Schneeball-Erde Episoden (nahezu oder vollständige Vereisungen der Erdoberfläche). Außerdem gab es Perioden ozeanischer Anoxia (Sauerstoffentzug), die Öffnung oder Schließung verschiedener Ozeantore (z. B. Drake-Passage, Isthmus von Panama) oder die Übergänge zwischen den Glazialen und Interglazialen im Quartär.

Ein Kippunkt kann überschritten werden und die Veränderung irreversibel sein, wenn positive Rückkopplungen dominieren. Beispiele für solche kritische Übergänge im System der Erdoberfläche sind Gletscher. Schon geringe Veränderungen der Temperatur oder des Niederschlags zusätzlich zu der inneren Dynamik können zu einem kritischen Übergang führen, nach dem der Gletscher schnell anschwillt oder dramatisch schrumpft. In ähnlicher Weise können Änderungen des Sedimentflusses zu einem kritischen Übergang zwischen Ablagerung oder Erosion im Flussbett, sowie zu einer Neuorganisation des Flusseinzugsgebiets führen. Das Überschreiten eines kritischen Schwellenwerts in der Atmosphärentemperatur führt zu drastischen Veränderungen der Ozean- und Atmosphärenzirkulation, was wiederum

Auswirkungen auf das regionale Klima, die globale Niederschlagsverteilung und den Nährstoffkreislauf der Ozeane hat. Die Ökosysteme der Erde reagieren besonders empfindlich auf Veränderung. Eine erhöhte, durch Gesteinsverwitterung hervorgerufene, Nährstoffverfügbarkeit kann aquatische Ökosysteme (entweder Seen oder im Extremfall den gesamten Ozean) antreiben, in alternative stabile Zustände überzugehen. Diese Zustände sind durch niedrige Sauerstoffkonzentrationen und eine Reihe neuer Rückkopplungsschleifen gekennzeichnet.

**Die Erdoberfläche als komplexes System.** Noch fehlt uns die Fähigkeit, dokumentierte kritische Übergänge im Zusammenhang mit komplexen Systemen vollumfänglich zu begreifen oder gar vorherzusagen. Der Schlüssel für die Vorhersage solcher Systemübergänge liegt in der Kenntnis der Stärke der Rückkopplungen, die das System stabil halten, und der nichtlinearen oder verstärkenden Reaktion auf externe Steuerungsfaktoren. Dafür benötigen wir Kenntnisse über die Stoffgesetze, die diese nichtlinearen Zusammenhänge beschreiben, und darüber, wie mehrere Systemkomponenten zusammenwirken. Die Schlüsselfragen sind: (i) Welche Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten machen ein System widerstandsfähig oder sogar besonders empfindlich gegenüber veränderten Einflussfaktoren? (ii) Nähert sich ein System möglicherweise einem kritischen Übergang? (iii) Wie ist ein solches System nach dem Übergang beschaffen? Und (iv) Wie interagieren mehrere Systemkomponenten? Großes Potenzial zur Quantifizierung und Vorhersage der Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen bietet die Anwendung der Theorie komplexer Systeme auf die Prozesse der Erdoberfläche und ihrer Ökosysteme. In einem modernen Forschungsansatz sollte diese Theorie sowie ihre Modellvorhersagen die aufwändigen Kampagnen zur Erzeugung empirischer Daten definieren. Zusätzlich sollten die gewonnenen Daten die Wechselwirkungen und Rückkopplungen an der Erdoberfläche in diesem Systemkontext neu einordnen und antizipieren.

**Diagnose.** Für die Diagnose auf der Grundlage empirischer Daten sind zwei unterschiedliche Ansätze möglich. In Observatorien können wir den aktuellen Zustand eines Systems sowie die physikalisch-chemischen und biologischen Gesetze und Parameter der Interaktion verschiedener Bereiche direkt beobachten: in der kritischen Zone, den Land-Wasser Übergängen sowie am Meeresboden. Die Analyse eines gegebenen Systems mit unterschiedlichen externen Kontrollvariablen (z. B. entlang klimatischer oder topographischer Gradienten) ermöglicht es, die kritischen Übergänge zu erfassen. Dieses Prinzip liegt bereits einigen Erdsystemparametern des Konzepts der „Planetaren Grenzen“ für einen sicheren Handlungsspielraum der Menschheit zugrunde.

Doch selbst die längsten Datensätze aus der Erdbeobachtung reichen nur für einige Jahrzehnte. Sie genügen nicht, um die Dynamik des Systems bei Veränderungen der äußeren Bedingungen (also das Aussetzen der negativen Rückkopplungen, die ein System stabil halten) zu erfassen. Um diese kritischen Schwellenwerte zu erfassen, sind Zeitreihen von externen und internen Kontrollvariablen, die das System charakterisieren, erforderlich. Dafür benötigen wir „geologische Archive“ wie Seesedimente, die sich für die Analyse von Prozessen auf Einzugsgebietsebene eignen und auf einer dekadischen bis tausendjährigen Skala ablaufen. Für ein umfassenderes Verständnis des Erdsystems benötigen wir Ozeansedimente, die bis zu vielen Millionen Jahren zurückreichen.

## b) Methoden

**Überwachung rezenter Prozesse an der Erdoberfläche in terrestrischen Observatorien.** In diesen Erdoberflächen-Observatorien werden Wasser, Sediment, geochemische Flüsse, Verwitterung und Atmosphären- und Bodengase in sich veränderndem Klima und Umwelt erfasst. Idealerweise sollen auch ökologische Systemparameter wie Pflanzen-Biodiversität, Produktivität, mikrobielle Bodengemeinschaften und ökohydrologische Umsätze enthalten sein. Dies kann durch die Verknüpfung bestehender Infrastruktur und die Entwicklung neuer Observatorien in wichtigen, noch nicht ausreichend untersuchten Schnittstellenregionen der Erdoberfläche erfolgen. Für die Erfassung der Kopplung von Prozessen in der kritischen Zone muss der durch Oberflächenprozesse beeinflusste Untergrund miteinbezogen werden.

Um die dreidimensionale Struktur des Untergrundes, die Fließwege des Wassers, die Gesteinsmechanik und die tiefe mikrobielle Biosphäre zu erfassen, sind eine große Zahl flacher Bohrkampagnen, gekoppelt mit geophysikalischer Erkundung des nahen Untergrundes, erforderlich. Neue geophysikalische Überwachungsmethoden (Infobox

Umweltseismologie) versprechen umfassende und relativ einfach zu unterhaltende Überwachungsstrategien. Gekoppelte Messeinrichtungen, die mehreren Disziplinen dienen, sollten im Rahmen von Förderlinien von Großgeräten finanziert werden können (siehe Erdoberflächenobservatorium). Der Themenkomplex Klima- und Umweltwandel bietet sich für diese Förderung an, um große Umwelt- und geologische Gradienten zu erfassen. Diese Förderung soll daher auch Observatorien im Ausland einschließen. Ein wichtiger Aspekt ist die Sicherstellung des nachhaltigen Betriebs dieser Observatorien, deren Datenströme mit zunehmender Betriebsdauer immer größer und vor allem wertvoller werden.

**Analyse vergangener kritischer Systemübergänge anhand sedimentärer Archive.** Zusätzlich zu den traditionellen sedimentologischen und paläoklimatischen Parametern bieten neue biogeochemische Indikatoren (wie organische Biomarker) und Isotopensysteme (z. B. „clumped isotopes“, Metallisotope) neue Möglichkeiten. Von herausragender Wichtigkeit ist die Untersuchung von sedimentären Archiven in Bezug auf analoge Beispiele für die derzeitige kritische Übergangsphase des Anthropozäns. Wir können hier die Vergangenheit wirkungsvoll nutzen, um Kipppunkte in einem gekoppelten Erdsystem und die Auswirkungen ihrer Überschreitung zu identifizieren. Diese können anschließend auf äußere Einflüsse zurückgeführt werden, wie z. B. der Freilegung von Gletschern oder Permafrostflächen, variable Energie aus der Sonneneinstrahlung aufgrund von Orbitalparametern, plötzlicher CO<sub>2</sub>-Eintrag auf die Erdoberfläche und Atmosphäre durch Vulkanismus, oder die allmähliche Entwicklung von Randbedingungen z. B. durch tektonische Plattenbewegungen.

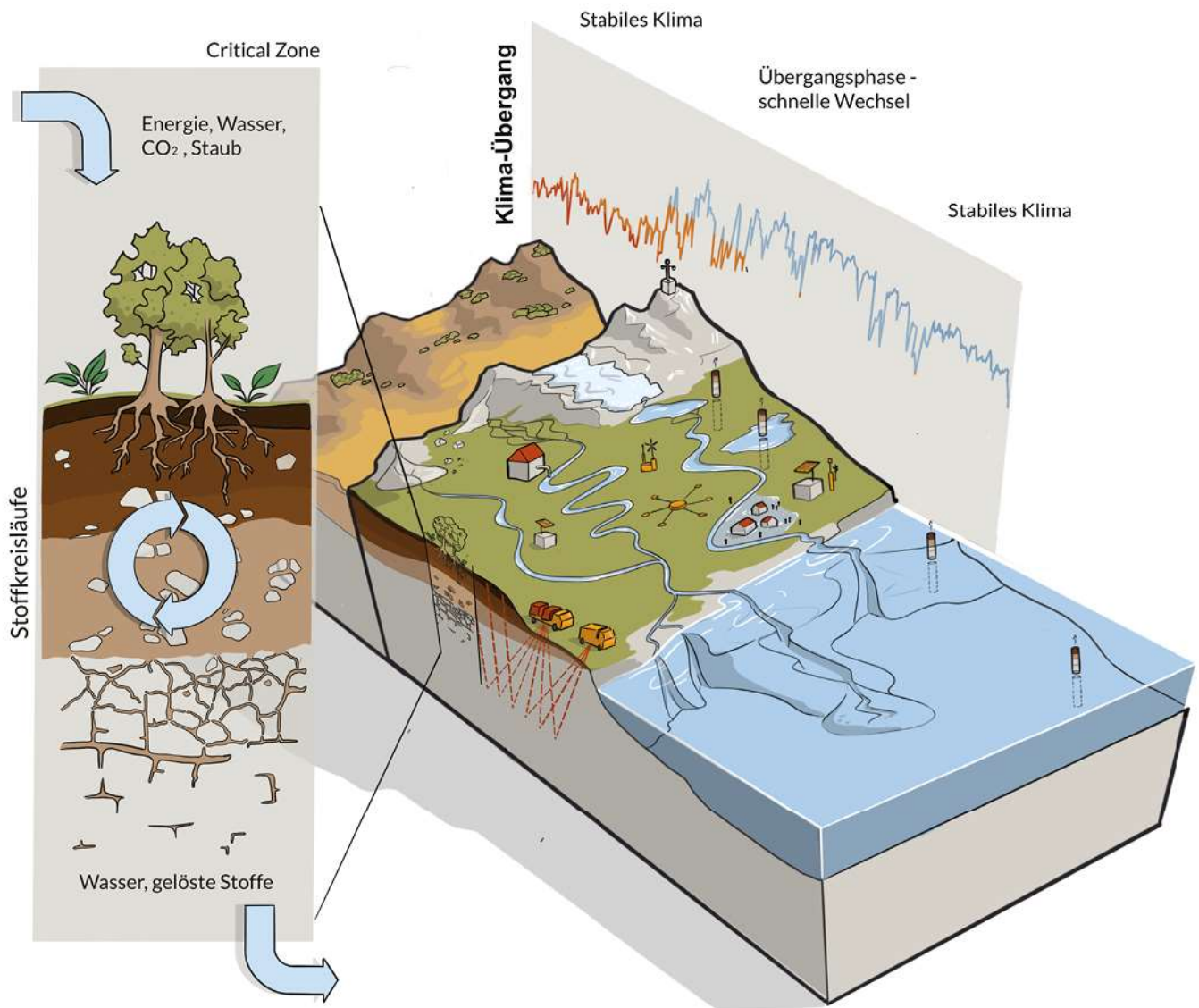
**Modelle.** Die Beobachtungen sollen in Modelle komplexer Systeme einfließen, um Hypothesen zu testen und Vorhersagen zu treffen. Das Design der Messkampagnen soll andererseits auf der Grundlage der Modelle basieren. Diese Modelle können eine große Anzahl von verbundenen Komponenten, die miteinander interagieren, so genau wie möglich darstellen. Sie müssen Rückkopplungsschleifen, Nichtlinearität und emergente Eigenschaften (also solche, die erst durch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten entstehen) simulieren. Bei einigen der betrachteten Systeme handelt es sich um komplexe adaptive Systeme. Solche Systeme zeichnen sich durch die Fähigkeit aus, sich als Reaktion auf Änderung von internen oder externen Bedingungen so zu verändern, dass ihre Funktion erhalten bleibt oder sogar verbessert wird. Dazu gehören z. B. Systeme, die Ökologie mit Landschaftsdynamik verbinden.

### c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Die Theorie der komplexen Systeme wird zunehmend erfolgreich in den Geowissenschaften eingesetzt (Infobox Komplexe Systeme), so auch bei der Analyse von Warnzeichen für beginnende Erdbeben oder Vulkanausbrüche (2.1 System Erdkruste). Überwachungsmaßnahmen für die Stabilität von steilen Berghängen, an denen es zu Hangbewegungen, Felsstürzen und Murgängen kommt, sind für das Management von Naturgefahren und den Katastrophenschutz erforderlich. Veränderte Sedimentflüsse wirken sich auf kritische Infrastrukturen wie Dämme und Brücken, Kraftwerke und das globale Unterwasser-Telekommunikationsnetz aus, und verändern das künftige Hochwasserrisiko (2.3 Unsichtbares Wasser im Erdsystem; 3.4 Urbane Geowissenschaften). Schwankende Sedimentflüsse zwischen Land und Meer (an den terrestrisch-marinen Übergängen) haben erhebliche Auswirkungen auf die Widerstandsfähigkeit von Küstenlandschaften (Deltas, Strände, Dünen, Barriereinseln usw.), tiefmarinen Landschaften (submarine Hänge und Canyons) sowie auf marine Ökosysteme. Insbesondere sind veränderte biogeochemische Flüsse (vor allem der Kohlenstoffkreislauf) ein Schlüssel für Rückkopplungsmechanismen, die das Ausmaß der globalen Erwärmung bestimmen werden.

### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Internationale Beispiele von erfolgreichen Observatorien-Netzwerken mit zentralisierten Datenarchiven sind OZCAR (Observatoires de la Zone Critique) in Frankreich, das Virtuelle Alpenobservatorium VAO und CZNET (Critical Zone Collaborative Network) in den USA. Viele Zeitreihen aus terrestrischen Sedimentabfolgen werden durch das International Continental Scientific Drilling Program ICDP gewonnen. Die PaleoOcean-CO<sub>2</sub> Initiative stellt aktuelle Abschätzungen vergangener Atmosphären-CO<sub>2</sub> Konzentrationen aus Sediment zusammen. Für solche sedimentären Archive sind die Informationen, die aus Ozeansedimenten gewonnen wurden (insbesondere im Rahmen des Integrated Ocean Drilling Program IODP und seiner Vorläufer) von beispiellosem Wert. Allerdings wird dessen hauptsächliche Bohrplattform – die JOIDES Resolution – 2024 in den Ruhestand versetzt. Die Zukunft der internationalen Meeresbohrungen ist somit ungewiss.



Wechselwirkungen zwischen Gestein, Klima und Biosphäre werden an der Erdoberfläche in Observatorien erfasst. Vergangene Übergänge von einem stabilen Zustand dieser Wechselwirkungen in einen anderen werden mit Proxy-Messungen an Sedimentkernen ermittelt.

## 2.3 Unsichtbares Wasser im Erdsystem

Der Wasserzyklus der Erde ist durch vielfältige Wechselwirkungen mit anderen Teilen des Erdsystems verbunden und leistet unerlässliche Dienstleistungen für die menschliche Zivilisation. Durch den Klimawandel und andere menschliche Eingriffe verändert er sich heute in noch nie dagewesener Geschwindigkeit und Ausmaß. Der weit größte und für den Menschen unsichtbare Speicher des Wassers befindet sich im Untergrund und reagiert gedämpft auf diese Änderungen. Die Beschreibung der Wechselwirkungen des Wasserkreislaufs durch numerische Modelle erfordern deshalb hochentwickelte und neuartige Beobachtungsinfrastrukturen.

Wasserflüsse und Wasserspeicher sind unerlässlich für die Versorgung mit Trinkwasser, zur Nahrungsproduktion und zum Erhalt von Ökosystemen. Viele Interaktionen und Stoffflüsse im Erdsystem sind eng an den Wasserkreislauf gekoppelt. Dazu gehören die Nährstoffaufnahme durch Vegetation, die Gesteinsverwitterung, Bodenbildung und Erosion, und damit global die Regulierung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs.

Allerdings sind rund 99 % des nicht gefrorenen Süßwasservolumens nicht direkt für den Menschen sichtbar. Sie befinden sich als Bodenwasser und vor allem als Grundwasser im Untergrund. Grundwasser reagiert mit unterschiedlichem zeitlichem Versatz auf klimatische Veränderungen und dämpft diese oft ab. Besonders auf großen Skalen sind die Wechselwirkungen mit diesem unterirdischen Wasserspeicher ein noch nicht ausreichend erforschtes Element zu den Interaktionen zwischen Wasser, Erde, Menschen und Klima. Die Verbindung dieses unterirdischen Speichers zur Erdoberfläche bis hin zur Atmosphäre ist die „Critical Zone“, die „Kritische Zone“ (2.2 Dynamik der Erdoberfläche). In dieser Zone findet eine Vielzahl von Prozessen statt: Wassertransport und -speicherung im Boden, Gesteinsverwitterung und ein Großteil des terrestrischen Kohlenstoffkreislaufes durch Vegetation und Bodenbiota.

### a) Grundwasser – der gestresste Dienstleister

In einem noch nie dagewesenen Ausmaß und Tempo verschieben menschliche Aktivitäten, die zur Änderung des Klimas oder der Landnutzung führen, den Wasserkreislauf. Wetterextreme, die immer öfter über das hinausgehen, was wir aus historischen Messungen ableiten können, führen zu immer häufigeren schweren Überschwemmungen, Erdbeben und Dürren in einer vom Menschen geprägten Landschaft. Eine ganzheitliche Betrachtung der Rolle des Wassers im Erdsystem, als auch die Erkennung und Überwachung von anthropogenen Veränderungen des Wasserkreislaufs, ist daher dringend erforderlich. Die gesamte kritische Zone ist heute durch Klimaveränderungen starken Herausforderungen ausgesetzt und durch menschliche Aktivitäten wie Abholzung oder Urbanisierung massiv verändert.

Die Qualität des Grundwassers ist für seine Nutzbarkeit entscheidend. Die oberen Grundwasserstockwerke wurden in vielen Regionen durch menschliche Aktivitäten wie die Düngung landwirtschaftlicher Flächen, das Versickern von Abwässern oder ölbasierter Stoffe großflächig und für lange Zeit verschmutzt. Tiefere Grundwasservorkommen, die häufig eine eher geringe anthropogene Verschmutzung zeigen, können geogene Stoffe enthalten, die für Menschen schädlich sind, wie Arsen oder hohe Salzgehalte. Auf globaler Skala und in Bezug auf das Erdsystem ist die Grundwasserqualität eine neue Forschungsfront, die wir erst seit kurzem konsequent bearbeiten.

Heute sind die Geowissenschaften dringend aufgerufen, innovative Daten, Modelle und integrierende Methoden zu entwickeln. Insbesondere in interdisziplinärer Zusammenarbeit, die auch die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften einschließt, sollen solche Modelle und Methoden entwickelt werden. Diese sind eine Voraussetzung, um das quantitative, skalenübergreifende und robuste Systemverständnis zu entwickeln, das unsere Gesellschaft zur Sicherung der nachhaltigen Verfügbarkeit der Ressource Wasser benötigt. In diesem Forschungsbereich entwickelt sich aktuell eine außergewöhnliche Dynamik, die darauf abzielt, Wissenslücken zu schließen, Skalen bis zur kontinentalen Dimension zu überbrücken und Unsicherheiten in unseren Vorhersagen und Projektionen zu reduzieren.

Doch die Datenerhebung, Modellierungen und Projektionen von hydrologischen Prozessen im Untergrund sind oft mit signifikanten Unsicherheiten behaftet. Vor allem über größere Skalen und in Ländern mit weniger entwickelter Forschungs- und Monitoring-Infrastruktur zeigen sich solche Unsicherheiten. Dies gilt vor allem für tieferes Grundwasser, aber auch für die Wechselwirkungen zwischen oberflächennahem Grundwasser, Flüssen und Seen. In Deutschland selbst steht nur ein Teil der existierenden Daten für die Forschung zur Verfügung. Die unterirdische Wasserspeicherung in der Landschaft und deren Dynamik wurden noch nicht kontinuierlich in ihrer Gesamtheit abgebildet. Das Konzept der kritischen Zone soll genau diese Lücke schließen. Die integrierte und quantitative Betrachtung dieser Systemzusammenhänge erfordert innovative, interdisziplinäre Beobachtungen und integrative Modelle zu zentralen Fragen.

**Die Verteilung von Wasser in der Kritischen Zone.** Die Verteilung ist von lokalem Klima, Topographie, Pflanzenbewuchs, Geologie, Bodeneigenschaften, und Art des Grundwasserleiters abhängig. Wasserverfügbarkeit wird durch Speicherkapazitäten und -dynamik im Untergrund und durch Wasserverluste (Evapotranspiration, Oberflächenabfluss) beeinflusst. Zusätzlich sind in der kritischen Zone zahlreiche Rückkopplungen aktiv: der Untergrund verändert sich, wenn Wassertransport chemische Reaktionen und Mineralneubildung auslöst. Dies ist vor allem in Karstgebieten, also Regionen aus Karbonatgesteinen, der Fall. Auch das Wasser selbst, insbesondere die chemische Zusammensetzung, verändert sich auf dem Weg durch den Untergrund. Niederschlagsmenge und -intensität steuern das Pflanzenwachstum. Hier verbindet sich der Wasserzyklus eng mit dem Zyklus der chemischen Elemente: in der Verwitterungszone nehmen Pflanzen und die mit ihnen verbundene Mikrobiota (Bakterien) und Pilze (z. B. Mykorrhiza) mineralische Nährstoffe auf. Diese werden direkt aus dem Untergrund aufgenommen oder, je nach Verfügbarkeit, in einem faszinierenden Kreislauf oftmals viele Dutzende Male wiederverwertet. Aus diesen vielfältigen Interaktionen entsteht eine grundsätzliche Herausforderung: mit wenigen, gezielten Beobachtungen müssen viele dieser Faktoren in einer 3D Architektur durch hydrologische Modelle parametrisiert werden. Daraus können wir die verschiedenen unterirdischen Wasser- und Stoffflüsse quantifizieren.

**Änderungen im Grundwasser der davon abhängigen Dienstleistungen.** Bisher haben wir zu den Änderungen und der Erneuerung des Grundwassers sehr ungleichmäßig verteilte Messungen und Modelle. Zumindest auf großen Skalen sind diese noch nicht hinreichend belastbar. Für ein großräumiges quantitatives Verständnis müssen wir hochauflösender und umfänglicher messen und erfassen, wie, wann und mit welcher Rate sich Grundwasser erneuert – was auch neuer Messmethoden bedarf. Zusätzlich müssen wir hydrologische Dienstleistungen, wie die Entnahme zur Bewässerung oder den Zugang von Vegetation zum Grundwasser und dessen zeitliche Dynamiken präziser quantifizieren. Dazu braucht es öffentlich verfügbare Datensätze, organisierte Messkampagnen und letztendlich skalenübergreifende Konzepte und Modelle, die es ermöglichen, quantitative Vorhersagen zu treffen, die auch den Menschen und seine Aktivitäten einschließen.

Messkampagnen und Modelle müssen auch küstennahe Grundwasserkörper betrachten, da diese besonders durch Bevölkerungswachstum und Meeresspiegelanstieg beeinflusst werden. Hohe Entnahmen aus küstennahen Grundwasserleitern führen zum Aufstieg der Süßwasser-Salzwasser-Grenze und damit zur zunehmenden Versalzung des Grundwassers. In Regionen aus schwach konsolidierten Sedimenten aus kleinsten Gesteins- und Mineralfragmenten, beispielsweise großen Flussdeltas, kommt es durch übermäßige Wasserentnahme zu Bodensenkungen. Dadurch nimmt die Küstenerosion und Überflutungsgefahr zu. Die Dynamik dieser Prozesse ist gerade in geologisch heterogenen Gebieten und unter sich ändernden Randbedingungen noch unzureichend verstanden. Ein relativ neues Forschungsgebiet sind küstennahe Grundwasservorkommen unter dem Meer, also offshore, deren Vorkommen und Dynamik noch kaum bekannt sind. Auch küstennahe Karstgrundwasserleiter mit teils großen submarinen Karstquellen spielen in vielen Regionen eine wichtige Rolle, beispielsweise im Mittelmeerraum.

**Schadstoffe** können Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte im Grundwasser verweilen. Wann sich solche Schadstoffe in Förderbrunnen zur Trinkwasserversorgung bemerkbar machen, ist eine Frage von großer Wichtigkeit. Zersetzungsraten von Stoffen werden durch die chemischen Verhältnisse im Grundwasser und im Gestein bestimmt. Insbesondere in der Diskussion um „Ewigkeitsschadstoffe“ (PFAS und andere) wird die Rolle des Grundwassers sowie der Transport- und

Abbauprozesse entscheidend für die Qualität der Wasserversorgung sein. Wir brauchen ein skalenübergreifendes Verständnis, wo welche Stoffe im Grundwasser transportiert werden und welche Grundwasserkörper in Zukunft in ihrer Nutzung beeinträchtigt werden können.

## b) Methoden

Für die Quantifizierung der Wechselwirkungen des Grundwassers sind skalenübergreifende Datensätze und Beobachtungen erforderlich. Zunächst besteht die Notwendigkeit, große, auf regionaler Ebene bereits vorhandene Datensätze z. B. aus Grundwassermessstellen national zu sammeln und harmonisiert niedrigschwellig der Forschung nach FAIR Kriterien zur Verfügung zu stellen. Zudem könnte das große Potential geochemischer Daten (z. B. stabile und Radioisotope) gerade bei großskaligen Betrachtungen genutzt und mit regelmäßigem Monitoring ausgebaut werden. Daraus können wir integrierte Informationen zu Fließ- und Speicherverhalten im Grundwasser gewinnen. Neue Fernerkundungsdatensätze, wie die der Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission (im Orbit seit Dezember 2022) liefern globale Messungen von hydrologischen Dynamiken in viel höherer Auflösung als bisher möglich. Dadurch komplementieren sie bestehende Messungen, z. B. von GRACE-FO. Die oben genannten verschiedenen Skalen können auf diese Weise überbrückt werden.

**Sozio-hydrologische Modelle.** In gleicher Weise vermögen Modelle diese verschiedenen Skalen abzubilden. Regionale Systembeschreibungen integrieren bestehende Daten mit hydrogeologischem Expertenwissen und müssen überregional weiterentwickelt werden. Komplementäre großskalige und globale Modelle haben sich in den letzten Jahren aus ihrem Nischendasein zu immer zentraleren wissenschaftlichen Instrumenten entwickelt. Mit diesen können bisher verborgene Prozesskopplungen über große Skalen hinweg studiert werden – z. B. wie der Grundwasserzugang die Resilienz von Vegetation bestimmt. Eine besondere Herausforderung sind Karstregionen. Während in porösen Grundwasserleitern klassische numerische Modelle gut anwendbar sind, stellt die großskalige Quantifizierung von Wegsamkeiten und Grundwasserflüssen in Karstgrundwasserleitern eine Herausforderung dar. Die Wasserversorgung in Karstregionen ist besonders auf Grundwasser angewiesen, da dort meist kein Oberflächenwasser verfügbar ist. Modelle, die physikalisches Prozessverständnis, geophysikalische Bildgebung und geologische Informationen des Untergrunds mit KI kombinieren, sind noch in der Anfangsphase. Allerdings zeigen sie jetzt schon Ergebnisse, die mit traditionellen Modellen vergleichbar sind. Ihre Nutzung wird Einfluss darauf haben, welche Informationen, und damit welche Messungen wir benötigen, um Vorhersagen präzise zu treffen (2.4 Data Sciences). Zusätzlich muss das menschliche Handeln in die Modelle integriert werden. Sozio-hydrologische Modelle – die z. B. die Interaktion von menschlichem Handeln und Auswirkung auf Ressourcen unter Klimawandel simulieren – liefern heute bereits entscheidungsrelevante Informationen. So können u. a. zukünftige globale Risikogebiete frühzeitig identifiziert werden.

**Beobachtungen mittels Observatorien.** Für die 3D-Erkundung der kritischen Zone mitsamt des Grundwassers sind der Aufbau und Langzeitbetrieb von Observatorien unabdingbar (Erdoberflächen Observatorium). Diese sollten jeweils ein ganzheitliches Systemverständnis anstreben, sich aber auch unterscheiden in a) Grundwasser; b) Gestein; c) Topographie/Tektonik; d) Klima; e) Vegetation bzw. Landnutzung, und f) Boden. Die Heterogenität der kritischen Zone bestimmt die Anzahl der Observatorien sowie die notwendige Mischung aus temporären und langfristigen Beobachtungen. Genauso offen ist die Frage, inwiefern uns „large samples“ von Grundwasserdaten, die meist für Monitoring-Zwecke erhoben wurden, gerade auf großen Skalen wissenschaftlich weiterhelfen können. Die 3D-Struktur und damit die hydrogeologische und ökohydrologische Charakterisierung der Wasserflüsse in der kritischen Zone kann heute durch flache (ca. 100 m) Bohrungen ermittelt werden. Durch oberflächennahe Geophysik (Seismik, Magnetotellurik) können diese zu einem kontinuierlichen Bild verbunden werden. Ähnliches gilt für die wasserführende Struktur (bis 300 m Wassertiefe) des küstennahen Untergrundes. Stabile- und Radioisotope des Wassers eröffnen neue Möglichkeiten in der quantitativen Zuordnung von Wasserquellen- und Wasseralter, von Ursprungsräumen des Wurzelwassers und zeitlichen Dynamiken in der Pflanzenwasseraufnahme. Außerdem liefern stabile Isotope der metallischen Elemente wertvolle Fingerabdrücke der Nährstoffzyklisierung. Eine neue Klasse reaktiver Transportmodelle der Reaktionen und Gestein/Wasser-Wechselwirkung im Untergrund kann einerseits durch diese Beobachtungen kalibriert und andererseits als Prognoseinstrument eingesetzt werden.

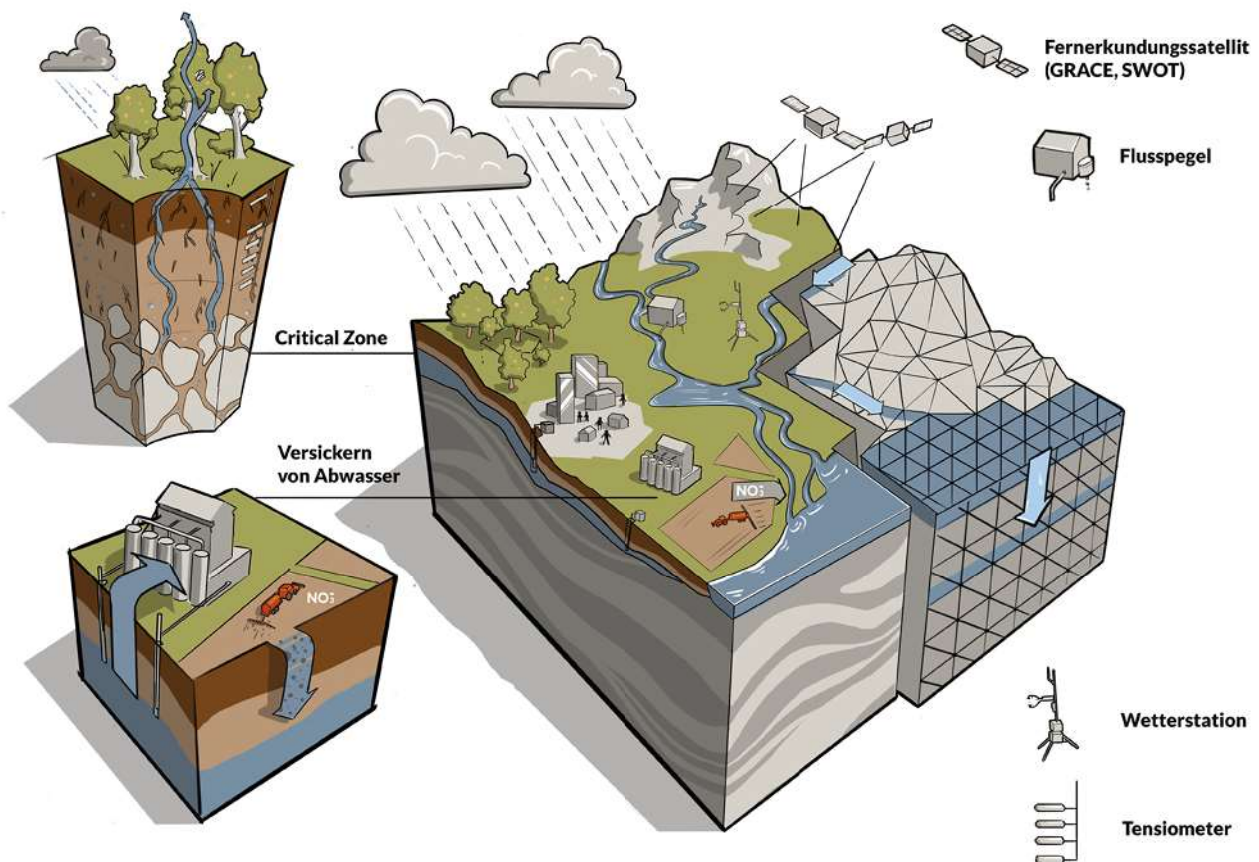


**c) Schnittstellen zu anderen Bereichen**

Das Thema Grundwasser ist eng verzahnt mit der 2.2 Dynamik der Erdoberfläche, Bodenbildung und Bodenschutz, Nutzung flacher geothermischer Energie im städtischen Raum (3.4 Urbane Geowissenschaften), Endlagerung hochradioaktiver Stoffe, Untergrundspeicherung (Infobox Nutzung des Untergrundes) und CO<sub>2</sub>-Bindung (3.5 CO<sub>2</sub> Entnahme). Außerdem ist der Themenkomplex relevant für Rohstoffe aus supergenen Metallagerstätten (3.1 Mineralische Rohstoffe) und die 3.2 Bildung von Natürlichem Wasserstoff. In fernerer Zukunft könnte dieses Wissen auch für die Erforschung von Wasser auf dem Mars relevant werden (1.4 Kryosphären).

**d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

In der Kritischen Zone werden gesamthaft, also in Hinblick auf geologische Beschaffenheit des Untergrundes, die Wasserflüsse, Ökohydrologie und Gasflüsse mit langen Datenreihen ermittelt. Ein solches Netzwerk auf EU-Ebene ist eLTER – Integrated European Long-Term Ecosystem, critical zone and socio-ecological, in Frankreich OZCAR und in den USA CZNet (2.2 Erdoberfläche). Auch in Indien und China entstehen zahlreiche solcher Observatorien. Großskalige hydrologische Daten werden in Großbritannien in Bezug auf Dürren und Hochwasser erhoben (Floods and Droughts Research Infrastructure; FDRI). Ähnliche Daten werden auf globaler Ebene durch GroMoPo (Groundwater Model Portal) bereitgestellt. Die International Atomic Energy Association IAEA stellt globale Isotopendaten zur Verteilung und Alter von Wasser zusammen. Die US National Science Foundation fördert derzeit RTM-HUB ein Training-Netzwerk für reaktive Transportmodelle.



Der hydrologische Zyklus auf und unter der Erde, seine Vermessung in Observatorien und aus dem Weltraum und die Erfassung der Interaktionen im numerischen Modell.

## 2.4 Künstliche Intelligenz, Big Data und numerische Simulation in den Geowissenschaften

Die systematische Erfassung von geo-bezogenen Informationen durch moderne Erdbeobachtungssysteme und -sensoren führt zu zunehmend großen Datenmengen. Aufgrund dieser Big Data Charakteristika, können sie nicht mehr manuell ausgewertet werden, sondern müssen automatisch aufbereitet und analysiert werden. Die konsequente Umsetzung der FAIR Prinzipien, die Entwicklung von Hardware- und Softwarekompetenzen und die geschickte Verbindung von Simulationen mit künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen sind sowohl Voraussetzung als auch Gegenstand aktueller Forschung.

### a) Erdsystem beobachten, Datenschätze heben und Zusammenhänge finden

Eine zentrale Herausforderung der modernen Geowissenschaften besteht darin, die Gesetzmäßigkeiten, die die Interaktionen komplexer Systeme steuern, zu erkennen. Interaktionen des Erdsystems sind häufig nicht-linear und beinhalten Rückkopplungen, die sowohl scheinbar stabile Gleichgewichte als auch abrupte Übergänge in andere Zustände hervorrufen können. Die mathematische Formulierung dieser Wechselwirkungen auf Basis empirischer Daten wird zusätzlich durch die gleichzeitige Interaktion mehrerer Systemkomponenten erschwert.

Um diese Herausforderung zu bewältigen, werden in den Geowissenschaften seit langem Simulationsverfahren genutzt. Mithilfe großer numerischer Modelle werden Vorhersagen über Prozesse im Erdinneren, Materialeigenschaften auf der Mikroskala sowie das Erdklima in Vergangenheit und Zukunft ermöglicht.

Eine bedeutende Neuerung der letzten zwei Jahrzehnte ist die Entstehung gewaltiger Datenmengen durch Observatorienetzwerke und Satelliten, die in Echtzeit und hoher räumlicher Auflösung sowie globaler Abdeckung verfügbar sind. Hinzu kommen die immer größer werdenden Datenmengen, die aus hochauflösenden Simulationsrechnungen resultieren.

Das volle Potenzial dieser Daten auszuschöpfen, um theoretische Systemzusammenhänge zu erkennen, übersteigt jedoch die bisherigen Möglichkeiten der Datenanalyse. Die Kombination von Modellierung und Geodatenanalyse ermöglicht es uns nun, Verbindungen zwischen den Systemkomponenten in bisher ungekanntem Ausmaß zu entschlüsseln. Künstliche Intelligenz (KI) kann aus großen Datensätzen und Signalen die vielfältigen stofflichen und kinematischen Eigenschaften analysieren und Muster finden. Wissensgraphen ermöglichen die Integration heterogener Datenquellen wie geodynamischer, hydrologischer oder geomorphologischer Daten, wodurch weitere Zusammenhänge erkannt werden können, die auf Kopplungen und gesetzmäßige Beziehungen hinweisen. Von elementarer Bedeutung ist dabei, die inhärenten Unsicherheiten zu quantifizieren und über die gesamte Prozesskette zu propagieren, um zu zuverlässigeren, systemischen Modellen zu kommen.

### b) Methoden

**Bereitstellung von Daten.** Die Daten liegen hochgradig verteilt vor. Daher müssen sie so aufbereitet und abgelegt werden, dass sie eine Selbstbeschreibung aufweisen und somit automatisch gefunden werden können. Hierfür stehen die sogenannten FAIR Prinzipien („Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability“). Relevant ist insbesondere das in diesem Akronym für Interoperabilität stehende „I“. Aktuelle Daten werden typischerweise direkt digital erfasst – dies trifft jedoch nicht für historische Datenquellen zu, die in unterschiedlichen Formen archiviert sind. Falls sie in analoger Form vorliegen, müssen sie digitalisiert werden, um sie mit aktuellen Daten in Zusammenhang bringen zu können. Insgesamt liegt die Herausforderung vor allem darin, Daten (automatisch) zu interpretieren, d. h. mit Semantik bzw. mit aussagekräftigen Kontext in Form von Metadaten zu versehen. Ein Beispiel hierfür sind historische Kartendaten, die vielfach zwar schon digitalisiert, aber nicht im Sinne semantischer Strukturen interpretierbar sind. Ein reiner Zugriff auf die Daten führt jedoch noch nicht zu Erkenntnisgewinn. Dafür müssen die Daten zunächst aufbereitet und die Möglichkeit geschaffen

werden, sie bezüglich neuer Fragestellungen zu analysieren und mit anderen Daten verknüpfen bzw. in Zusammenhang stellen zu können. Dies beinhaltet auch intelligente und intuitive Nutzerschnittstellen und Visualisierungsmöglichkeiten, um den kreativen wissenschaftlichen Prozess unterstützen zu können.

**Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz.** „Künstliche Intelligenz (KI)“ bzw. „maschinelles Lernen (ML)“ findet in den Geowissenschaften verstärkten Einsatz. Die prominentesten Anwendungen sind im Bereich der Erkennung von Objekten in Bilddaten, des Erkennens von Signalen oder Strukturen in verrauschten Daten (ähnlich der Spracherkennung) und der Detektion von Korrelationen in multidisziplinären Daten. Dazu gehört auch die Entwicklung von ML-basierten Systemen, welche hocheffizient physikalische Zusammenhänge reproduzieren (ähnlich der Simulationstechnik). Die Analyse riesiger Datenmengen mit probabilistischen Ansätzen des ML ermöglicht ein Erlernen der inhärenten Struktur. Dies kann uns helfen, eine Vielzahl geowissenschaftlicher Prozesse hypothesengetrieben zu interpretieren und in einen Systemkontext einzuordnen. Eine besondere Herausforderung der kommenden Jahre ist die Adaption verfügbarer Algorithmen auf geowissenschaftlich-relevante Fragestellungen. Dabei ist vor allem die Notwendigkeit, das bereits bestehende Wissen über physikalische Zusammenhänge in die ML-Ansätze zu integrieren. Die Datenlage (Volumen, Komplexität) hängt dabei stark vom geowissenschaftlichen Bereich ab. Im Falle unzureichender Beobachtungen erlauben das Transfer-Lernen und die „Domänenanpassung“ (die Anwendung eines Algorithmus, der in einer oder mehreren „Quelldomänen“ trainiert wurde, auf eine andere aber verwandte „Zieldomäne“) die Übertragung von gelernten Modellen auf andere Bereiche. Weiterhin bergen neue Ansätze wie die Nutzung großer generischer KI-Modelle, sogenannte „Foundation Models“, vielversprechendes Potenzial. Dieses Potenzial kann nur gehoben werden, wenn es als Gemeinschaftsaufgabe in den Erdsystemwissenschaften begriffen wird. Eine Voraussetzung dafür ist die durchgängige Vorbereitung wissenschaftlicher Daten auf einen automatisierten Zugriff („AI-Readiness“). Im Spezialfall von „Large Language Models (LLM)“ besteht die Möglichkeit, den oben erwähnten Kontext wissenschaftlicher Daten automatisiert aus dem bereits vorliegenden Textbestand der Geowissenschaften abzuleiten. Gemeinschaftlich aufbereitete und zur Verfügung gestellte Benchmark-Datensätze speziell für den geowissenschaftlichen Bereich helfen, den erfolgreichen Einsatz von ML-Techniken weiter voranzubringen und zu verbessern. Wichtig sind hier standardisierte Dokumentationen der Trainingsverfahren und die Bereitstellung von Trainingsdaten sowie der daraus erzielten KI-Modelle. Somit kann die für die Wissenschaft notwendige Nachvollziehbarkeit und Transparenz gesichert werden. Technologisch besteht die Herausforderung, Algorithmen und Verfahren zu entwickeln, die geeignet sind, auf neuen Rechnerarchitekturen, z. B. Quantencomputern, implementiert zu werden. Insgesamt sollte angestrebt werden, diese Fragestellungen in Kooperation mit Experten aus der Informatik bzw. den Datenwissenschaften anzugehen. Dieses kann beispielsweise im Rahmen von gemeinsam organisierten Konferenzen und Workshops erfolgen.

**Wissensgraphen.** Um das relevante Domänenwissen in den Geowissenschaften strukturiert und explizit nutzbar zu machen, ist seine Modellierung erforderlich. Dies kann über „Ontologien“, also einer standardisierten Terminologie für einen Wissensbereich, erfolgen. In Form von Wissensgraphen sind diese mit konkreten Dateninstanzen verknüpft und stellen somit eine symbolische Repräsentation des Wissens dar. Der Vorteil ist, dass diese Strukturen sowohl vom Menschen als auch von Maschinen verstanden und genutzt werden können. Neue Methoden auf dem Gebiet der Netzwerkanalyse haben zu effizienten Algorithmen geführt, durch die die Erstellung komplexer semantischer Strukturen inzwischen automatisiert werden kann. Dennoch gibt es vielfältige Herausforderungen. Sie reichen von der Modellierung des Wissens in geeigneten Strukturen, über die automatische „Instanziierung“ von Datenquellen (d. h. die Erzeugung individueller, konkreter Objekte, wofür sich Lernverfahren eignen), bis hin zur Nutzung von Wissensgraphen für die Analyse und Datenfusion. Eine vielversprechende Forschungsrichtung besteht in der Kopplung von Neuronalen Netzen mit Wissensgraphen (etwa über „Retrieval Augmented Generation (RAG)“, um explizites und implizites Wissen zu verbinden. Das würde ermöglichen, explizites Kontextwissen als Randbedingung in den Lernprozess mit einzuführen. Die Repräsentation und durchgehende Modellierung der inhärenten Unsicherheiten stellen zudem eine für die wissenschaftliche Nutzung wesentliche Herausforderung dar.

**Digitale Zwillinge für das Erdsystem.** Die enorme Komplexität des Erdsystems in seiner Gesamtheit erlaubt in absehbarer Zeit realistischere Digitale Zwillinge bestenfalls für immer besser definierte Subsysteme der Erde. Beispiele sind die Interaktion zwischen Atmosphäre und Ozeanen, die Dynamik des Erdinnern (Mantelkonvektion), die Eigenschaften von Geomaterialien, oder die Entwicklung von seismisch aktiven Verwerfungszonen. Herausforderung ist, eine Verknüpfung dieser Subsysteme über Disziplingrenzen dort zu ermöglichen, wo sie Sinn macht und Erkenntnisgewinn wahrscheinlich ist. Dazu gehören u. a. die Integration von Datenassimilation, den Umgang mit multiplen Skalenübergängen, hybride Modellierung, „Machine Learning“ in Verbindung mit kausaler Inferenz.

**Simulationsverfahren und High Performance Computing (HPC):** Die Simulation komplexer, oft nichtlinearer physikochemischer Prozesse und Interaktionen des Erdsystems wird immer mehr die Basis für den Fortschritt des Erdsystemverständnis und der Vorhersage zukünftiger Entwicklungen. Simulationstechnik geht Hand in Hand mit der Analyse riesiger, multidisziplinärer Datenmengen, bei der Methoden der künstlichen Intelligenz, vor allem das maschinelle Lernen, immer stärker zum Einsatz kommen. Dadurch werden Parameter geschätzt, durch „Feature Extraktion“ die Komplexität der Modelle reduziert, oder mit geeigneten neuronalen Netzen die Rechenzeit bei der Simulation hochdimensionaler Modelle reduziert. Diese Bereiche erfordern Expertise und enge Kooperation mit dem Bereich des Höchstleistungsrechnen („HPC High Performance Computing“). HPC bezeichnet die Verwendung leistungsfähiger Computeranlagen (z. B. Höchstleistungsrechner, GPU Cluster) zur Lösung komplexer wissenschaftlicher Probleme mit der Erfordernis von hochentwickelten, effizienten, skalierbaren Programmen. Trotz enormer Fortschritte gibt es viele offene Fragen: Wie können wir die Genauigkeit von Vorhersagemodellen verbessern? Wie können wir die riesigen Datenmengen aus Erdbeobachtungen und -simulationen effizient verarbeiten? Wie können wir unsere Simulationscodes auf die gerade entstehende Generation von Exascale-Rechnern vorbereiten? Und wie können wir die Zusammenarbeit zwischen Forschenden aus verschiedenen Disziplinen fördern, um ein besseres Verständnis der Erde und ihrer Prozesse zu erlangen?

Die Zukunft der geowissenschaftlichen Forschung hängt entscheidend von der Lösung dieser Herausforderungen ab. Durch die geschickte Verbindung von HPC-Simulation mit KI-Verfahren können wir neue Einsichten in die Dynamik der Erde und anderer Planeten gewinnen. So können wir bessere Vorhersagen für Naturkatastrophen und Klimaänderungen treffen und nachhaltige Lösungen für die Zukunft unserer Erde entwickeln. Aber es erfordert (bisher nicht geleistete) Investitionen in die qualifizierte Aufbereitung und Bereitstellung wissenschaftlicher Daten und die Entwicklung und nachhaltige Pflege hochkomplexer wissenschaftlicher Software. Darüber hinaus bedarf es einer konsequenten Umsetzung der Transformation hin zu offener Wissenschaft, um Daten, Software und KI-Modelle für die wissenschaftliche Nachnutzung breit zur Verfügung zu stellen.

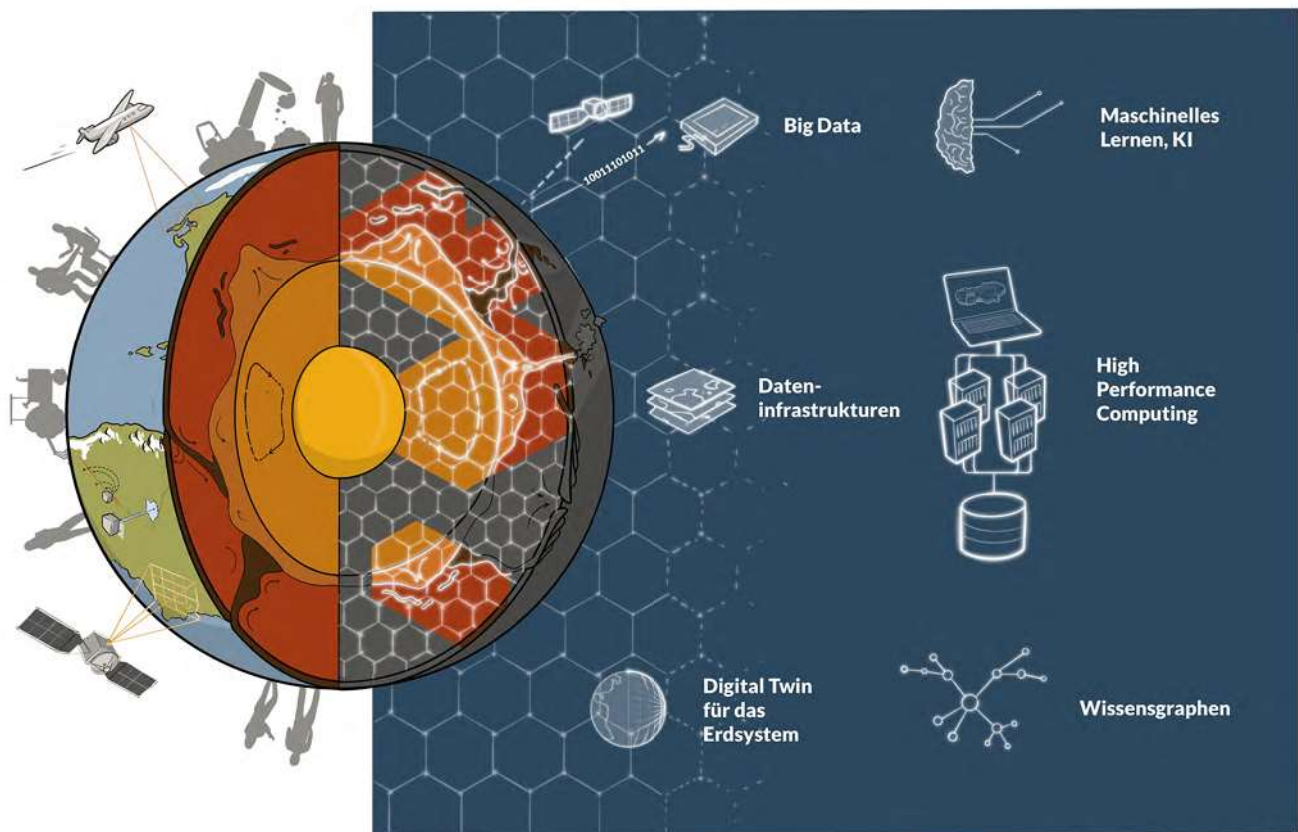
Nicht zuletzt bedingt es auch, Softwareentwicklungskompetenzen in der Ausbildung der nächsten Generation von Erdsystemwissenschaftlerinnen stärker zu verankern. Mit der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur NFDI entsteht eine Dachorganisation für das Forschungsdatenmanagement in allen Wissenschaftszweigen, und für die Geowissenschaften insbesondere der NDFI4Earth. Ein neues Programm der DFG unterstützt außerdem die Entwicklung von Forschungssoftwareinfrastrukturen und kann somit zu deren Nachhaltigkeit beitragen.

### c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Digitalisierung und automatische Auswertung sind für zahlreiche Themen und Fragestellungen in der Erdsystemforschung relevant und essenziell. Insbesondere dort, wo Observatorien und Erdbeobachtung große Datenmengen in Echtzeit erfassen (so in 2.1 System Erdkruste, 2.2 Dynamik der Erdoberfläche oder 3.4 Urbane Geowissenschaften) entwickeln sich die Geowissenschaften schnell zu „Big Data Sciences“. Das Potential von KI-Verfahren zur Interpretation dieser Daten wurde schon früh erkannt; in den Materialwissenschaften werden heute KI-Methoden benutzt, um Materialsimulationen mit gemessenen Struktureigenschaften zu verknüpfen (3.3 Geoinspirierte Materialien). Überall dort, wo sich Kompartimente der Erde dynamisch durch Feedbacks verbinden (so auch in magmatischen Systemen, 1.5 Magma-Vulkanismus) oder im Wasser-Klima Kreislauf, (2.4 Unsichtbares Wasser) werden diese nichtlinearen Interaktionen zunehmend einem Hypothesentest bestehend aus Big Data, numerischer Simulation und KI unterzogen werden.

#### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Verschiedene europäische Konsortien befassen sich mit der Entwicklung von Geocomputing Verfahren- und Anwendungen. „Destination Earth“ hat zum Ziel, mittels Beobachtung und Simulation einen digitalen Zwilling der Landoberfläche, Meer, Atmosphäre, Biosphäre und der menschlichen Eingriffe zu entwickeln. Ein digitaler Zwilling für GEO-physikalische Extreme (DT-GEO) ist ein europäisches Projekt, das die Analyse und Vorhersage der Auswirkungen von Tsunamis, Erdbeben, Vulkanen und anthropogener Seismizität zum Ziel hat. Schließlich ist vor wenigen Jahren das Projekt „TREX: the European Center of Excellence in Exascale Computing“ gestartet, das ein HPC System auf europäischer Ebene in Kollaboration von Wissenschaft und HPC Stakeholdern entwickelt. Parallel dazu zielt das ChEESA-Projekt darauf ab, ein Center of Excellence im Bereich der Geowissenschaften zu etablieren und 10 Community-Flaggschiff-Europäische Codes für HPC vorzubereiten. Es fokussiert sich auf geowissenschaftliche Herausforderungen durch die Entwicklung von Pilotdemonstratoren zur Bewertung von Georisiken und der Verbesserung von Frühwarnsystemen.



Mit verschiedenen Komponenten der modernen Datenwissenschaften können Big Data aus Geo-Observationssystemen genutzt werden, um Hypothesen zu testen und komplexe Interaktionen in Subsystemen der Erde Prozessen zuzuordnen.

## Ein Erdoberflächen Observatorien-Netzwerk zur Diagnose gekoppelter Prozesse

Für die Auflösung von Prozessen und Kopplungen der Geo-, Pedo-, Hydro-, Atmo- und Biosphäre in Echtzeit wird hier ein integriertes Netzwerk von geographisch verteilter Erdoberflächen-Observatorien im In- oder auch Ausland vorgeschlagen. In diesen sollen Stoff- und Energieflüsse kontinuierlich überwacht werden. Wie auch das vorgeschlagene Geosphären-Observatorium mit Fokus auf das tiefere Erdinnere und die Erdkruste folgt es der Logik dieses White Papers, ein interdisziplinäres, systemorientiertes Multiparameter-Observatorium als Beispiel für ein zukunftsorientiertes Monitoring vernetzter Erdsystemkomponenten vorzuschlagen.

### Quantifizierung von Landformen und Transport von Sediment

Die Quantifizierung der Produktion und des Transports von Sediment sollte in ausgewählten Flusseinzugsgebieten erfolgen (2.2 Dynamik der Erdoberfläche). Die Standortauswahl der Erdoberflächen-Observatorien sollte folgende Kriterien erfüllen. Sie sollen: (i) in einem hohen Maße von Klima- und Umweltwandel betroffen sein, (ii) zahlreiche vertikale Interaktionen zwischen Atmosphäre, Vegetation, Boden, Gestein und Grund- wie Oberflächenwasser zeigen, (iii) hohe laterale geochemische, Sediment- und Energieflüsse aufweisen, die nicht-linear auf Klima- und Umweltwandel reagieren und (iv) idealerweise die längerfristige Rekonstruktion der Sedimentdynamik durch Ablagerungen in einem Sedimentablagerungsraum ermöglichen. Beispiele solcher Benchmark-Systeme sind alpine/voralpine Einzugsgebiete, die heute einem starken Wandel der Kryosphäre und Biosphäre unterliegen, was zu einer starken Zunahme der Sedimentationsraten führt. Ebenso zählen Grenzflächen zwischen terrestrischen, fluvialen, limnischen und marinen Systemen wie z. B. Küsten, Feuchtgebiete oder Flussauen dazu. In den vorgeschlagenen Observatorien müssen sich verschiedene Messungen verzahnen. Geomorphologischer Wandel wird durch wiederholte hochaufgelöste Kartierungen der Landoberfläche verfolgt. Der Fluss von Sediment wird an Pegelmessstationen (über Jahrzehnte) und durch kosmogene Nuklide (über Jahrtausende) ermittelt. Geochemische Reaktionen in der Landoberfläche werden durch Messung gelöster Stoffe und deren Isotope mit dem hydrologischen Wasserfluss und in den Wasserspeichern nachverfolgt. Die Struktur des oberflächennahen Untergrundes und der Verwitterungszone und deren Änderung können aus wiederholten oberflächennahen geophysikalischen Messungen rekonstruiert werden. Diese Änderungen können ohne kontinuierliche Überwachung nicht vollständig charakterisiert und quantifiziert werden (Geosphären Observatorium). Ziel ist auch eine vollständige Erfassung der Interaktionen mit der Bodenmikrobiota, sowie von Inventaren der Arten von Tieren und höheren Pflanzen, ihrer Häufigkeit und Diversität. Diese stehen in Wechselwirkung mit Verwitterung und Sedimenttransport. Ihre Diversität hängt selber vom Grad der Verwitterung und damit der Nährstoffverfügbarkeit ab (1.3 Biodiversität im Erdsystem).

### Bestimmung der Wasserflüsse und -Speicher

Die Observatorien sollen gleichzeitig die Flüsse von Wasser an der Oberfläche messen und die Flüsse und Speicher des „unsichtbaren Wassers“ im Untergrund erfassen (2.3 Unsichtbares Wasser). Hier bestehen enge Wechselwirkungen zwischen Pflanzenwachstum, Infiltration und Transpiration. Der Wasserfluss wiederum steht in Wechselwirkung mit Gesteinsverwitterung und Prozessen im Boden, die durch Vegetation beeinflusst werden. Die Struktur des Untergrundes kontrolliert die Wasserinfiltration in die Grundwasserspeicher. Wasserflüsse sind somit an vielen Rückkopplungsmechanismen beteiligt. Für deren Quantifizierung sind eine große Zahl an Instrumenten notwendig. Niederschlagsradar und -pegel, Abflusspegelmessstationen, Grundwassermessstellen, Bodenfeuchte Sensornetzwerke und Neutronendetektoren, Depositionssammler, Tensiometer, Xylemflusssensoren an Bäumen bis hin zu Schwerefeldsatelliten (wie GRACE-FO) sowie flache

## OBSERVATORIUM

Bohrungen, in denen zunächst die Beschaffenheit und Struktur des Untergrundes ermittelt wird und die dann als Grundwasser-Messstationen ausgerüstet werden.

Die Landesämter betreiben kontinuierliche Monitoring-Programme vieler hydrologischer und Umweltparameter. Jetzt sind systematische Anstrengungen für eine harmonisierte Datenerfassungs- und Archivierungspolitik (gemäß den FAIR-Grundsätzen) erforderlich. Eine solche Integration wurde von der Allianz der Forschungsorganisationen für terrestrische Umweltforschung bereits gefordert (2018), aber aufgrund mangelnder Harmonisierung oder Koordination zwischen Standorten, Überwachungsnetzen und Akteuren der terrestrischen Umweltforschung und -beobachtung nicht in die Praxis umgesetzt.

### Innovation

Um diese fachübergreifenden methodischen Verbindungen für die Identifikation neuer Zusammenhänge zu nutzen, bestehen mehrere aktuelle Herausforderungen: Der Einsatz von KI zur Analyse von großen Datensätzen aus verschiedenen geophysikalischen, hydrologischen und Fernerkundungs-Quellen kann Prognosen verbessern und erlaubt unter geeigneten Umständen die Formulierung KI-basierter Hypothesen über mögliche Systemkopplungen. Miniaturisierte, kostengünstige Sensoren, die in der Lage sind, verschiedene Parameter in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu messen, finden zunehmend Anwendung, insbesondere in schwer zugänglichen oder gefährlichen Gebieten. Hierzu zählen ferngesteuerte Luftfahrzeuge (UAVs, auch bekannt als Drohnen), die flexible und kostengünstige Möglichkeiten zur Erfassung geophysikalischer und geomorphologischer Daten bieten. Sie können mit verschiedenen Sensoren ausgestattet werden, um detaillierte Karten verschiedener Parameter (z. B. Topographie, Vegetationsdynamik, Temperatur) zu erstellen und geophysikalische Anomalien zu detektieren. Gradienten in den Umweltbedingungen stellen die Fokuspunkte für die Untersuchung von Sediment- und Wassertransport dar. Der virtuelle Zusammenschluss verschiedener Observatorien (Verwitterung, Sediment-Produktion, Hydrologie) könnte diese widersprüchlichen Anforderungen auflösen. Gleichzeitig sollte ein synergetisches internationales Netzwerk von Beobachtungssystemen geschaffen werden.

### Aktualität, Relevanz und Innovation

Im Gegensatz zu Labor- oder Modellversuchen ermöglicht das integrierte Erdoberflächen Observatorium die Beobachtung des Erdsystems und der Wechselwirkungen zwischen Kompartimenten. Die Erstellung numerischer Simulationsmodelle ist auf solche Abgleiche mit Prozessdaten der Interaktionen im Erdsystem angewiesen. Die folgenden gekoppelten Prozesse werden gemeinsam beobachtet: die Dynamik des Transports fester Stoffe (wie durch Erosion, siehe 2.3 „Dynamik der Erdoberfläche“); die Flüsse und der Speicher von Wasser (siehe 2.4 „Unsichtbares Wasser im Erdsystem“); und die damit verbundenen biologischen Interaktionen. Aufbauend auf das von der Helmholtz Gemeinschaft betriebene TERENO Observatorienetzwerk (Terrestrial Environmental Observatories) mit Schwerpunkt auf den Wasser- und Atmosphärogaskreislauf sowie Landnutzung, wird hier eine weitergehende Integration der Prozessbeobachtung der auf die Erdoberfläche wirkenden Systemkomponenten vorgeschlagen. Dazu gehören Zeitreihen aus Sedimentablagerungen. Das vorgeschlagene Observatorium umfasst die Komponenten der „Critical Zone Observatorien“ im weitesten Sinne, fokussiert an jeweils einem Standort.

Die simultane Beobachtung dieser Vielzahl von gekoppelten Parametern des Erdoberflächensystems wird ein Kernelement sein, um die Reaktion der Umwelt auf den menschengemachten Klimawandel zu ermitteln, einschließlich seinem Einfluss auf veränderte Ökosysteme und die Auslösung von Naturgefahren.

## 3. Lösungen bereitstellen und Handlungsoptionen eröffnen

### 3.1 Mineralische Rohstoffe im System Erde

Die Umstellung der Wirtschaft auf regenerative Energiequellen, die Zunahme der Weltbevölkerung, sowie das wirtschaftliche Aufstreben der Länder des globalen Südens haben eine massive Zunahme des Bedarfs an mineralischen Rohstoffen zur Folge. Wege zur Erschließung dieser Ressourcen müssen jetzt auch in Europa und Deutschland entwickelt werden. Dazu gehören innovative Technologien zur wirtschaftlichen, sicheren sowie sozial- und umweltverträglichen Rohstofferkundung, -gewinnung und -aufbereitung und auch der Bergbaunachsorge. Dazu muss die Forschung interdisziplinär die Interaktionen mit der Hydro-, Bio- und Atmosphäre sowie den Menschen einbeziehen.

#### a) Die Struktur der Erdkruste wird die menschliche Zivilisation auch in Zukunft beeinflussen

Zum Einhalten der globalen Ziele des Klimaschutzes müssen die Energiesysteme der Zukunft den weltweiten Energiebedarf ohne Treibhausgasemissionen decken. Neue industrielle Produkte werden Alltag in unserem täglichen Leben werden und unsere Gesellschaft in noch ungeahnter Art und Weise verändern. Beide Entwicklungen sind auf mineralische Rohstoffe angewiesen: natürlich vorkommende Minerale und Gesteine, oder Produkte, die aus solchen gewonnen werden. Häufig sind diese Rohstoffe bei geodynamischen und geochemischen Prozessen in der Erdkruste so angereichert worden, dass sie heute in Lagerstätten abbaubar sind.

Mineralische Rohstoffe sind seit langer Zeit integraler Bestandteil der Entwicklung menschlicher Zivilisationen. Die Gewinnung und Verarbeitung von Bronze und Eisen trugen bereits vor über 4.000 Jahren zur Beschleunigung des technologischen Fortschritts und der Entwicklung prosperierender Gesellschaften bei. Die Menge an essentiellen Rohstoffen ist heute jedoch ungleich größer. Viele Minerale und Gesteine sind wichtige Rohstoffe geworden. Mehr noch: der größte Teil aller natürlich vorkommenden Elemente wird inzwischen in diversen Formen technologisch genutzt. Wir befinden uns in der Zeit des Periodensystems. Viele der im 21. Jahrhundert in den Fokus gerückten Rohstoffe wie z. B. Germanium, Indium, die Seltenen Erdelemente, Lithium oder Kobalt werden inzwischen in verschiedenen Schlüsseltechnologien verwendet. Sie sind für die erfolgreiche Umsetzung der globalen Energiewende unabdingbar geworden. Auch Bausand für neue Infrastruktur und als Bestandteil von Beton ist eine der wichtigsten und mittlerweile eine der knappsten Ressourcen.

Die Gewinnung vieler mineralischer Rohstoffe geht mit invasiven Eingriffen in die Natur einher. Manche Rohstoffe sind überdies in Ländern konzentriert, in denen die Gewinnung teilweise unter menschenunwürdigen Bedingungen stattfindet. Zudem nimmt die Qualität mineralischer Lagerstätten stetig ab und Abbautiefen nehmen zu. Die Erschließung einer Lagerstätte ist häufig ein langwieriger Prozess, der im globalen Durchschnitt momentan etwa 15–20 Jahre benötigt, Tendenz steigend. All diese Trends erzeugen gewaltige und weitgehend ungelöste wissenschaftliche, wirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen. Es werden daher innovative Lösungsansätze benötigt, die die Lagerstättenexploration und umweltschonende Gewinnung der enthaltenen Minerale voranbringen.

Wo liegen die Herausforderungen? Rohstoff- und Energiebedarf werden sowohl durch die Energie- und Verkehrswende im globalen Norden als auch durch die weltweite gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung, insbesondere die des globalen Südens, erhöht. So wird eine Zunahme der Weltbevölkerung auf bis zu 10 Milliarden Menschen im Jahr 2080 sowie eine Verdoppelung der globalen Wirtschaftsströme bis 2050 prognostiziert. Herkömmliche Herangehensweisen wie z. B. Recycling, Substitution, und Effizienzsteigerungen können diesen steigenden Rohstoffbedarf nicht ansatzweise decken. Dies hat (sozial-)ökologische, gesellschaftliche, aber auch geopolitische Auswirkungen. Wie kann zum Beispiel eine ausreichende und verlässliche Versorgung der europäischen Wirtschaft sichergestellt werden? Welche Auswirkungen wird eine Gewinnung ansteigender Mengen mineralischer Rohstoffe (selbst bei innovativer Substitution) und die Freisetzung der damit einhergehenden Emissionen von Treibhausgasen und Umweltstoffen



auf das Erdsystem als Ganzes haben? Wie können diese zunehmenden Auswirkungen auf das Erdsystem und damit auf die Menschen gemindert werden?

Mineralische Rohstoffe sind Wirtschaftsgüter. Ihre Erkundung und Gewinnung unterliegt grundsätzlich Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Letztere wiederum werden stark von technologischen und geopolitischen Entwicklungen beeinflusst. Technologisch nutzbare und gesellschaftlich akzeptierte Methoden zur Erkundung und Gewinnung mineralischer Rohstoffe müssen daher in Zukunft weit über die klassische Lagerstättenkunde hinausgehen. Diese betrachtet mineralische Lagerstätten primär als geologische Anomalien einer durch geodynamische Prozesse gebildeten Erdkruste. Heute hingegen wird eine fächerübergreifende, systemische Betrachtung mineralischer Rohstoffe im Kontext der Wechselwirkungen mit dem Erdsystem und der Gesellschaft benötigt. Eine solche Herangehensweise sollte die relevanten Interaktionen mit der Hydro-, Bio- und Atmosphäre sowie den Menschen einbeziehen und mittels interdisziplinärer Methoden integrieren.

**Neue Wege der Rohstoff-Bewirtschaftung beschreiten.** Eine sichere Rohstoffversorgung ist eine wesentliche Voraussetzung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit Europas und Deutschlands. Aufgrund jahrhundertelanger Bergbauaktivitäten sind leicht auffindbare und erschließbare Lagerstätten vieler mineralischer Rohstoffe, insbesondere von Metallen, in Deutschland jedoch fast nicht mehr vorhanden. Dies hat verschiedene Gründe. Zum Teil sind die Lagerstätten bereits ausgebeutet, oder Erze, die in der Vergangenheit wirtschaftlich waren, sind unwirtschaftlich geworden. In den 1990er Jahren ließen niedrige Rohstoffpreise sowie steigender gesellschaftlicher Druck in Hinblick auf ökologische Aspekte die Nutzung und Erkundung unattraktiv werden. Bei der Versorgung mit metallischen Primärrohstoffen ist Deutschland daher fast vollständig von Importen aus dem Ausland abhängig. Auch in der EU – obwohl nicht rohstoffarm – können Bergbau und Recycling den gesamten Rohstoffbedarf auf absehbare Zeit wahrscheinlich nicht decken. Der im Jahr 2023 erlassene „European Critical Raw Materials Act“ trägt dieser Analyse Rechnung. Er sieht für die EU perspektivisch vor, dass von den als „kritisch“ bzw. „strategisch“ eingestuften Rohstoffen der jährliche Bedarf zu 10 % aus Gewinnung in der EU, 40 % aus Verarbeitung in der EU und mindestens 15 % aus Recycling in der EU stammen sollen. Diese Herausforderungen benötigen sowohl innovative als auch wirtschaftliche Lösungsansätze.

**Fehler der Vergangenheit vermeiden.** Heute wendet sich die Rohstoffwirtschaft zunehmend neuen Horizonten im Bereich der metallischen Rohstoffgewinnung zu. Beispiele sind die Gewinnung durch gezielten Einsatz von Mikroben oder in den vielfach unerforschten Tiefenbereichen der Ozeane. Die ökologischen Folgen solcher Vorgehensweisen sind jedoch weitestgehend unbekannt. Gemäß der wenigen Informationen, die wir über die ökologischen Netzwerke der Tiefsee haben, könnten diese Umweltauswirkungen erheblich sein. Negative Auswirkungen auf die Umwelt gibt es potenziell bei jeder Art der Rohstoffgewinnung, auch an Land. Daher müssen sowohl die mit wachsendem Bedarf einhergehenden Herausforderungen bewältigt werden als auch gleichzeitig die (sozial-)ökologischen Kosten von Exploration, Gewinnung und Bergbaunachsorge adäquat eingepreist werden. Eine solche gesamtheitliche Betrachtung mineralischer Rohstoffe ist inhärent multidisziplinär und umfasst Akteure mit unterschiedlichen Interessen. Solch zukunftsweisende Betrachtung ist gerade auch vor einem weiteren Hintergrund angemessen: die Gewinnung der Rohstoffe soll aus verlässlichen sowie menschenrechtlich und umwelttechnisch unbedenklichen Quellen erfolgen. Deutschland und Europa stehen hier vor der Herausforderung, aber auch der Chance, konkurrenzfähige Optionen im Umgang mit mineralischen Lagerstätten zu entwickeln.

**Vorausschauend planen.** Beim Aufbau europäischer Kapazitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette wird auch die Schließung von Bergbaustandorten und die Bergbaunachsorge zunehmend wichtiger werden. Um negative Umweltauswirkungen der Gewinnung mineralischer Rohstoffe als Ergebnis der Energiewende zu minimieren und die gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen, ist eine positive Folgeperspektive mit ökonomischen Chancen für die betroffenen Landschaften und Regionen unabdingbar. Eine umfassende Betrachtung mit enger Einbindung aller relevanten Interessensgruppen ist daher erforderlich. Dabei ist eine Reihe von Aspekten von maßgeblicher Bedeutung: auf der einen Seite die naturgerechte Rekultivierung und Renaturierung der genutzten Flächen nach Ende der Rohstoffgewinnung, auf der anderen die Sicherheit der in der Umgebung lebenden Menschen hinsichtlich z. B. Stabilität von Rückhalte- und Speicheranlagen und der Qualität des Grundwassers.

Um die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Bergwerken und Tagebauen über den gesamten Lebenszyklus besser gestalten zu können, müssen diese Aspekte von Beginn der Planung an und über die gesamte Betriebszeit hinweg berücksichtigt werden. Neue Forschungs- und Entwicklungsansätze ergeben sich z. B. bei der Charakterisierung der naturräumlichen Gegebenheiten und Potenziale der für den Rohstoffabbau vorgesehenen Fläche im Hinblick auf Ökosystemleistungen, die über die Nachsorge der Bergbauflächen gesellschaftlich nutzbringend sein könnten. Neue Forschungsfragen ergeben sich ebenso bei der Charakterisierung von Sekundärlagerstätten (Halden und Absetzanlagen) und der Entwicklung geowissenschaftlicher Methoden zur wirtschaftlichen, sicheren und umweltverträglichen Rohstoffaufbereitung. Entscheidend wird sein, ob das gesellschaftliche Umfeld für den Abbau mineralischer Rohstoffe auch in dicht besiedelten Gebieten wie in Deutschland in einem Dialog erreicht werden kann. Unabdingbar sind transparente Kommunikation, z. B. von Monitoring-Daten oder Visualisierung in Echtzeit, sowie vertrauensbildende Maßnahmen öffentlicher oder privater Betreiber.

## b) Methoden

Die bereits angesprochenen Herausforderungen bei der Deckung des globalen, europäischen und deutschen Rohstoffbedarfs verlangen nach umfassenden geowissenschaftlichen Lösungsansätzen. Dabei ist besonders die Entwicklung innovativer Herangehensweisen bei der Lagerstätten-Erkundung, dem Bergbau und der Bergbaunachfolge sowie Aufbereitung wichtig. Diese sollten zudem nicht auf Kosten zukünftiger Generationen gehen. Aus geowissenschaftlicher Sicht stellen sich Fragen wie: Wo befinden sich relevante Lagerstätten und wie können diese effizienter erschlossen werden? Können wir z. B. über Künstliche Intelligenz eine Optimierung hin zu weniger invasiven Herangehensweisen bei geologischen, geophysikalischen und geochemischen Untersuchungen erreichen? Wie können wir sehr tiefliegende Vorkommen erkunden, abbauen, und optimal nachnutzen (Infobox Nutzung des Untergrundes)? Wie können Lagerstätten untereinander sowie die sozialen als auch die Umweltauswirkungen eines zukünftigen Abbaus miteinander verglichen werden, um die für Umwelt und Gesellschaft verträglichsten Bergbaustandorte festzulegen?

**Flugzeug-, Drohnen, oder Satelliten-gestützte geophysikalische Messungen.** Elektromagnetik und Hyperspektralmessungen der Erdoberfläche und oberen Erdkruste bieten heute die Möglichkeit, auf großen räumlichen Skalen Exploration zu betreiben. Zur effizienten Nutzung solcher großskaliger, räumlicher Daten für die zielgerichtete Vorerkundung potenzieller Rohstoffvorkommen bieten Verfahren aus den Datenwissenschaften grundlegend neue Optionen (2.4 Data Sciences). An bekannten und neu entdeckten Vorkommen können spezifische Indikatoren für die Nähe von Lagerstätten (sogenannte „Explorationsvektoren“) entwickelt werden.

**Mineralsystemforschung.** Die Integration all dieser neuen Technologien mit der Mineralsystemforschung führt zu einer ganzheitlichen Betrachtung lagerstättenbildender Prozesse. Ziel wäre, die Anatomie der lagerstättenbildenden Systeme konkreter zu charakterisieren. Mit diesem Wissen können z. B. großflächige Anomalien wie etwa hydrothermale Alterationserscheinungen im Umfeld von Lagerstätten sicherer identifiziert, und damit die Entdeckung tieferliegender Vorkommen effizienter gemacht werden.

**Geochemisches fingerprinting** beschreibt die Identifizierung geochemischer Muster, die für Herkunft, Entstehungsbedingungen und -umgebung von mineralischen Rohstoffen aus spezifischen Lagerstätten oder Distrikten charakteristisch sind. Dies ist essentiell, um die Herkunft aus menschenrechtlich und umwelttechnisch unbedenklichen Quellen sicherstellen zu können.

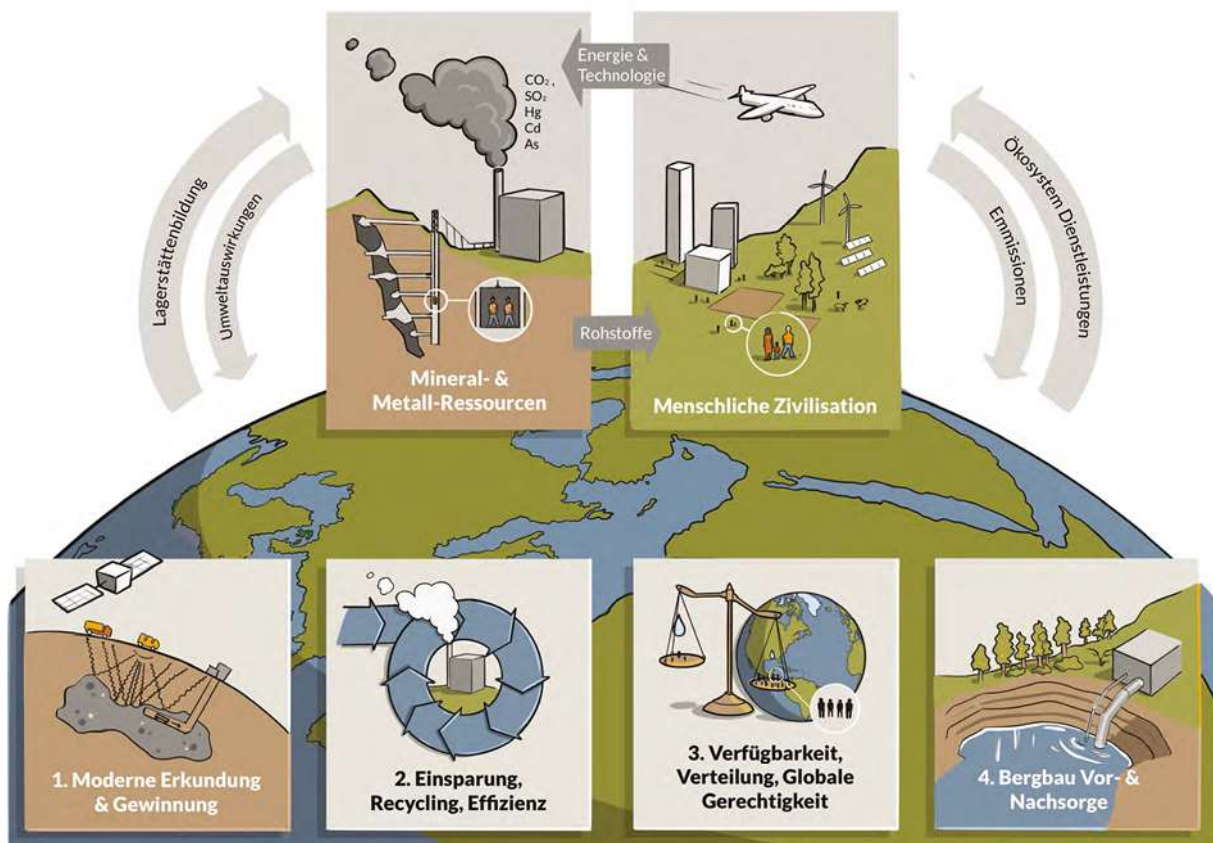
## c) Schnittstellen zu anderen Forschungsbereichen

Die Forschung zu den mineralischen Rohstoffen hat Schnittstellen zu vielen Bereichen der Geowissenschaften. Reichern sich die Rohstoffe durch magmatische, hydrothermale oder metamorphe Vorgänge an, beinhaltet die Forschung Prozesse und Observierung des oberen Mantels bis zur Erdkruste (1.1 Dynamik des Erdinnern, 1.5 Magma und Vulkanismus, 2.1 Erdkruste). Mineral- und metall-anreichernde Prozesse können auch sedimentär erfolgen (z. B. Sand, 2.2 Dynamik der Erdoberfläche) und die Umweltauswirkungen der Extraktion betreffen die Wasserqualität (2.3 Unsichtbares Wasser).

Die Erkundung von Rohstofflagerstätten in großer Tiefe ist auch eine zentrale Motivation für das vorgeschlagene „Geosphären-Observatorium“. Für die Erkundung über große Regionen hinweg bieten Datenwissenschaften neue Optionen (2.4 Data Sciences). Daneben gibt es über das interdisziplinäre Forschungsfeld Geometallurgie, das nicht explizit in diesem White Paper thematisiert wird, Anknüpfungspunkte zu den Gebieten Geotechnik, Bergbauplanung, mineralische Aufbereitung, Metallurgie und Materialwissenschaften (s. a. 3.3 Geoinspirierte Materialien). Eine Verknüpfung ist für die Entwicklung effizienterer Abbau- und Aufbereitungstechnologien unerlässlich.

**d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Synergien zu internationalen Forschungsinitiativen in den Bereichen Rohstofferkundung und Bergbau (z. B. EU Horizon VECTOR), Metallurgie, Recycling und innovative Sensorverfahren sind ebenso notwendig wie die Einbindung sozialwissenschaftlicher, sozial-ökologischer und ökonomischer Wissenschaftsbereiche (z. B. Sustainable Management in the Extractive Industries). Grundsätzlich gibt es einen hohen Bedarf an gut ausgebildeten Fachkräften in der Forschung, Entwicklung sowie in der Industrie und den zuständigen Behörden. Eine akademische Ausbildung im Rohstoffsektor ist in Deutschland aktuell jedoch nur an einer Handvoll von Standorten vorhanden.



Die zukünftig wachsenden Bedarfe an mineralischen Ressourcen benötigen Gewinnungs- und Verarbeitungsverfahren, die innovativ ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigen.

## 3.2 Natürlicher Wasserstoff – Baustein für die Energieversorgung?

Wasserstoff, eines der flüchtigsten und reaktivsten chemischen Elemente – und zugleich das häufigste Element im Universum – ist ein in der Erforschung der Erde aus der Perspektive der Energieversorgung bislang vernachlässigtes Element. Molekularer Wasserstoff ist vor Erdgas das energiereichste Gas unter den Bedingungen der Erdoberfläche. Im Rahmen der Energiewende stellen der Bildungsprozess von natürlichem Wasserstoff, das Auffinden von Quellen und eventuellen Senken („Fallenstrukturen“), die Produktion sowie seine Speicherung eine Zukunftsaufgabe mit viel Forschungsbedarf für die Geowissenschaften dar.

Austritte von natürlichem „Weißem Wasserstoff“ ( $H_2$ ) sind aus der Kruste aller Kontinente und Ozeane nachgewiesen, aber bislang nicht systematisch beobachtet. Bei gelegentlichen, brennenden Austritten von natürlichem Wasserstoff an der Erdoberfläche steht  $H_2$  oft in Zusammenhang mit Kohlenwasserstoffen, wo Anteile von bis zu 40 %  $H_2$  gemessen werden. Häufig wird  $H_2$ -Entgasung dabei entlang von Störungszonen beobachtet, vermutlich wegen dort höherer Permeabilität und dadurch entstandenen vertikalen Migrationspfaden. Monitoring-Studien zeigen oft fluktuierende Flussraten, teils auf täglicher Basis – vermutlich gezeitengetrieben –, teils in Zusammenhang mit tektonischer Aktivität. Auch eine Rolle von Luftdruckänderungen und benachbarter Bergbauaktivität werden vermutet. Nach Erdbeben wird ein Anstieg von  $H_2$  in die überlagernde Atmosphäre um mehrere 10er Potenzen beobachtet mit entsprechendem Effekt auf den Abbau der Ozonschicht darüber. So zeigt auch die Tiefbohrung auf das Wenchuan-Erdbeben von 2008 eine zeitweise stark erhöhte  $H_2$  Konzentration an der Störung. Bei kontinuierlichen Monitoring-Studien wurde eine Zunahme von  $H_2$ -Entgasung in den Monaten vor Erdbeben beobachtet. Trotz seiner Reaktivität mit Sauerstoff wird  $H_2$  darüber hinaus auch in Untertage-Bergwerksbetrieben auf metallische Ressourcen und Kohle, aber auch in sehr tiefen Kohlenwasserstofflagerstätten als Beimischung, oder in Salzlagerstätten beobachtet. In all diesen Fällen nehmen Konzentration und prozentualer Anteil von  $H_2$  am Gas/Fluid mit der Tiefe zu, u. a. aufgrund der zunehmenden mikrobiellen Aktivität und somit des  $H_2$ -Verbrauchs in flacheren Tiefen.

Wichtige Erkenntnisse über die Häufigkeit von  $H_2$ -Austritten an der Erdoberfläche konnten in den letzten Jahren durch satelliten- und boden-gestützte Analysen von sogenannten Feenkreisen gewonnen werden („fairy circles“; „sub-circular depressions“), die heute in Verbindung mit Wasserstoffaustritten gebracht werden. Durch diese Beobachtungsmethoden konnte in vielen Teilen der Kontinente eine flächendeckende Analyse durchgeführt werden, die ebenfalls anzeigt, dass es sich bei  $H_2$ -Austritten an der Erdoberfläche um ein signifikantes Phänomen handelt, dessen Tragweite für Forschung und Energiesysteme o. Ä. derzeit noch nicht verstanden wird. Ebenso wenig ist bislang klar, inwieweit Wasserstofffallen („Fallenstrukturen“) eine Rolle als Senke im Untergrund spielen und welche Explorations- und Produktionsmethoden zu Aufsuchung und Gewinnung geeignet sind.

### a) Die Fragen der $H_2$ Bildung

**Ursprung des natürlichen Wasserstoffs.** Trotz dieser vielfältigen Beobachtungen bestehen bis heute zahlreiche Hypothesen zum Ursprung des  $H_2$ . Diese reichen von Entgasung von Erdkern und Erdmantel über tholeiitischen Vulkanismus ( $H_2$  ist dort das dritthäufigste Gas nach Wasser und  $CO_2$ ) bis zur Reaktion ultramafischer bis mafischer Gesteine mit Wasser unter Bedingungen der niedriggradigen Metamorphose (Anchizone). Die Serpentinisierung ultramafischer Gesteine in Spreizungszonen und Faltengebirgen ist relativ gut erforscht und liefert nachweislich eine vielfach höhere Ausbeute an  $H_2$  als Wechselwirkungen zwischen Wasser und anderen Gesteinstypen. Hinzu kommen Hypothesen zur Dissoziation von Wasser in der Erdkruste durch Radiolyse beim radioaktiven Zerfall von Uran, Thorium, Kalium oder durch sogenannte mechanoradikale, reibungskontrollierte Dissoziation von Wasser auf Störungen bei schnellen Prozessen wie etwa Erdbeben. Vor allem der letztere Prozess zeigt in Laborexperimenten eine Effektivität mit Produktionsraten, die um mehrere Zehnerpotenzen über dem der anderen Prozesse liegt. In diesen durch Dissoziation von Wasser entstehenden  $H_2$ -Quellen ist bislang ungeklärt, wie die genauen chemischen Reaktionen beschaffen sind, wie das Verhältnis von vorhandenem zu neugebildetem  $H_2$  ist und, vor allem, wie das Verhältnis zu dabei ebenfalls freigesetztem  $O_2$  bzw. „reactive O-species

(ROS)“ ist. Mechanoradikale Bildungsmechanismen werden daher wegen dieses letzteren Problems eher als Teil einer komplexen Reaktionskette vermutet. Aber welche sind dies und was sind ihre quantitativen Beiträge in der Natur?

**Wasserstoff im Erdinnern.** Eine höhere vermutete H<sub>2</sub>-Konzentration in der frühen Erdatmosphäre (bis zu 30 %) kann die frühe Lebensentstehung und Evolution mitgetrieben haben. Heute nutzen chemolithoautotrophe Mikroben (also solche, die ihre Energie aus anorganischen chemischen Reaktionen beziehen) H<sub>2</sub> als eine ihrer Energiequellen. Besonders in tiefen Kristallingesteinen, wo kein organischer Kohlenstoff vorhanden ist, und sogar an der Basis fein-gemahlener, glazialer Gesteine kann H<sub>2</sub> die Voraussetzung für eine im Dunkeln lebende Biosphäre sein. Doch ist wenig bekannt über die Evolutionsgeschichte der tiefen Biosphäre und ihres Verhältnisses zur Verfügbarkeit von H<sub>2</sub>. Zur langfristigen Aufrechterhaltung ihres Metabolismus und ihrer Evolution müsste dabei ein konstanter Fluss an H<sub>2</sub> garantiert sein. Dies setzt wahrscheinlich tektonische Aktivität in der Erdkruste seit dem Archaikum voraus, um einerseits über tektonisch induzierte Permeabilität der Mantelentgasung zu dienen, aber auch über mechanoradikale Prozesse die Dissoziation von Wasser an aktiven Störungen in der Erdkruste zu ermöglichen. Nach den bisherigen Abschätzungen werden etwa 23 Millionen Tonnen H<sub>2</sub> jährlich durch die verschiedenen, bekannten Prozesse in der Erdkruste generiert, was derzeit 94 Millionen Tonnen jährlicher H<sub>2</sub>-Produktion/Verbrauch – industriell durch Dampfpreformierung oder Pyrolyse aus Kohlenwasserstoffen gewonnen – gegenübersteht. Dabei werden Beiträge aus Kern und Unterem Mantel nicht eingerechnet, was zu sehr großen Unsicherheiten in solchen Berechnungen führt. Die eigentlichen Flussraten könnten höher sein. Insgesamt sind die quantitativen Flüsse zwischen den verschiedenen Quellen und Senken von H<sub>2</sub> also nur sehr lückenhaft oder gar nicht bekannt. Eine Kreislauf-/Stoffumsatz-Bilanz wie etwa beim Kohlenstoff- oder Wasserkreislauf gibt es bis heute nicht – eine fundamentale Wissenslücke.

### b) Baustein der Energieversorgung?

Wegen der regional bei Monitoring beobachteten Flussraten, die bei 100–120 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> bis zu 500.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> H<sub>2</sub> pro Jahr liegen, könnte H<sub>2</sub> wie Erdgas produziert werden. Erste Bohrungen, die Wasserstoff mit einer Rate von bis zu 100.000 m<sup>3</sup> pro Tag in Ostsibirien aus Kimberlit-Schloten produziert haben, geben bis dato nur sporadische Nachweise zur möglichen Gewinnung von natürlichem Wasserstoff. Eine jüngst abgeschlossene Untersuchung in einem Chromit-Bergwerk in Albanien muss auf der Zeitachse noch zeigen, wie langfristig stabil die H<sub>2</sub>-Produktion sein kann. Diese Nutzung des natürlichen Weißen Wasserstoffs wäre eine wesentlich umweltfreundlichere Methode der H<sub>2</sub>-Produktion, verglichen mit „Grünem“ Wasserstoff, der heute unter hohem Energieverbrauch elektrochemisch erzeugt werden muss. Diese wäre auch weit umweltfreundlicher als die von sogenanntem grauen, blauen oder türkisfarbenen Wasserstoffs, bei deren Produktion aus Kohlenwasserstoffen CO<sub>2</sub> produziert wird. Natürlicher H<sub>2</sub> könnte – sofern eine ausreichende, förderbare Menge nachgewiesen werden kann – ein wichtiger Motor für die gewünschte H<sub>2</sub>-Ökonomie werden. Seine Nutzung bei Verbrennung würde keine unerwünschten Treibhauseffekte erzeugen. Aber auch hier bestehen offene Herausforderungen: zu den entscheidenden Fragen zählt die nach geeigneten Methoden und Verfahren für Exploration und Produktion angesichts der in großer Tiefe deutlich zunehmenden H<sub>2</sub>-Gehalte, wie auch für die Trennung des Wasserstoffs von den mit ihm vorkommenden Gasen.

### c) Methoden

Ein zentrales Feld wird die Ermittlung der Reaktionsketten bei Dissoziationsprozessen (Radiolyse und mechanoradikale Dissoziation) in der Erzeugung von „Weißem Wasserstoff“ sein. Komplementär wird es wesentlich sein, den Metabolismus der von H<sub>2</sub>-Flüssen angetriebenen tiefen Biosphäre, vom Boden bis in die Tiefen des Basements, mittels biochemischer und molekularbiologischer Methoden in seiner Größenordnung aufzuschlüsseln. Dazu gehört auch die experimentelle und Monitoring-orientierte Ermittlung der Produktions- und Flussraten von H<sub>2</sub>-Quellen und -Senken in allen natürlichen Prozessen mit dem letztendlichen Ziel, den Wasserstoffkreislauf insgesamt auf eine quantitative Grundlage stellen zu können.

Nur auf diesem, in seiner regionalen Variabilität verstandenen, Fluss und der tiefenabhängigen Verfügbarkeit von natürlichem Wasserstoff lassen sich Konzepte für die Anwendung und Nutzung entwickeln. So wird die Anwendung von „play-based-exploration workflows“ auf Weißem Wasserstoff und die Entwicklung von neuen H<sub>2</sub>-Aufsuchungsmethoden

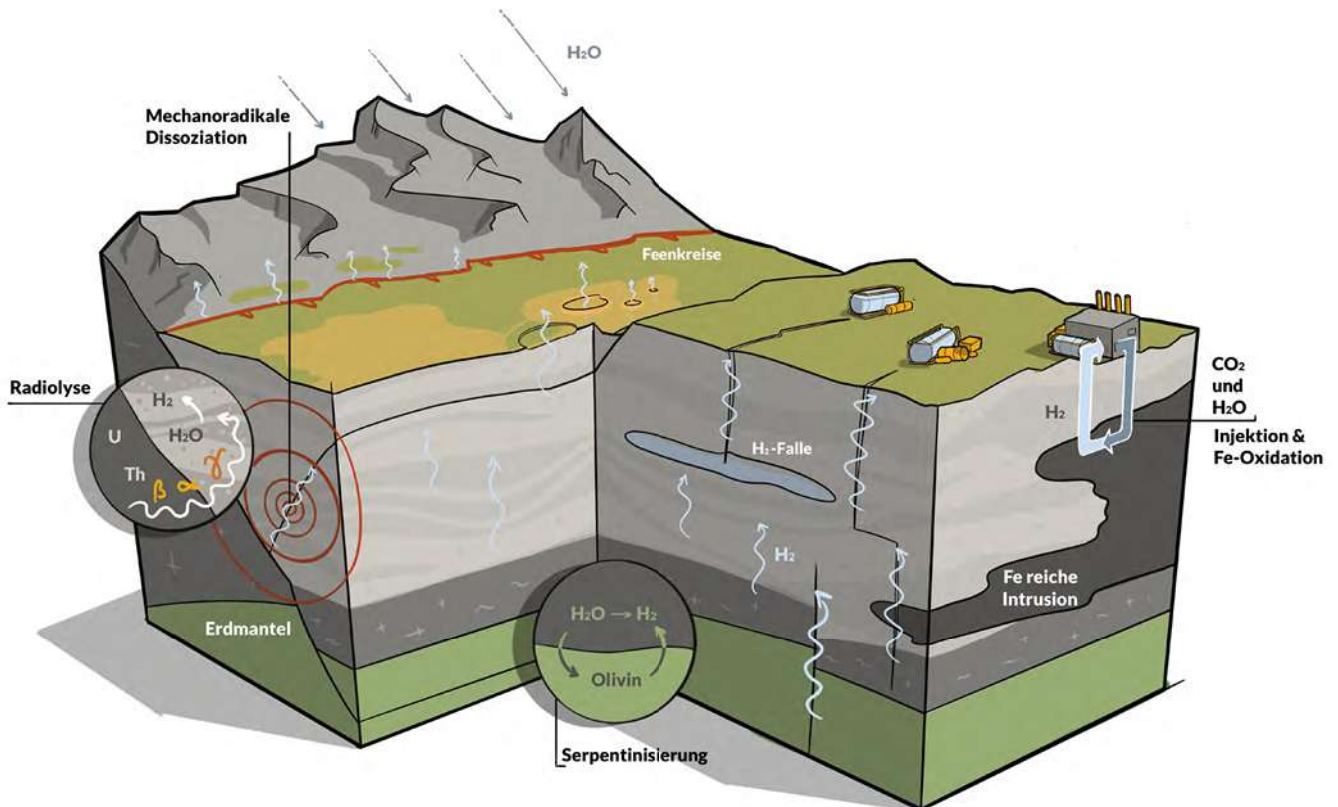
eine zentrale Rolle spielen. Dazu zählen auch die Suche nach und Entwicklung von Oberflächen- und Untergrund-erkundungsmethoden, die Potential für die Wasserstofferkundung haben sowie die Entwicklung der dazugehörigen Instrumentierung. Nicht zuletzt werden auch Fragen der Speicherung von Wasserstoff und deren Optimierung in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund eine Rolle spielen.

**d) Schnittstellen zu anderen Bereichen**

Eine offensichtliche Schnittstelle besteht zu all den Bereichen, die eine Observierung der obersten Erdkruste bis hin zur Kritischen Zone einbeziehen (2.1 System Erdkruste und 2.3 Unsichtbares Wasser). Aufbau, Struktur und laufende Prozesse wie etwa aktive Deformation spielen hier eine wichtige Rolle. Weiterhin bestehen Verbindungen sowohl zu den rohstofforientierten Themen (3.1 Mineralische Rohstoffe) wie zu den Fragen der Wechselwirkung zwischen Biosphäre und fester Erde (1.2 Ko-Entwicklung Erde-Leben und 1.3 Biodiversität im Erdsystem).

**e) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Ein initiales Stadium der Erforschung von Wasserstoff in der festen Erde ist im akademischen Sektor außerhalb Deutschlands erreicht, insbesondere in Frankreich und Australien. Erste kommerzielle Explorationsbemühungen bestehen in den USA (z. B. HyTerra in Nebraska;), Australien (z. B. Gold Hydrogen Bohrungen in Süd-Australien;) und Frankreich (FDE in Lothringen).



Die wichtigsten Orte und Prozesse zu Erzeugung und Transport von natürlichem Wasserstoff in der Erdkruste und dem obersten Erdmantel bis hin zur möglichen Produktion von „orangefarbenem“ Wasserstoff als eine proaktive Variante des weißen Wasserstoffs durch Injektion einer kohlenstoffangereicherten Lösung in eine eisenreiche reaktive Formation (rechts).

## Naturbasierte Lösungen für Klimaschutz, Klimaanpassung und Biodiversitätsschutz

Naturbasierte Lösungen schaffen und erhalten Ökosysteme und können damit wesentlich zum Klimaschutz beitragen. Intakte Ökosysteme stellen kosteneffiziente und risikoarme Leistungen zur Verfügung, um sowohl die Folgen des Klimawandels abzumildern als auch zum Aufbau von Klimaresilienz beizutragen. Naturbasierte Lösungen verbinden vier Ziele, die bei technischen Lösungen oft isoliert betrachtet werden: (i) Minderung von Treibhausgasen in der Atmosphäre, (ii) Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel, (iii) Biodiversitätsschutz und (iv) Beitrag zur menschlichen Gesundheit.

Die sehr vielfältigen Ansätze von naturbasierten Lösungen befinden sich derzeit in einer exponentiellen Wachstumsphase. Wissenslücken existieren insbesondere in der Wirksamkeit dieser Lösungsansätze bei starker Klimaerwärmung. Zum Beispiel kann ein Moor nur so lange zur Minderung von Treibhausgasen dienen, wie es nicht drainiert wird. Trocknet ein Mooregebiet aus, verliert es auch sein Potential zur Kohlenstoffspeicherung. Die Wiedervernässung von drainierten Mooreböden steht ebenso wie ein nachhaltiges Waldmanagement vor der Herausforderung zunehmender Dürreperioden, die sich durch den Klimawandel weiter verstärken werden. Das zeigt die Grenzen von naturbasierten Lösungen unter extremen Szenarien. Auch der erfolgreiche Beitrag von Korallenriffen für Anpassungsmaßnahmen z. B. im Küstenschutz hängt wesentlich von der Gesundheit von Riffen ab, die wiederum durch den Klimawandel bereits jetzt beeinträchtigt sind. Ebenso können Mangroven und Salzwiesen nur dann einen Beitrag zum Küstenschutz bei steigendem Meeresspiegel liefern, wenn sie intakt sind.

Viel diskutierte naturbasierte Lösungen zur Minderung von Emissionen sind Moorwiedervernässung und Aufforstung. Daneben rücken zunehmend aber auch Agroforstwirtschaft und städtische grüne Infrastruktur in den Fokus. Im Meer sind Mangroven, Seegraswiesen und Kelpwälder sehr effiziente Speicher von Kohlendioxid. Wald- und Moorschutz sowie Aufforstung haben den Vorteil, dass Wälder neben ihrer Kohlenstoffspeicherfunktion auch zur Klimaanpassung taugen, indem sie zum Beispiel durch ihre Schwammfunktion die Folgen von Starkregenereignissen und Dürren mindern.

Geowissenschaftliche Beiträge zu naturbasierten Lösungen sind vielfältig und vielversprechend. Die Renaturierung von Flusssystemen würde beispielsweise alle vier Ziele vereinen. Im Vergleich zu künstlich begräbten Flüssen, speichern mäandrierende Flusssysteme in ihren Flussauen signifikante Mengen von Kohlenstoff (Minderung); sie leisten einen erheblichen Beitrag zum Schutz vor Starkregenereignissen (Anpassung); enthalten eine höhere Artenvielfalt (Biodiversitätsschutz) und bieten einen hohen Erholungswert (menschliche Gesundheit).

Schutz und Anpflanzung von Mangroven haben ähnlich positive Konsequenzen für die Sequestrierung von Kohlenstoff, die Senkung von Küstenerosion, den Erhalt von Biodiversität und die Gesundheit. Naturbasierte Lösungen müssen integraler Bestandteil nachhaltiger Umwelt- und Gesundheitsschutzkonzepte sein. Ein prioritäres Ziel geowissenschaftlicher Forschung sollte daher die Ermittlung von effizienten Lösungsbeiträgen aus der Geo- und Biosphäre sein, die eine Alternative zu technischen oder rein sektoralen Lösungen und Anpassungsstrategien darstellen. Dazu ist es notwendig, den Nutzen, aber auch potenzielle Nachteile der naturbasierten Lösungen wissenschaftlich zu quantifizieren, um evidenzbasierte Aussagen über die Auswirkungen zu ermöglichen. Hierzu müssen Instrumente und Modelle (weiter-)entwickelt werden, die über eine Bewertung von reinen Kohlenstoffdioxidäquivalenten hinausgeht. Negative Nebeneffekte müssen zwar in die Folgenabschätzung einfließen, aber naturbasierte Lösungen liefern immer einen positiven Beitrag zum Erhalt resilienter Ökosysteme. Der recht hohe Raumbedarf von naturbasierten Lösungen kann zwar zu Nutzungskonflikten führen, muss aber gegen die positiven Effekte – auch für das menschliche Wohlbefinden – abgewogen werden.

### 3.3 Von der Natur lernen – neue geoinspirierte Materialien und Prozesse

Die Natur liefert uns zeit-, energie- und materialeffiziente Wege zur Herstellung neuer Werkstoffe. Sie inspiriert uns für Syntheseprozesse, Design und Eigenschaften neuer Materialien. Ein Schlüssel für diese Entwicklung ist die Aufklärung der strukturbildenden Prozesse mit einer Vielzahl hochauflösender physikalischer Methoden sowie deren ab initio Simulationen kombiniert mit Ansätzen der künstlichen Intelligenz. Die so entwickelten geoinspirierten Materialien werden einen wichtigen Beitrag zur Transformation zu einer klimaschonenden und umweltfreundlichen Wirtschaft leisten.

Die erfolgreiche Transformation zu einer klimaschonenden, umweltfreundlichen Wirtschaft erfordert hochentwickelte Werkstoffe und funktionelle Materialien. Wirksamer Klimaschutz bedeutet auch die energieeffiziente und CO<sub>2</sub>-reduzierte Weiterentwicklung von mineralischen Massenprodukten wie Zement und Beton, die für 8–10 % der derzeitigen weltweiten CO<sub>2</sub> Emissionen verantwortlich sind. Wie können solche Stoffe mit geringerem Energieeinsatz und weniger umwelt- und gesundheitsgefährdend hergestellt werden? Welche Stoffe sind ausreichend resistent gegen Degradation oder Verwitterung, dass sie für die Endlagerung von radioaktiven oder potenziell toxischen Abfällen geeignet sind? Wie lassen sich kritische Rohstoffe nachhaltig gewinnen?

#### a) Geomaterialforschung – von den Grundlagen zur nachhaltigen Ressourcennutzung

Die Natur liefert uns dafür geeignete Rezepte. Diese Rezepte umfassen nicht nur die strukturellen Baupläne der langzeitstabilen Bausteine der Erde, sondern auch zeit-, energie- und materialeffiziente Wege zu deren Herstellung. In unserer modernen Welt liefern die natürlichen Stoffsysteme, die in ihnen ablaufenden chemischen Reaktionen, und die stabilen Endprodukte wichtige Impulse für die Entwicklung neuer Materialien. Dabei können wir sowohl von der belebten als auch von der unbelebten Natur lernen. Die Natur inspiriert uns für:

- 1) **Syntheseprozesse** – wie Biomineralisation, die keramische Festkörper mit weit weniger Energie erzeugt als in industriellen Prozessen, die oft mehr als 1400 °C für die Verdichtung der Keramik benötigen.
- 2) **Design** – wie Nanostrukturen auf Blättern, die die Reflexion von Licht mit langer Wellenlänge reduzieren und entsprechend dessen Absorption erhöhen und als Vorlage für Solar-Absorber-Beschichtungen fungieren.
- 3) **Funktionale und strukturelle Eigenschaften** – wie die von natürlichen mineralischen Bindemitteln wie Tonen und Puzzolanen, die schon in der Antike als Baustoff verwendet wurden. Oder die von hybriden, d. h. mineralisch-organischen, Werkstoffen, wie z. B. einem Verbundwerkstoff aus dem Mineral Hydroxylapatit und dem Kunststoff Polyamid als Material für Halswirbelrekonstruktionen.

Nach Jahrhunderten konventioneller anorganischer Materialforschung finden sich derzeit die meisten Beispiele für Naturinspiration in der belebten Welt. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Natur durch Evolution optimierte Strukturen und Prozesse entwickelt, von denen Menschen lernen können. So hat sich mit der „Bionik“ (manchmal auch „Biomimikry“ genannt) ein ganzer Wissenschaftszweig etabliert.

**Geoinspirierte Materialien.** Auch geologische Prozesse bieten ein beträchtliches Repertoire an Prozessen und Materialien, die auf ähnliche Weise als Vorlage genutzt werden können. Beispiele dafür sind Zeolithe und Tonminerale mit ihren vielfältigen Anwendungen u. a. als Ionentauscher zur Enthärtung und Säuberung von Trinkwasser. Oder auch Opale als natürlich vorkommende photonische Kristalle oder die mineral-inspirierte Entwicklung von sogenannten Geopolymeren im Bausektor. An der Erdoberfläche kommt es oft zu Mineralbildungen mit einer Vielzahl an nanoskaligen Strukturen, z. B. Tonminerale, Eisen-oxy-hydroxide, amorphes oder nanokristallines SiO<sub>2</sub>. Deren vielfältige Eigenschaften, z. B. Absorption-Desorption, Ionenaustausch, Magnetismus, piezoelektrische oder nichtlinear optische Eigenschaften, sind in Bezug auf ihr High-Tech Potential nur oberflächlich erforscht, obwohl ihre kostengünstige Nutzung durch Menschen schon vor mehr



als zehntausend Jahren begann. Von großem Interesse sind auch hybride Nanokomposite in Form mineralisierter Hartgewebe (z. B. Knochen, Zähne, Schalen, Magnetosome (magnetische Partikel in Zellen von Lebewesen)), die von ausgestorbenen und rezenten Organismen produziert wurden und werden. Diamanten werden in der Entwicklung von Quantencomputern verwendet. In Lagerstättenbildenden Prozessen werden chemische Elemente, oft auch kritische Rohstoffe, stark angereichert (3.1 Mineralische Rohstoffe). Geologische Prozesse steuern den langfristigen Einbau giftiger oder radioaktiver Elemente in Mineralen. Eine große Herausforderung für die Welternährung ist die Bewirtschaftung von Phosphat, dessen meist biologisch entstandene Lagerstätten bald ausgebeutet sein werden. Dringend müssen dafür nachhaltige Methoden einer Kreislauftechnologie entwickelt werden. Ein zentrales und dabei immer wieder auftretendes Phänomen ist, dass die Bildungsprozesse von Materialien wie auch deren Zersetzung durch Verwitterung in der Natur anders ablaufen als in einem konventionellen Laborexperiment. Die große Forschungsfrage ist hier demnach, wie die Natur das genau realisiert.

**Mineralogische Materialforschung.** Die mineralogische Forschung als geowissenschaftliche Materialwissenschaft geht diese Frage an. Sie verfügt nicht nur über die experimentellen Techniken für die Erforschung von Materialeigenschaften, sondern ist im Gegensatz zu anderen Fächern mit Materialbezug auch mit „geologischen“ Zeitskalen vertraut. Auf diesen Zeitskalen laufen die natürlichen Prozesse ab und führen zu Mineralen und Gesteinen, die für Tausende, Millionen oder Milliarden Jahre stabil sein können. Die Beobachtung natürlicher Systeme ermöglicht es, die Bildung und Umwandlung von Stoffen auf verschiedenen Zeit- und Längenskalen zu analysieren. Dazu gehören molekulare Prozesse der Wechselwirkung zwischen Mineralen und Gesteinen mit wässrigen Fluiden und Schmelzen. Angewendet werden kann dieses Wissen auf Bauwerke aus Beton, die aufgrund der natürlich ablaufenden Materialreaktionen schon nach weniger als hundert Jahren einsturzgefährdet sind. Das System Erde stellt somit ein einzigartiges, natürliches Labor dar, das zahlreiche Ansatzpunkte für das Verständnis von Prozessen und Stabilitätsbedingungen und damit für die Entwicklung und den Einsatz neuer geo-inspirierter synthetischer Materialien bietet.

**Künftige geowissenschaftliche Materialforschung wird hauptsächlich drei Ziele verfolgen:** (i) Mit Hilfe moderner analytischer und experimenteller Methoden sowie Modellierung einschließlich multiskaliger Computersimulationen die Bildungsprozesse, Design-Vorbilder und funktionelle Eigenschaften in bzw. von natürlichen Stoffsystemen, die potenziell als „geoinspirierend“ gelten könnten, detailliert aufzuklären. (ii) Die Kinetik dieser Bildungsprozesse unter Berücksichtigung metastabiler Zustände, organischer bzw. nanokristalliner Zwischenphasen oder der Beteiligung von Organismen und assoziierter organischer Verbindungen zu quantifizieren. Und (iii) Die Systematik der natürlichen Bildungsprozesse und Stoffeigenschaften zur nachhaltigen Ressourcennutzung zur Entwicklung und Anwendung neuer Materialien zu erschließen.

**Zu den wichtigsten Herausforderungen zählen dabei:** (i) Die Übertragung der Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen sowie aus Modellierung und Simulation auf praxisrelevante Zeit- und Längenskalen. (ii) Die Betrachtung bzw. Optimierung von geo-inspirierten Materialien und Werkstoffen über ihren gesamten avisierten Lebenszyklus hinweg in ihren Interaktionen mit Wasser, Boden, Luft und Organismen. (iii) Die Umwandlung von in der Erde leicht verfügbaren Rohstoffen in maßgeschneiderte Materialien, beispielsweise für den Umbau der Energiesysteme. Und (iv) die energieeffiziente Synthese von optimierten hierarchischen Strukturen, wie sie z. B. durch Biomineralisation gebildet werden, als Materialien mit neuartigen funktionalen Eigenschaften.

**Vom Modell zur Anwendung.** In künftigen Forschungsprojekten könnten verbesserte Modelle für die thermodynamische und kinetische Beschreibung von Fluid-Mineral-Wechselwirkungen beispielsweise für Anwendungen in der Geothermie oder bei der Endlagerung radioaktiver oder anderer potenziell toxischer Abfälle entwickelt werden. Solche Modelle kommen auch bei der Minimierung der Auslaugung von Schadstoffen sowie der Gewinnung von kritischen Elementen (z. B. seltene Erden, Phosphor) aus mineralischen Nebenprodukten und Abfällen zum Einsatz. Viele wichtige Minerale können im Labor bislang nur in unzureichender Menge und Kristallqualität produziert werden. Meist sind dabei die Mechanismen der Keimbildung und des Kristallwachstums nicht verstanden. Mikro- und nanoskopische Oberflächen- und Grenzflächenprozesse sowie Kristallstrukturdefekte spielen eine entscheidende Rolle für Materialeigenschaften und

Synthesen. Ziel der Forschung ist es, diese mit den neuen analytischen Methoden und Modellierungsansätzen zu identifizieren. Gleiches gilt für die Charakterisierung nichtkristalliner Stoffe wie amorpher metastabiler Materialien, (natürlicher) Gläser und Schmelzen. Ein weiteres wichtiges Thema ist der hohe Energiebedarf vieler Materialsynthesen. Es gilt herauszufinden, wie durch geo-bio-inspirierte Prozesse energieeffizientere Synthesebedingungen erreicht werden und welche Rolle Mikroorganismen dabei spielen. Ebenso müssen effizientere anorganische Katalysatoren, z. B. für die elektrochemische oder photochemische Spaltung von Wasser für die Erzeugung von grünem Wasserstoff, die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus Biomasse für die Herstellung von Grundchemikalien oder für die energieeffiziente Synthese von grünem Ammoniak für die Düngemittelproduktion gefunden werden. Auch im Energie- und Bausektor kann man prototypische Strukturen aus der Natur für die Entwicklung neuer Materialien nutzen. Ein Beispiel dafür ist die Weiterentwicklung von Geopolymeren sowie Zementersatzstoffen, aus CO<sub>2</sub>-freiem Metakaolin zum Beispiel.

## b) Methoden

**Materialsynthese und Aufklärung von Prozessen und Strukturen.** Die Entwicklung neuer geo-inspirierter Materialien erfordert die Anwendung und Weiterentwicklung innovativer Synthese- und Kristallzüchtungsverfahren. Der klassische empirische Ansatz eines „educated guess“ gefolgt von einer „blinden Kartierung“ von Prozessparametern zur Optimierung eines Syntheseprodukts wird zunehmend flankiert durch detaillierte Analyse der Reaktionen und Produkte sowie durch Berechnungen von thermodynamischen Modellen bis zur atomistischen Simulation. Dies gilt für Prozesse unter verschiedensten Druck-, Temperatur- und Redoxbedingungen, Einfluss mechanischer, elektrischer und magnetischer Felder, oder Berücksichtigung der Grenzflächenstruktur und -dynamik. Aktuelle Entwicklungen in den verschiedenen Bereichen der Materialforschung ermöglichen in situ Messungen von Materialeigenschaften und chemischen Reaktionen mit immer höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung bis in den Nanometer- und Femtosekundenbereich. Dabei werden unter anderem moderne bildgebende Verfahren, Mikroskopie-, Spektroskopie- und Beugungsmethoden unter Nutzung von Elektronen-, Neutronen, Laser- und Röntgenstrahlung eingesetzt. Die Nachweisgrenzen chemischer Analysen von Elementen werden immer weiter herabgesetzt. Auch die Isotopenzusammensetzung der metallischen Elemente und der Halbmetalle können durch die Entwicklung neuartiger Massenspektrometer immer präziser bestimmt werden. Die Isotopenverhältnisse dienen zur Aufklärung der Herkunft, der Transportmechanismen durch biologische Membranen, der Metalleanreicherung in Lagerstätten sowie Verwitterungs- und Redox-Prozesse.

**Simulationen und KI.** Parallel zu den experimentell-analytischen Methoden verzeichnen computerbasierte Ansätze der Modellierung und Simulation von Materialien und ihren Reaktionen aktuell eine rasante Entwicklung. Einerseits steht mit modularen Hoch- und Höchstleistungsrechnern (CPU- und GPU-basiert) sowie ersten Prototypen von Quantencomputern eine immer leistungsstärkere Hardware zur Verfügung. Andererseits zeichnet sich ab, dass sehr rechenzeitaufwendige, parameterfreie ab initio Simulationen (quantenmechanische Modellierung der Wechselwirkungen zwischen atomaren oder molekularen Teilchen) durch wesentlich effizientere Ansätze der künstlichen Intelligenz (KI) ergänzt werden können. Algorithmen basierend auf maschinellem Lernen und tiefen neuronalen Netzen eröffnen neue Möglichkeiten für quantitative Materialsimulationen, die von der molekularen bis zur makroskopischen Skala reichen. Datenbank- und KI-basiertes Materialdesign, bislang vor allem in der Chemie und Physik eingesetzt, ist ein zunehmend wichtiges Werkzeug für die Entwicklung neuer geo-inspirierter Materialien, kann aber auch wichtige Beiträge zur Prozessoptimierung für die Energiewende oder für die nachhaltige Ressourcennutzung liefern. Diese methodischen Entwicklungen führen zu einer stärkeren Verzahnung von experimentell-analytischen und numerischen Verfahren, da die bestehenden Lücken zwischen den jeweils zugänglichen Zeit- und Längenskalen sowie physiko-chemischen Bedingungen nach und nach geschlossen werden. Mit der höheren Orts- und Zeitauflösung können Strukturen und Prozesse in Stoffsystemen sichtbar gemacht werden, die bislang nicht zugänglich waren. Diese enthalten wichtige und neue Informationen zu skalenabhängigen und nichtlinearen Materialeigenschaften und Prozessen.

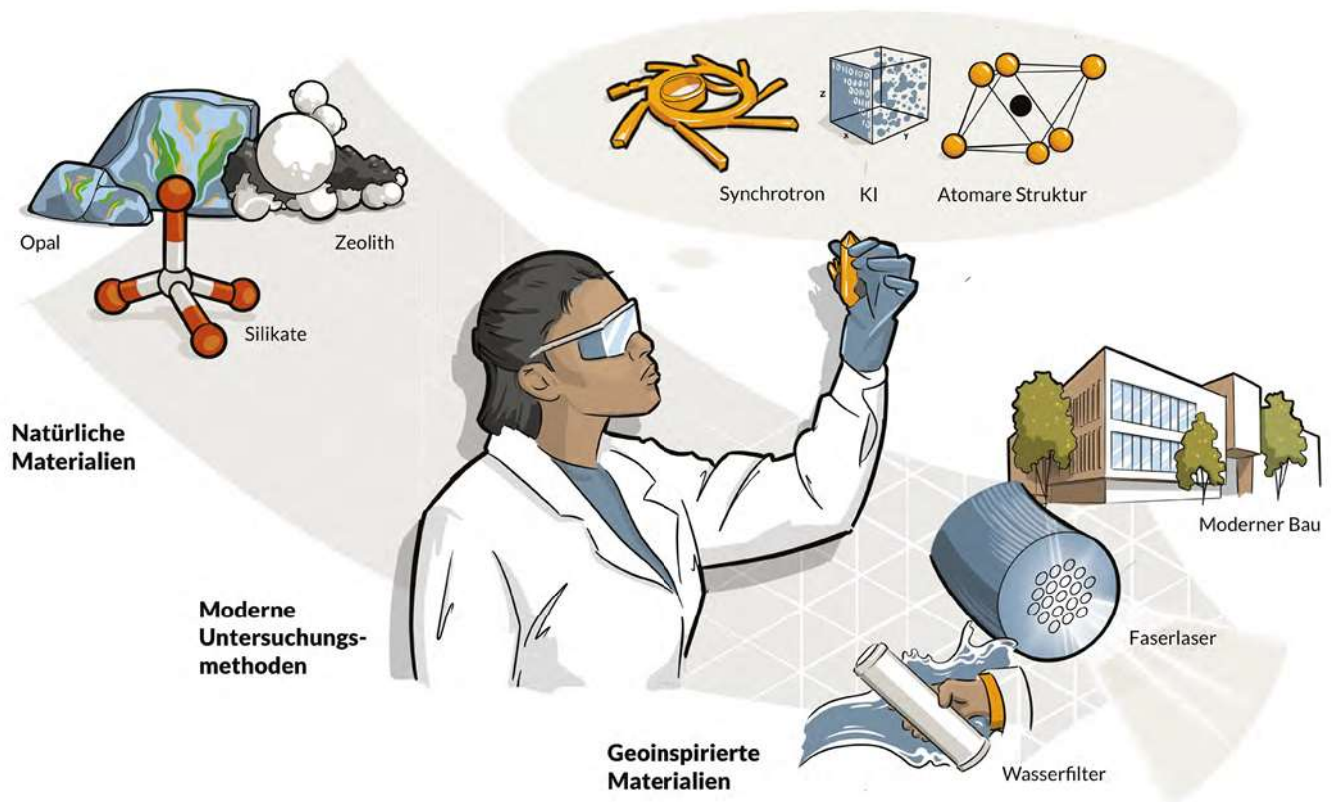
## c) Schnittstellen zu anderen Bereichen

Der Ansatz „von der Natur lernen“ schlägt Brücken innerhalb der Geowissenschaften (3.4 Urbane Geowissenschaften, 3.1 Mineralische Rohstoffe), zu den anderen Naturwissenschaften sowie zur Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.

Entsprechend profitiert der Ansatz von Entwicklungen in allen Bereichen und trägt entscheidend zu einem materialbasierten Verständnis des Erdsystems bei. Experimente und Simulationen bis auf die atomare Skala (2.4 Data Sciences) liefern allgemeine und für die Erforschung des Erdsystems notwendige quantitative Einblicke in Prozesse wie Biomineralisation, Gesteinsverwitterung oder die Umverteilung chemischer Elemente und deren Isotope (2.2 Dynamik der Erdoberfläche, 2.3 Unsichtbares Wasser). Sie ermöglichen Vorhersagen für Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in der Natur unzugänglicher Materialien sowie damit verbundener Prozesse beispielsweise im tiefen Inneren der Erde oder auf Exoplaneten (1.1 Dynamik des Erdinnern).

#### d) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen

Moderne Geomaterialforschung bedingt die Nutzung von Strahlungsquellen an nationalen und internationalen Großforschungszentren. Dazu zählen (1) Synchrotronstrahlungsquellen der 4. Generation (z. B. ESRF Grenoble, DESY PETRA IV), die durch ihre erheblich höhere Brillanz bisherige Auflösungsgrenzen sowie Detektionslimits für chemische Elemente und sehr kleine Partikel wesentlich verbessern, (2) beschleunigerbasierte Neutronenstrahlungsquellen (z. B. ESS Lund), die aufgrund der besonderen Eigenschaften des Neutrons zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften, wasserstoffhaltiger Materialien oder zur Unterscheidung von chemischen Elementen mit ähnlichen Elektronenzahlen besonders geeignet sind und (3) freie Elektronenlaser (z. B. European XFEL), die die Echtzeit-Beobachtung einzelner Schritte chemischer Prozesse in Energiematerialien wie Solarzellen oder Brennstoffzellen ermöglichen. Dies wird flankiert durch Hoch- und Höchstleistungsrechner und entsprechende Software, die in internationaler Zusammenarbeit entwickelt wird.



Durch Beobachtung, Analyse und Simulation kann der Mensch von der Natur lernen und diese Erkenntnisse für die Entwicklung neuer Materialien und für eine nachhaltigere Nutzung natürlicher Ressourcen nutzen.

## 3.4 Urbane Geowissenschaften für eine nachhaltige Stadtentwicklung

Bis 2050 wird die Mehrheit der Weltbevölkerung in Städten leben, in denen Menschen durch Klimawandel und häufigere Naturgefahren besonders erhöhten Risiken ausgesetzt sind. Durch vorausschauende Planung können die Geowissenschaften mittels Wasser-, Wärme-, Rohstoff- und Risikomanagement zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung beitragen. Schlüsselemente dafür sind konstantes Monitoring der komplexen Kreisläufe wie von Klima- und Wasserhaushalt. Naturbasierte Lösungen in und im Umland der großen Städte müssen konsequent umgesetzt werden.

Die Urbanisierung schreitet rasant voran: Bis 2050 werden voraussichtlich ca. 70 % der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten leben. Die hohe Bevölkerungsdichte in Städten erhöht die Anfälligkeit für Risiken, insbesondere durch den Klimawandel – wie Überhitzung und Mangel an sauberem Wasser. Die Anpassung an den Klimawandel stellt gerade in urbanen Räumen eine herausragende Aufgabe dar. In den Küstenregionen besteht eine besonders hohe Dichte an Städten. Sie sind durch küstenspezifische Risiken zusätzlich gefährdet, wie Meeresspiegelanstieg, Überschwemmungen und Tsunamis. Die zunehmende Erwärmung trifft Städte und ihre Bewohner gleich in multipler Weise: sie verstärkt sich in „urbanen Wärmeinseln“, und bei extremen Hitzeereignissen ergeben sich erhebliche Konsequenzen für die Gesundheit der Bewohner. Gleichzeitig erwärmt sich auch der städtische Untergrund, der sich verformt und dadurch die strukturelle Integrität und Funktionalität der baulichen Infrastruktur beeinträchtigen kann. Wachsende Megastädte führen zudem zu einer steigenden Nachfrage nach funktionierenden Ver- und Entsorgungssystemen im Untergrund. Die Geowissenschaften sind gefordert, die negativen Folgen abzumildern und nachhaltige Ver- und Entsorgungssysteme zu ermöglichen.

### a) Wie bauen wir (in) Zukunft?

Urbane Räume bieten sowohl Herausforderungen als auch Potenzial für neue Wege zur Nachhaltigkeit. Zum einen ist die städtische Infrastruktur und Energieversorgung entscheidend für das Erreichen des Netto-Null CO<sub>2</sub> Emissionszieles. Dafür kann das geothermische Potenzial des städtischen Untergrundes genutzt werden, sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen. Um die Belastung der Bevölkerung durch Straßenverkehr und gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, kann Verkehr in und aus den Megastädten mittels neuer Transportsysteme in den Untergrund verlagert werden. Strategien der Sekundärrohstoffnutzung innerhalb der Städte leisten einen wichtigen Beitrag zu einer kreislauforientierten Rohstoffnutzung und zum Erreichen weiterer Nachhaltigkeitsziele. Die energieintensive Erzeugung, Beschaffung und Entsorgung von Rohstoffen kann so reduziert und natürliche Ressourcen geschont werden. Darüber hinaus gewährleistet der städtische Untergrund die nachhaltige Trinkwasserversorgung der Stadtbevölkerung. Die Zahl der Megastädte mit mehr als zehn Millionen Einwohnern wird voraussichtlich von 31 im Jahr 2023 auf 43 im Jahr 2030 zunehmen. Viele der notwendigen urbanen Infrastrukturen existieren noch nicht – diese klimagerecht und angepasst an die neuen Bedingungen auch im Untergrund zu entwickeln kann als Chance genutzt werden.

Die Geowissenschaften tragen durch ihre Expertise dazu bei: auf der Basis großräumig erfasster Daten zur Abschätzung und dem Management von Georisiken, der Bewertung von Wasser- und Wärmeressourcen, der Materialexploration und der Erschließung untergründiger Infrastruktursysteme. So wird die sichere und nachhaltige Nutzung begrenzter Ressourcen im Lichte der wachsenden Megastädte ermöglicht.

Entscheidend ist dabei, die ober- und unterirdische städtische Umwelt als ein umfassendes System mit komplexen, voneinander abhängigen Verbindungen und Rückkopplungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Lithosphäre und Anthroposphäre zu betrachten (Infobox Komplexe Systeme). Durch die Charakterisierung von Wasser-Wärme-Material-Wechselwirkungen und deren Betrachtung aus verschiedenen interdisziplinären Perspektiven können tragfähige Lösungen entwickelt werden. Zu den folgenden Themen tragen die Geowissenschaften in besonderer Weise bei.

**Wassermanagement.** Ein effizientes Wassermanagement dient der Vermeidung von Überschwemmungen und dem kontinuierlichen Befüllen der Grundwasserspeicher. Das „Schwammstadt“-Konzept dient beiden Zwecken: es soll Überschwemmungen durch ein Versickerungsmanagement vermindern und unterirdische Speicherkapazitäten bereitstellen. Die Wasseraufnahme soll durch Sickerschächte, durchlässige Beläge, begrünte Flächen und Versickerungsbecken erhöht werden. Die wirksame Anwendung von Schwammstadtkonzepten erfordert hydrogeologische Kenntnisse und ein angepasstes Monitoring. Auch soll verhindert werden, dass ein Ansteigen oder Absinken des Grundwassers zu Schäden an der kritischen städtischen Infrastruktur führt. Abwasser kann als Nährstoff- und Wertstoffquelle (Stichwort „Water Mining“) erschlossen werden. Städtische Gebiete sind oftmals einer Verschmutzung durch Schadstoffe ausgesetzt, die das Grundwasser unter und um Städte herum kontaminieren können. Dies erfordert eine integrierte städtische Wasserbewirtschaftung. Durch Datenintegration und -extrapolation können dazu Oberflächendaten mit Informationen über unterirdische Strukturen wie Tunnel, Rohrleitungen, Keller, Aufschüttungen und mit dem geologischen Untergrund kombiniert werden.

**Optimierung von Rohstoffzyklen.** Die geowissenschaftliche Forschung trägt zur Erforschung von Alternativen zu herkömmlichen Baumaterialien bei. So kann die Verwendung von geo- oder bio-inspirierten Materialien an der Außenseite von Gebäuden zur Temperaturregulierung beitragen. Die Entwicklung von Ersatzstoffen für Portlandzement (3.3 Geoinspirierte Materialien) oder, wenn dies nicht gelingt, die Kohlenstoffabscheidung bei der Zementherstellung ist von entscheidender Bedeutung für die Verringerung der negativen Klimawirkungen des Städtebaus durch CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine weitere Aufgabe für Geowissenschaften in Städten ist die Erschließung von Sekundärrohstoffen. Am Ende ihres Lebenszyklus sammeln sich die Abfälle von Konsum- und Investitionsgütern besonders in urbanen Räumen an. Damit entstehen anthropogene Lagerstätten, die eine potenzielle Ressource für wiedernutzbare Rohstoffe darstellen und einen Beitrag zur Reduktion von Rohstoffimporten, vor allem von kritischen Elementen, leisten können (3.1 Mineralische Rohstoffe). Dafür ist bereits bei der Herstellung der gesamte Lebenszyklus der Materialien zu bedenken. Das Wissen über die Struktur und Inhalte dieser anthropogenen Lagerstätten sowie Verfahren zur Erschließung ihrer Wertstoffe ist für eine langfristige Planung der urbanen Stoffströme erforderlich.

**Wärmemanagement in Städten.** Der städtische Untergrund kann durch seine vergleichsweise konstanten Temperaturen zur Wärmeversorgung in kalten Wintern und zum Kühlen in heißen Sommern genutzt werden (Infobox Nutzung des Untergrundes). Daneben kann bei industriellen Prozessen anfallende Abwärme im Untergrund gespeichert und bei Bedarf zurückgewonnen werden. Wasser in Form von Grundwasser im städtischen Untergrund, sowie als Grubenwasser in stillgelegten Bergwerken oder künstlich angelegten Speicherbecken, ist besonders als günstiges thermisches Speichermedium geeignet. Die Geowissenschaften liefern mittels Überwachung von Grundwasser und Wärme im städtischen Untergrund, Charakterisierung geologischer und thermischer Eigenschaften und 3D-Modellierung der Untergrundbedingungen die Grundlagen für den sicheren Bau und effizienten Betrieb von unterirdischen Energiesystemen. Dabei werden oberflächennahe geothermische Potenziale für erdgekoppelte Wärmepumpen ermittelt und städtische Wärme- und Energieflüsse modelliert. Ressourcen und Risiken für die Nutzung von Grubenwasser und tiefen geothermischen Energiequellen werden abgeschätzt, sowie mögliche Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf das Grundwasser und den städtischen Untergrund als Baugrund untersucht.

**Georisiken und Risikomanagement:** Die Auswirkungen von Extremereignissen werden zunehmend die Infrastruktur der urbanen Zentren und entstehenden Megacities gefährden. Kaskadierende oder kumulierende Ereignisse können sich aus dem dynamischen Zusammenspiel einzelner Prozesse entwickeln und das Risiko potenzieren. So können z. B. Erdbeben Tsunamis auslösen und damit die Städte zusätzlich bedrohen. Der Klimawandel und menschliche Aktivitäten verschärfen einige Gefahren, z. B. Erdrutsche, die durch extreme Niederschlagsereignisse ausgelöst werden, oder induzierte Seismizität, die durch die Injektion von Flüssigkeiten entstehen kann. Die Geowissenschaften entwickeln Frühwarnsysteme und Strategien zur Eindämmung von Naturgefahren. Sie können Beiträge zur Reduzierung von Risiken beisteuern. Seismische Risiken können mittels erwartbarer Bodenvibration, in Verbindung mit einer höheren 3D Auflösung von Verstärkungs- und

Dämpfungsmechanismen gefährdeter Infrastrukturen vorhergesagt werden. Die Erkenntnisse können genutzt werden, um die Bauordnungen für ein erdbebensicheres Bauen zu implementieren.

## b) Rückgekoppelte Prozesse und naturbasierte Lösungen

Kenntnis der komplex rückgekoppelten Prozesse in urbanen Räumen bietet eine wesentliche Grundlage für die Minderung der Gefährdungen. Dazu gehört das Verständnis der hydraulischen Verbindung zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken ebenso wie das der Wechselwirkung von Klima und Wasserhaushalt und damit auch grundwasserspiegelabhängigen Hebungen und Senkungen. In Verbindung mit Multisensornetzwerken können die dynamischen Veränderungen im Grundwasser beobachtet, mit erwarteten hydrogeologischen Veränderungen verglichen und bei Abweichungen bzw. bei Überschreitung von Warnschwellen in Frühwarnsysteme integriert werden. Je detaillierter unser Prozessverständnis ist, desto präziser können Warnschwellen definiert und für höhere Resilienz der urbanen Räume genutzt werden.

Die Wirkung von „naturbasierten Lösungen“ sind ein Schlüsselement der Anpassung an den Klimawandel. Gesunde Korallenriffe oder Mangrovensümpfe tragen zum Küstenschutz der Städte bei. Viele Städte liegen an großen Flüssen, die durch die Renaturierung von Talauen im Oberlauf wirksam vor Hochwasser geschützt werden können. Auch Bäume und Parkanlagen in Städten stellen bereits naturbasierte Lösungen dar, die die Umgebungsluft kühlen und feucht halten, sowie die Versickerung von Wasser und Filterung von Schadstoffe aus der Umgebungsluft fördern. Die Erhöhung des Grünflächenanteils stellt eine der wirkungsvollsten Maßnahmen gegen die Folgen des Klimawandels in Städten dar und wirkt gleichzeitig dem Rückgang der biologischen Vielfalt entgegen.

## c) Methoden

**Überwachung und Monitoring.** Für die geowissenschaftliche Forschung liegt die Priorität heute auf der Entwicklung von Strategien zur Lösung der oben genannten Herausforderungen. Wichtig ist eine dichte Beobachtungsinfrastruktur: mithilfe lokaler, multiparametrischer Beobachtungsstationen und hochauflösender Fernerkundungstechniken können wir die städtische Oberfläche und den Untergrund im Detail charakterisieren. Seismische und hydrogeologische Beobachtungen bieten so die Möglichkeit, Wärme und Wasser, sowie Veränderungen des Untergrunds und des Bodens zu überwachen. Diese Art der Beobachtung erfordert die Verknüpfung mit Daten aus anderen Messnetzwerken, z. B. zu Bodenbeschaffenheit und atmosphärischen Beobachtungen.

In urbanen Räumen können geophysikalische, chemische, biologische und mineralogische Verfahren mit fernerkundlichen Untersuchungen gekoppelt werden. Darüber hinaus bieten Städte die Möglichkeit, Infrastrukturen wie z. B. Glasfaserkabel als Sensorik (Infobox Umweltseismologie) für Veränderungen im Untergrund zu nutzen. Die Digitalisierung und Bereitstellung von historischen Daten machen diese wertvollen Informationen besser zugänglich für die geowissenschaftliche Stadtforschung. Für ein integriertes, unterirdisches Stadtmanagement müssen zudem geowissenschaftliche Fachdaten (z. B. zu Grundwasser, geothermischen Nutzungen und Oberflächengewässern) in zentrale, einheitliche Datenbanken überführt werden.

**Modellansätze für die Stadt.** Um die Dynamik einzelner Kreisläufe (z. B. Wasser-, Wärme- und Stoffkreisläufe) in städtischen Umgebungen im Kontext ihrer wechselseitigen Beziehungen einzuordnen, benötigen wir Prozessmodelle und umfassendere Datensätze. Algorithmen des maschinellen Lernens können uns helfen, komplexe Beziehungen zwischen den verschiedenen Prozessen zu erkennen und die Modellgenauigkeit zu verbessern. Die Entwicklung hochauflösender numerischer Modelle ermöglicht es, „digitale Zwillinge“ städtischer Systeme zu erstellen, die sowohl ober- als auch unterirdische Komponenten umfassen.

CIM („City Information Modelling“) ist angelehnt an Gebäudeinformationsmodellierung („Building Information Modelling BIM“) und ist eine digitale Methode zur Unterstützung der unterirdischen Stadtplanung. Eine geobasierte Untervariante „Geo-CIM“ wurde vorgeschlagen. Hier sollen geowissenschaftliche Daten, die evidenzbasiert und digital aufbereitet sind,

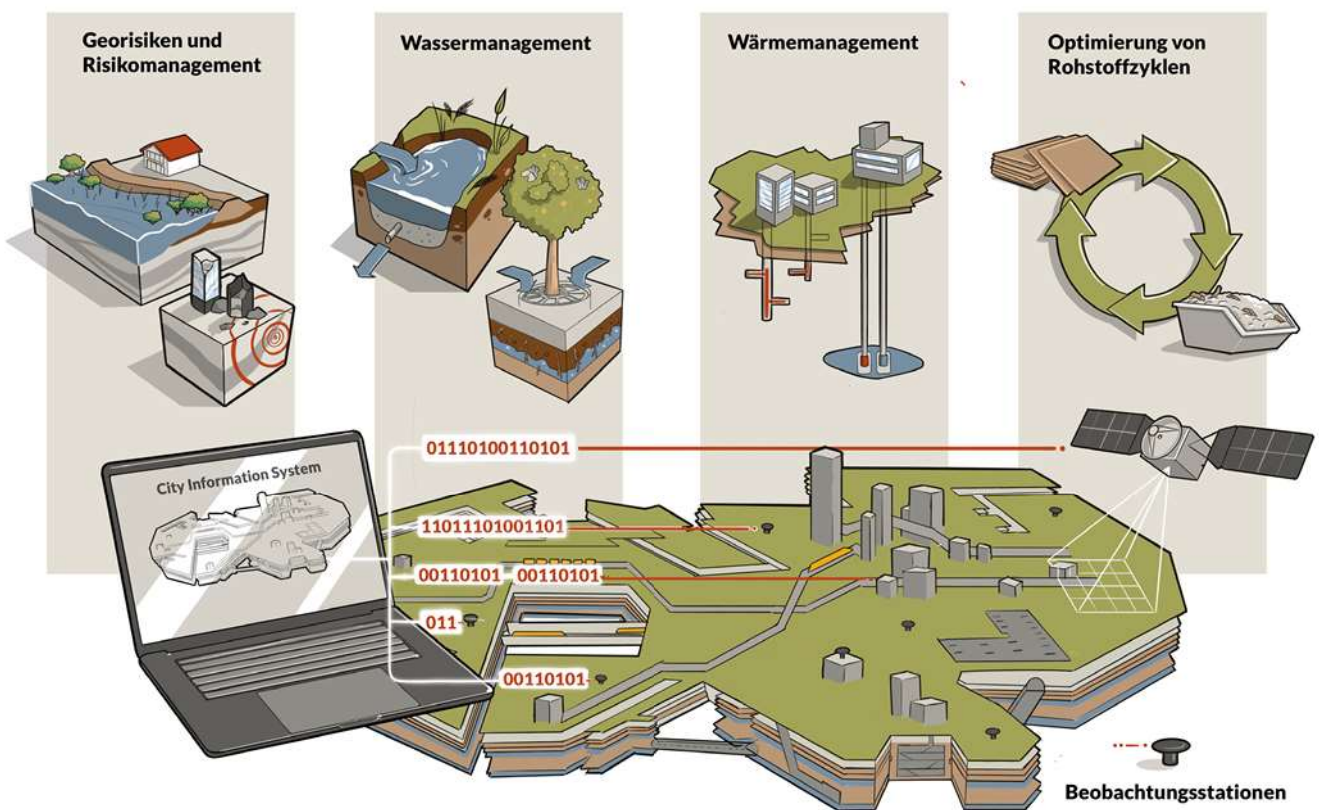
eingesetzt werden. Sie sollen Entscheidungen durch Stadtentwickler ermöglichen, bei denen die lokalen geologischen Bedingungen berücksichtigt werden. Schließlich ist die gängige Praxis, einzelne städtische Gebiete isoliert zu behandeln, zu überdenken. Ein einzugsgebiets- und systembasierter Ansatz, der das weitere hydrologische und ökologische Umfeld einbezieht, ist erforderlich. So können die Auswirkungen des Klimawandels, der Ressourcen- und Abfallströme und der veränderten Flächennutzung für die Entwicklung der Städte von morgen zu antizipiert werden.

**d) Schnittstellen zu anderen Bereichen**

Urbane Geowissenschaften können nicht ohne eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Meteorologen, (Bau-)Ingenieuren (Infobox Nutzung des Untergrunds), Hydro(geo)loginnen (2.3 Unsichtbares Wasser) oder Landschaftsarchitekten sowie Chemikerinnen und Verfahrenstechniken aus dem Reststoff- und Bausektor (3.5 CO<sub>2</sub> Entnahme) durchgeführt werden. Die geowissenschaftlichen Erkenntnisse werden mit Behörden, Versicherungsgesellschaften, Stadtplanungs-, und Architekturbüros geteilt und in den gemeinsamen Diskurs zur Entwicklung neuer Städte oder deren Anpassung an den Klimawandel eingebracht.

**e) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Aufbauend auf der EU COST-Action TU1206 Sub-urban will die Urban Geology Expert Group (UGEG) die Wissenslücke zwischen Untergrundexperten und städtischen Praktikern (Stadtplanern, Architekten und politischen Entscheidungsträgern) schließen und geowissenschaftliche Informationen und Erkenntnisse in Politik, Gesetzgebung und Industriepraxis verankern. Im Rahmen des paneuropäischen COST-Programms (European Cooperation in Science and Technology), MINEA (Mining the European Anthroposphere) wurden von 2015–2020 u. a. Strategien für Urban Mining bearbeitet.



Die vier Komponenten der Urbanen Geowissenschaften zur Gestaltung der Städte von morgen.

## 3.5 CO<sub>2</sub>-Entnahme – ein Beitrag zu „Netto-Null“

Die Entnahme von CO<sub>2</sub> an der Quelle der Emissionen oder aus der Luft und seine Speicherung sind mittlerweile fester Bestandteil aller Szenarien zur Eindämmung des anthropogenen Klimawandels. Jedoch sind sie bisher weitgehend unerprobt oder stehen nicht annähernd in dem Maßstab zur Verfügung, in dem sie eine spürbare Rolle spielen können. Dabei besteht der dringendste Forschungsbedarf in der Entwicklung von Verfahren zum effizienten Einsatz der benötigten natürlichen Ressourcen, der sicheren und dauerhaften Speicherung mit minimalen Nebenwirkungen, und der Quantifizierung der Menge des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>.

Die Minderung der klimaschädlichen Treibhausgasemissionen der Weltgemeinschaft reicht nach derzeitigem Stand nicht zum Einhalten vereinbarter Erwärmungsgrenzen aus. Deshalb müssen gemäß einiger Szenarien im 6. IPCC Sachstandsbericht im Jahr 2040 jährlich bis zu 10 Milliarden Tonnen atmosphärischen CO<sub>2</sub> wieder eingefangen werden. Dies entspricht ungefähr einem Viertel der derzeitigen weltweiten Emissionen und ist bisher nicht annähernd realisierbar. Die Geowissenschaften spielen bei der Entwicklung dieser bis dato in diesem Maßstab unerprobten Methoden eine herausragende Rolle.

### a) Was bedeutet CO<sub>2</sub> „neutral“, „netto“, „negativ“, und „entnommen“?

1) **CO<sub>2</sub> Neutralität durch Kompensation** bedeutet, dass für jede emittierte Tonne anthropogenes CO<sub>2</sub> eine entsprechende Menge CO<sub>2</sub> durch Kohlenstoffbindung aus der Atmosphäre entnommen wird. 2) **Netto-Null** bedeutet, dass trotz Minderungsmaßnahmen verbleibende überschüssige CO<sub>2</sub> Mengen aus der Atmosphäre entfernt werden („**Negative Emissionen**“). 3) Bei „**Carbon Capture and Storage (CCS)**“ wird an der Quelle entstehendes CO<sub>2</sub> direkt abgefangen und eingelagert. Alle drei Konzepte werden derzeit in Politik und Wissenschaft als entweder überbrückende oder zusätzliche Komponenten eines umfassenden Klimaschutzes diskutiert.

### b) Techniken der CO<sub>2</sub>-Bindung

Die derzeit vorgeschlagenen Techniken können in zwei Arten gegliedert werden: (i) **Techniken, die Mineralisierung nutzen**. Diese nutzen die chemische Reaktion von CO<sub>2</sub>-Gas zu anorganischen Kohlenstoff-Formen. Hier werden die beschleunigte Gesteinsverwitterung, Ozean Alkalinisierung, und Carbon Capture and Storage vorgestellt. (ii) **Techniken, die Biomasse nutzen**. Bei diesen reagiert CO<sub>2</sub>-Gas zu organischem Kohlenstoff durch Photosynthese. Sie umfassen Aufforstung und Wiederaufforstung, Moorwiedervernässung, Erhöhung von Kohlenstoff in Böden und Biochar-Einlagerung. Da diese Lösungen eher von den Forst-, landwirtschaftlichen und bodenkundlichen Disziplinen bearbeitet werden, konzentrieren wir uns hier auf die Techniken zur Mineralisierung (i). Bei den hier angegebenen Abschätzungen zum globalen CO<sub>2</sub>-Speicher-Potenzial folgen wir der Einschätzung von Fuss et al. (2018). Diese ist, wie auch andere Einschätzungen, mit großen Unsicherheiten behaftet. Auch bezieht sie sich primär auf die methodische Machbarkeit. Aspekte der gesellschaftlichen Umsetzung (wie Nutzungskonflikte um Flächen; Umweltschutz, Finanzierung) bezieht sie nicht explizit mit ein. Insofern stellt sie maximal erreichbare Potenziale dar. Der zu erwartende CO<sub>2</sub>-Entzug wird vermutlich weit kleiner ausfallen.

**Beschleunigte Gesteinsverwitterung.** Hier wird ein Prozess ausgenutzt, den das Erdsystem ohnehin ständig durchführt: der Entzug von atmosphärischem CO<sub>2</sub> durch Gesteinsverwitterung. Indem man Calcium- und Magnesium-reiches Gesteinspulver, z. B. gemahlene Basalt- oder ultramafische Gesteine (wie Dunit), auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausbringt, beschleunigt man diesen Prozess. Gelöste Kohlensäure im Boden reagiert mit dem Gesteinspulver und wandelt CO<sub>2</sub> erst in Hydrogenkarbonat um, das zusammen mit Calcium und Magnesium aus dem Gesteinspulver im Flusswasser in die Ozeane (und nach Tausenden von Jahren in neues Kalkgestein) gelangt. Die Stabilität des im Ozean oder in Kalkgestein gebundenen CO<sub>2</sub> ist ein großer Vorteil. Außerdem müssen keine zusätzlichen Flächen bereitgestellt werden, auch Waldgebiete sind geeignet. Das Basaltpulver erhöht zugleich den pH-Wert des Bodens und liefert Nährstoffe wie Kalium und Phosphor. Die chemische Reaktion läuft optimal bei Wärme und hoher Bodenfeuchtigkeit ab und in Böden, die durch vorherige geologische Verwitterung bereits an Calcium- und Magnesium-reichen Mineralen abgereichert sind



(vor allem in den warm-feuchten Zonen von Brasilien, China, südliche USA und Afrika). Das Potenzial beträgt zwischen 2–4 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Für jede Tonne CO<sub>2</sub> müssen, je nach Gesteinsart und Feinheit des Pulvers, 1–3 Tonnen Gestein gemahlen und transportiert werden. Je feiner das Pulver, desto höher die Auflöserate. Die Nachteile und Risiken der Methode liegen in dem gewaltigen Energieaufwand für das Mahlen der Gesteine und dem Transport auf die Nutzflächen. Deshalb ist die Methode nur nach einem so großen Ausbau der erneuerbaren Energien effektiv, dass ein Überschuss für diese Verwendung gewährleistet ist. Mit den Gesteinen können auch toxische Elemente in die Böden eingetragen werden. Wann CO<sub>2</sub> als entzogen gilt, ist derzeit mangels geeigneter Messverfahren und eines Rechtsrahmens umstritten: bereits bei der Anreicherung von Boden-CO<sub>2</sub> auf den Feldflächen (Lebensdauer von wenigen Jahrzehnten und geringe Stabilität), beim Abtransport als HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in Flüssen (Lebensdauer von Jahrzehnten), bei der Mischung des HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in die Ozeane (Jahrhunderte) oder Einlagerung in marine Kalkgerüste und -Schalen (Millionen Jahre). Für die Entwicklung unbestechlicher Zertifizierungsmethoden ist die geowissenschaftliche Forschung gefragt.

**Ozean Alkalinisierung.** Die chemische Reaktion von gelöstem CO<sub>2</sub> zu gelöstem HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Hydrogencarbonat) neutralisiert Säure im Ozean. Dieser Prozess tritt im natürlichen Kohlenstoffzyklus ständig auf. Um ihn zu beschleunigen soll Pulver aus Olivin, Brucit, Calcit, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> oder NaCO<sub>3</sub> im Ozean ausgebracht werden. So erfolgt ein Anstieg der Alkalinität (das Potenzial, Säure zu neutralisieren) und der Ozean kann vermehrt CO<sub>2</sub> aufnehmen. Eine weitere Technik ist die elektrochemische Entfernung von Säure aus Meerwasser. Das Potenzial der Methode ist ungewiss: Schätzungen reichen von 3 bis 30 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Großer Forschungsbedarf besteht zu vielen Fragen, z. B. zur Art der zugegebenen Stoffe. Karbonate lösen sich am schnellsten, liefern aber mit ihrer Alkalinität auch Kohlenstoff. Silikate lösen sich langsamer, bringen dafür aber keinen zusätzlichen Kohlenstoff in die Ozeane ein. Auch der Ort der Zugabe ist entscheidend: an Land mit Transport über Flüsse oder Grundwasser, in Küsten- und Schelfregionen oder im offenen Ozean. Karbonate lösen sich nicht in den großen Teilen des flachen Ozeanwassers, das an Kalziumkarbonat bereits übersättigt ist. Die Geschwindigkeit der Lösung kann durch fein gemahlene Minerale erhöht werden. Auch hier ist die Energiefrage kritisch. In Deutschland ist Feldforschung zu Ozean Alkalinisierung derzeit untersagt.

**Carbon Capture and Storage** bedeutet die Abscheidung von CO<sub>2</sub> an seiner Quelle oder aus der Umgebungsluft und seine anschließende Speicherung im Untergrund. Am effizientesten sind Methoden, die CO<sub>2</sub> direkt an der Quelle abscheiden und dann speichern. Dies ist in den hochkonzentrierten Abgasströmen an fossil betriebenen Elektrizitäts- oder Zementwerken der Fall, oder bei der Energieerzeugung durch Verbrennung mehrjähriger Gräser oder Energiehölzer (Bioenergy with Carbon Capture and Storage BECCS). Für die Entnahme aus der Atmosphärenluft wird diese direkt über einen chemischen Reaktor geströmt, in dem das CO<sub>2</sub> abgeschieden wird (Direct Air Capture and Carbon Storage DACCS). DACCS hat jedoch einen weit höheren Energiebedarf als die Gewinnung aus Punktquellen wie Rauchgas. Die Methode ist deshalb erst dann realistisch, wenn ein Überschuss an Energie zur Verfügung steht, der nicht aus fossilen Quellen stammt. Während die Abscheidung eine ingenieurtechnische Aufgabe ist, benötigt die Speicherung hohe geowissenschaftliche Expertise. Bei der geologischen Kohlenstoffspeicherung wird CO<sub>2</sub> in den Untergrund eingebracht und unter einer undurchlässigen Deckschicht in porenreichem Gestein eingeschlossen. Dort wird es über die Zeit in feste Minerale eingebaut, so dass es über Jahrtausende stabil bleibt. Tiefe saline Grundwasserleiter haben das größte CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial. Auch ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten werden als geeignete Speichermöglichkeit für CO<sub>2</sub> angesehen. Deren Deckschichten haben bereits über Jahrmillionen natürliche Gase zurückgehalten. Risiken bei der Einlagerung sind Mikroerdbeben durch induzierte Seismizität sowie Leckagen der Lagerstätte. Leckagen stellen ein überschaubares Risiko für die Umwelt dar. Doch wenn selbst geringe %-Mengen jedes Jahr den Weg zurück in die Atmosphäre finden, würden sie einen über 100 bis 1.000 Jahre wirksamen Klimaschutz zunichte machen. Für eine technisch sichere Umsetzung ist also umfassende geowissenschaftliche Forschung gefragt. Ebenso wichtig sind rechtliche Vorschriften, die derartige Risiken minimieren. Sie werden derzeit in verschiedenen Staaten und der EU entwickelt. Eine gewaltige Herausforderung ist die gigantische Differenz zwischen der derzeitigen Kapazität (in 2022 40 Millionen Tonnen durch CCS eingelagertes CO<sub>2</sub>) und dem Bedarf (6 Milliarden Tonnen im Jahr 2050 laut dem „Net Zero“ Szenario der International Energy Agency (IEA), oder gar bis zu 40 Milliarden Tonnen pro Jahr, um den CO<sub>2</sub> „Overshoot“ auszugleichen, falls nicht rasch entschiedene Emissionsreduzierungen durchgeführt werden.

**Weitere kombinierte technisch-biologische Ansätze:** Bei den Land-basierten Methoden soll mittels simultaner Anwendung von beschleunigter Verwitterung, Biochar, Bodenkohlenstoff-Erhöhung und erhöhtem Pflanzenwachstum die Menge an Kohlenstoffbindung pro Fläche weit optimal ausgenutzt werden, als dies mit den einzelnen Methoden möglich wäre. Bei Ozeandüngung soll die biologische Abscheidung von CO<sub>2</sub> im Ozean mittels Zugabe von Mikronährstoffen wie Eisen erhöht werden. Wegen der potenziell schnellen Re-Oxidierung des organischen Materials und der ungewissen ökologischen Nebenwirkungen hat Ozeandüngung derzeit ein sehr geringes Umsetzungspotenzial.

## c) Forschungsbedarf

Nur zu CCS wird international seit Jahrzehnten geforscht. Für alle anderen Methoden gibt es bisher keine aussagekräftigen großskaligen Feldexperimente. Für verlässliche technische, ökonomische und ökologische Analysen entstehen derzeit umfassende Forschungsaktivitäten. Die folgenden Fragen betreffen alle diese Analysen.

**Die eingesetzten Ressourcen und deren Bedarf.** Effiziente Verfahren müssen den Energiebedarf für die Herstellung und den Transport von Gesteinspulver bei der Verwitterung, und ebenso der Pulver oder Chemikalien für die Ozean Alkalinisierung minimieren. Diese Techniken werden erst sinnvoll, wenn die Energie aus regenerativen Verfahren gedeckt wird. Auch das Einfangen und Verpressen von CO<sub>2</sub> ist energieintensiv. Derzeit wird der Energiebedarf auf ein Drittel der Energie geschätzt, die bei emissionsproduzierenden Aktivitäten umgesetzt wird. Im Fokus der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion steht die Art der eingesetzten Ressourcen: Basaltpulver, Dunit oder gar industrielle Abfallprodukte wie gemahlener Beton oder Schlacken aus der Stahlproduktion oder unter hohem Energieaufwand hergestellte Chemikalien für Ozean-Alkalinisierung.

**Die Nebenwirkungen.** Die beschleunigte Verwitterung betrifft vor allem toxische Metalle (wie Ni), die mit ultramafischen Gesteinen in den Boden und somit in den Nährstoffkreislauf gelangen. Bei der Ozean Alkalinisierung betreffen die Nebenwirkungen den Eingriff in marine Ökosysteme durch Änderung des Kohlenstoffgleichgewichtes. Bei CCS betrifft es Mikroerdbeben, die sich aufgrund des massiven erforderlichen Ausbaus der Technik zu einem größeren Risiko für Infrastruktur entwickeln könnten. Diese Risiken müssen minimiert und klar kommuniziert werden, um die gesellschaftliche Umsetzung zu realisieren.

**Die Genehmigungsverfahren für Feldexperimente.** Die Forschung zu all diesen Maßnahmen wird derzeit von geochemischen und Transportmodellen und bei CCS zur Forschung induzierter Seismizität dominiert. Um die Effizienz des CO<sub>2</sub> Entzugs, die Stabilität der Speicherung und die Nebenwirkungen zu evaluieren sind langfristige Feldexperimente dringend notwendig. Für CCS wurde in Deutschland eine experimentelle Verpressungsanlage im schönen Ketzin zu Forschungszwecken genutzt. Diese ist mittlerweile abgewickelt. Ein geeigneter Rechtsrahmen entsteht derzeit in Deutschland. Die Deutsche Bundesregierung veröffentlichte im Jahr 2024 ihr Eckpunktepapier für eine „Carbon Management Strategie“ (CarbMS) sowie den Vorschlag für ein „Gesetz zur dauerhaften Speicherung und zum Transport von Kohlendioxid“.

**Die Quantifizierung der Menge des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> (auch „Monitoring, Reporting, Verification MRV“ genannt)** Dies ist die Hauptforschungsfrage zu den Methoden der negativen Emissionen. Es gibt für die negativen Emissionen noch keine einzige sichere Methode, die effektiv abgeschiedene Menge CO<sub>2</sub> zu quantifizieren. Diese Methoden zu entwickeln setzt einerseits Laborexperimente und ökologische wie auch geochemische Simulationsmodelle voraus. Vor allem benötigt es Messungen vor Ort, denn die Effizienz des Entzuges ist je nach Beschaffenheit des Bodens, des Ozeanwassers oder des Untergrundes heterogen. Die Stabilität des gebundenen Kohlenstoffes verändert sich zudem durch chemische Transformationen mit der Zeit. Es müssen Feldbeobachtungen auf kleinem, heterogenem Raum und über kurze Dauer auf (fast) globalen Maßstab und auf Tausende von Jahren durch Modelle extrapoliert und hochskaliert werden. Die Entwicklung international zertifizierter Verfahren zur Budgetierung des entzogenen CO<sub>2</sub> ist von hoher Dringlichkeit, da negative Emissionen in die Ökonomie der CO<sub>2</sub> Bepreisung integriert und darüber finanziert werden sollen. Bereits jetzt hat sich um negative Emissionen ein milliardenschwerer Markt für CO<sub>2</sub> Gutschriften entwickelt. Die bestehenden

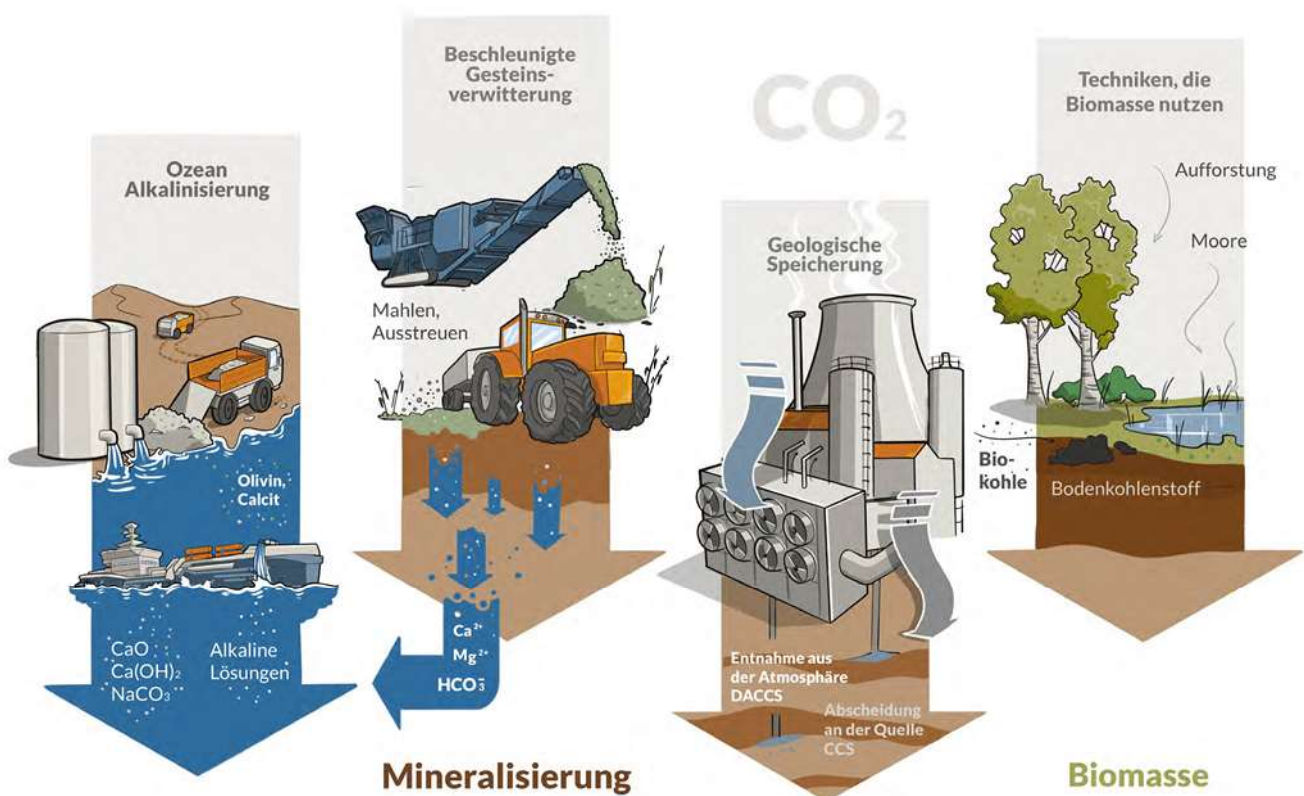
Unsicherheiten bei den Budgets laden geradezu ein, besonders „optimistische“ Entzugsquoten zu zertifizieren, die im schlimmsten Fall nicht annähernd den effektiv entzogenen Mengen CO<sub>2</sub> entsprechen. Zum Beispiel wurden dem Markt über das gesamte Portfolio der negativen Emissionstechnologien hinweg in den Jahren 2019–2023 ca. 700.000 Tonnen CO<sub>2</sub> zum Kauf angeboten, während tatsächlich der Atmosphäre in dieser Zeit nur ca. 75.000 Tonnen entzogen wurden (Mercer & Burke, siehe Literatur). Die Geowissenschaften stehen in der Verantwortung, diesen Prozess kritisch zu begleiten.

**d) Schnittstellen zu anderen Bereichen**

Dringend muss geowissenschaftliche Expertise in den Technologien zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aufgebaut werden. Die Technologien müssen in einem normativen Rahmen entwickelt werden, der insbesondere Gerechtigkeitsaspekte und das internationale Recht berücksichtigt (beispielsweise die UN Nachhaltigkeitsziele und das Pariser Klimaabkommen). Im Rahmen von Integrated Assessment Models müssen Ressourcennutzungskonflikte (Fläche, Wasser, Energie) (3.4 Urbane Geowissenschaften) und Nutzungskonflikte z. B. mit Biodiversitätsschutzbedarfen, Nahrungssicherheit oder der Verteilung erneuerbarer Energieverfahren abgeschätzt werden. Bezüglich der Nebenwirkungen bestehen große Schnittstellen zur Biologie (1.3 Biodiversität im Erdsystem) und Ökologie (2.3 Unsichtbares Wasser).

**e) Synergien mit internationalen Verbundprojekten und Infrastrukturen**

Zu den ozeanbasierten Methoden finanziert die EU im Horizon 2020 Programm das Projekt „Ocean Nets“ und zu den landbasierten negativen Emissionstechnologien „BAM Bio-Accelerated Mineral Weathering“. Im „The State of Carbon Dioxide Removal“ Bericht veröffentlicht ein Konsortium aus Großbritannien und Deutschland regelmäßig den Stand der Forschung.



Die vorgeschlagenen Maßnahmen, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre oder an der Quelle zu entnehmen und zu speichern.

## Nutzung des Untergrundes

Die effiziente Nutzung des geologischen Untergrundes ist ein unerlässlicher Baustein, um die Entwicklung zu einer an Treibhausgasen emissionsarmen oder -freien Wirtschaft zu ermöglichen, gleichzeitig den Bedarf an Energie und natürlichen Ressourcen zu sichern. Hierfür Konzepte zu entwickeln stellt eine Kernkompetenz der Geowissenschaften dar. Die Nutzung des Untergrundes trägt zur Sicherung der Lebensbedürfnisse einer Weltbevölkerung bei, die bis zum Jahr 2100 auf ca. 10 Mrd. Menschen anwachsen wird. Der Untergrund kann für vier Zwecke genutzt werden: (i) für die Energieversorgung, (ii) zur Sicherstellung von Rohstoffen, (iii) als Energiespeicher und Speicherraum und (iv) als unterirdischer Lebens- und Arbeitsraum.

Der geologische Untergrund liefert Energieträger und Rohstoffe für die (Energie)versorgung und den Bau von Energieanlagen. Mit der grundlastfähigen Geothermie steht ein Energieträger zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks bereit, der sich bei geringem Flächenbedarf besonders gut für urbane Räume eignet. Die Geothermie kann für die gebäuderelevante Raumwärme und Warmwasser ausgebaut werden. Ihr Beitrag könnte etwa ein Drittel des deutschen Endenergiebedarfs ausmachen. Im Thermalwasser gelöste Rohstoffe (z. B. Lithium) können gleichzeitig gewonnen werden und somit die Wirtschaftlichkeit der tiefen Geothermie verbessern. Natürlich im Untergrund gebildeter (weißer) Wasserstoff ist ein neuer, potenzieller Energieträger, dessen Vorkommen es zu erkunden und ggfs. zu erschließen gilt (2.3 Natürlicher Wasserstoff).

Wichtigster Rohstoff ist das Grundwasser in den obersten Schichten der Erde, das als Trinkwasser, zur Bewässerung und als Prozesswasser benötigt wird (2.3 Unsichtbares Wasser). Die stoffliche Nutzung von mineralischen Rohstoffen und Kohlenwasserstoffen liefern u. a. Baustoffe, Metalle und Kunststoffe. Ein stark wachsender Bedarf, auch von kritischen und strategischen Rohstoffen, kann nur durch Bergbau – begleitet von einer erhöhten Kreislaufführung – gedeckt werden (3.1 Mineralische Rohstoffe). In den letzten Jahrzehnten wurde die Suche nach und die Erschließung von Lagerstätten mit modernen Konzepten und neuen Technologien in Deutschland kaum durchgeführt. Laut EU-Verordnung von 2023 besteht die Vorgabe mindestens 10 % des jährlichen Verbrauchs dieser Rohstoffe zukünftig in der EU zu fördern. Deutschland ist kein rohstoffarmes Land, und nicht nur im „Erz“gebirge besteht ein Potential für Rohstoffgewinnung. Wegen des geringeren Flächenbedarfs kann neuer Bergbau im dicht besiedelten Deutschland untertage, also im Untergrund stattfinden.

Für die geplante Umstellung der Energiesysteme auf erneuerbare Quellen werden Energiespeicher benötigt, deren Kapazitäten im TWh-Bereich ein Vielfaches der zur Verfügung stehenden Batterie- und Wasserkraftspeicher betragen. Dafür können emissionsarm produzierter Wasserstoff und Derivate untertage in Kavernen, Kluft- und Porenspeichern in großen Volumina nicht nur kurzfristig, sondern auch saisonal gespeichert werden. In kleineren Dimensionen können überschüssige Wärme und Kälte saisonal im Untergrund zwischengespeichert werden. Die dauerhafte Speicherung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> ist in Deutschland möglich (CCS – Carbon Capture and Storage; 3.5 CO<sub>2</sub> Entnahme), aber derzeit nur offshore erlaubt. Schließlich müssen in ausreichender Tiefe und geologisch geeigneten Gesteinsschichten auch toxische und radioaktive Abfälle dauerhaft sicher entsorgt werden.

Die Urbanisierung wird zur Ausweitung von Infrastruktur und Leben im Untergrund führen (3.4 Urbane Geowissenschaften). Auch für den Bevölkerungsschutz ist der Untertagebau notwendig. Durch neue Mobilitätssysteme in möglichen Vakuumröhren könnte die Nutzung des geologischen Untergrundes weiter an Bedeutung gewinnen.

Eine solche effiziente Nutzung setzt voraus, dass unausweichlich auftretende Nutzungskonflikte auf Grundlage einer 3D-Raumplanung des geologischen Untergrundes vermieden werden. Es muss deshalb das Ziel innovativer Forschung sein, neben naturwissenschaftlichen Prozessinteraktionen zwingend auch sozioökonomische Aspekte, ökologische Nachhaltigkeit und gesellschaftlichen Diskurs zu integrieren.

## Zusammenfassung und Empfehlungen

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022). Zukunftsreport Wissenschaft. Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Halle (Saale), [doi.org/10.26164/leopoldina\\_03\\_00590](https://doi.org/10.26164/leopoldina_03_00590)

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.org/10.17226/25761](https://doi.org/10.17226/25761)

Cloetingh S, Sternai P, Koptev A, Ehlers TA, Gerya T, Kovács I, Oerlemans J, Beekman F, Lavallée Y, Dingwell D, Békési E, Porkoláb K, Tesauero M, Lavecchia A, Botsyun S, Muller V, Roure F, Serpelloni E, Matenco L, Castelltort S, Giovannelli D, Brovarone AV, Malaspina N, Coletti G, Valla P, Limberger J (2023). Coupled surface to deep Earth processes: Perspectives from TOPO-EUROPE with an emphasis on climate- and energy-related societal challenges. *Global and Planetary Change* 226, [doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104140](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104140)

### 1.1 Dynamik des Erdinneren

Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032 (2022). US National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, [nap.nationalacademies.org/resource/26522/interactive](https://nap.nationalacademies.org/resource/26522/interactive)

### 1.2 Koentwicklung Erde Leben

Canfield D E (2014). *Oxygen: A Four Billion Year History*. Princeton University Press, 196 pp. ISBN: 978-0-691-14502-0

Hallmann C, French KL, Brocks JJ (2022). Biomarkers in the Precambrian: Earth's ancient sedimentary record of life. *Elements*, 18(2), 93-99, [doi.org/10.2138/gselements.18.2.93](https://doi.org/10.2138/gselements.18.2.93)

Holland H D (1984, 2020). *The chemical evolution of the atmosphere and oceans*. Princeton University Press, 598 pp. ISBN: 9780691220239, [doi.org/10.1515/9780691220239](https://doi.org/10.1515/9780691220239)

Zalasiewicz J (2010). *The Planet in a Pebble. A Journey into Earth's Deep History*. Oxford University Press, 234 pp. ISBN: 978-0-19-956970-0

### 1.3 Biodiversität im Erdsystem

Antonelli A, Kissling WD, Flantua SGA, Bermúdez MA, Mulch A, Muellner-Riehl AN, Kreft H, Linder HP, Badgley C, Fjeldså J, Fritz SA, Rahbek C, Herman F, Hooghiemstra H, Hoorn C (2018). Geological and climatic influences on mountain biodiversity. *Nature Geoscience* 11:718-725, [doi.org/10.1038/s41561-018-0236-z](https://doi.org/10.1038/s41561-018-0236-z)

Hagen O (2023). Coupling eco-evolutionary mechanisms with deep-time environmental dynamics to understand biodiversity patterns. *Ecography* 2023:e06132, [doi.org/10.1111/ecog.06132](https://doi.org/10.1111/ecog.06132)

Hoorn C, Wesselingh FP, ter Steege H, Bermudez MA, Mora A, Sevink J, Sanmartín I, Sanchez-Meseguer A, Anderson CL, Figueiredo JP, Jaramillo C, Riff D, Negri FR, Hooghiemstra H, Lundberg J, Stadler T, Särkinen T, Antonelli A (2010). Amazonia Through Time: Andean Uplift, Climate Change, Landscape Evolution, and Biodiversity. *Science* 330:927-931

Tréguer P, Bowler C, Moriceau B, Dutkiewicz S, Gehlen M, Aumont O, Bittner L, Dugdale R, Finkel Z, Iudicone D, Jahn O, Guidi L, Lasbleiz M, Leblanc K, Levy M, Pondaven P (2018). Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nature Geoscience* 11:27-37, [doi.org/10.1038/s41561-017-0028-x](https://doi.org/10.1038/s41561-017-0028-x)

### 1.4 Kryosphären

Thomas N, Becerra P, Smith I B (2022). Mars and the ESA Science Programme—the case for Mars polar science. *Experimental Astronomy*, 54(2-3), 677-693, [doi.org/10.1007/s10686-021-09760-6](https://doi.org/10.1007/s10686-021-09760-6)

Grasset O, Dougherty M K, Coustenis A, Bunce E J, Erd C, Titov D, Van Hoolst T et al (2013). JUperiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. *Planetary and Space Science*, 78, 1-21, [doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002](https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002)

Pappalardo RT, Buratti B J, Korth H, Senske D A, Blaney D L, Blankenship D D, Niebur C et al. (2024). Science Overview of the Europa Clipper Mission. *Space Science Reviews*, 220(4), 1-58, [doi.org/10.1007/s11214-024-01070-5](https://doi.org/10.1007/s11214-024-01070-5)

Klenner F, Baqué M, Beblo-Vranesevic K, Bönigk J, Boxberg M, Dachwald B, de Vera J P P (2024). Icy ocean worlds-astrobiology research in Germany. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 11, 1422898, [doi.org/10.3389/fspas.2024.1422898](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1422898)

## 1.5 Magma Vulkanismus

Sigurdsson H (1999). *Melting the Earth: The History of Ideas on Volcanic Eruptions*. Oxford University Press, 272 pp

Oppenheimer C (2023). *Mountains of Fire: the Secret Lives of Volcanoes*. Hodder Press, 368 pp

Platz T, Byrne PK, Massironi M, Hiesinger H (2015). Volcanism and tectonism across the inner solar system: an overview. *Geological Society, London, Special Publications*, 401(1), 1–56, [doi.org/10.1144/SP401.22](https://doi.org/10.1144/SP401.22)

## 2.1 System Erdkruste

Anderson DL (2007). *The New Theory of the Earth*. Cambridge University Press, New York

Bar-Yam Y (1997). *Dynamics of complex systems*. Addison Wesley

Hergarten S (2002). *Self-Organized Criticality in Earth Systems*. Springer

Mitchell M (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press

## 2.2 Dynamik der Erdoberfläche

Lenton T M, Armstrong McKay D I, Loriani S, Abrams J F, Lade S J, Donges J F, Milkoreit M, Powell T, Smith SR, Zimm C, Buxton J E, Bailey E, Laybourn L, Ghadiali A, Dyke J (eds) (2023). *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK, [global-tipping-points.org](https://global-tipping-points.org)

Moore J C (2018) Predicting tipping points in complex environmental systems, *Proceedings National Academy of Sciences* 115, 635-636, [doi.org/10.1073/pnas.1721206115](https://doi.org/10.1073/pnas.1721206115)

Scheffer M (2009). *Critical Transitions in Nature and Society*, Princeton University Press

Koppers, A.A.P., and R. Coggon, eds. 2020. *Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling: 2050 Science Framework*. 124 pp., [doi.org/10.6075/J0W66J9H](https://doi.org/10.6075/J0W66J9H)

## 2.3 Unsichtbares Wasser

Gleeson T, Wagener T, Doell P, Bierkens M, Wada Y, Lo M-H, et al. (2021). GMD Perspectives: Improving the evaluation of groundwater representation in continental to global scale models. *Geosci. Model Dev.*, 14, 1–27, [doi.org/10.5194/gmd-14-7545-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-7545-2021)

Leese et al. (2021). *Wassersysteme im Wandel – Herausforderungen und Forschungsbedarfe für die deutsche Wasserforschung*. Hrsg: Water Science Alliance e.V.

Micallef A, Person M, Berndt C, Bertoni C, Cohen D, Dugan B, et al. (2021). Offshore freshened groundwater in continental margins. *Rev. Geophys.* 59, e2020RG000706, [doi.org/10.1029/2020RG000706](https://doi.org/10.1029/2020RG000706)

United Nations, The United Nations World Water Development Report (2022). *Groundwater: Making the invisible visible*. UNESCO, Paris, [undp.org/publications/united-nations-world-water-development-report-2022-groundwater-making-invisible-visible](https://undp.org/publications/united-nations-world-water-development-report-2022-groundwater-making-invisible-visible)

## 2.4 Big Data

Dramsch J S (2020) 70 years of machine learning in geoscience in review. *Advances in Geophysics*, 61, 1-55.

Vance TC, Huang T, Butler KA (2024). Big data in Earth science: Emerging practice and promise. *Science* 383, [doi.org/10.1126/science.adh9607](https://doi.org/10.1126/science.adh9607)

Karpatne A, Ebert-Uphoff I, Ravela SC, Babaie HA, Kumar V (2017). Machine Learning for the Geosciences: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31, 1544-1554, [doi.org/10.1109/TKDE.2018.2861006](https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2861006)

Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N, Prabhat F (2019) Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743), 195-204

### 3.1 Mineralische Rohstoffe

DERA – Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023). DERA-Rohstoffliste 2023. – DERA Rohstoffinformationen 56: 122 S., Berlin, [bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2022.html](https://bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2022.html)

International Energy Association IAE (2021). Net zero by 2050. A roadmap for the global energy sector OECD (2018), [iea.org/reports/net-zero-by-2050](https://iea.org/reports/net-zero-by-2050)

Global Material Resources Outlook to 2060 (2019). Economic Drivers and Environmental Consequences, Global Material Resources Outlook to 2060. OECD Publishing, Paris, [doi.org/10.1787/9789264307452-en](https://doi.org/10.1787/9789264307452-en)

Earth Mapping Resources Initiative (Earth MRI), USA, [usgs.gov/special-topics/earth-mri/about](https://usgs.gov/special-topics/earth-mri/about)

### 3.2 Natürlicher Wasserstoff

Demouchy S, Bureau H, Keppler H (2024). The Invisible Ocean: Hydrogen in the Deep Earth. *Elements Magazine* Volume 20 Number 4, [doi.org/10.2138/gselements.20.4.223](https://doi.org/10.2138/gselements.20.4.223)

Hirose T, Kawagucci S, Suzuki K (2011). Mechanoradical H<sub>2</sub> generation during simulated faulting: Implications for an earthquake-driven subsurface biosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17303, [doi.org/10.1029/2011GL048850](https://doi.org/10.1029/2011GL048850)

Truche L, Donzé F-V, Goskolli E, Muceku B, Loisy C, Monnin C, Dutoit H, Cerepi A (2024). A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite: *Science*, v. 383, no. 6683, p. 618-621, [doi.org/10.1126/science.adk9099](https://doi.org/10.1126/science.adk9099)

Zgonnik V (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive Review. *Earth-Science Reviews*, 203, [doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140)

### 3.3 Geoinspirierte Materialien

Katiyar NK et al. (2022). Nature-inspired materials: Emerging trends and prospects, *NPG Asia Materials*, [doi.org/10.1038/s41427-021-00322-y](https://doi.org/10.1038/s41427-021-00322-y)

Portehault D et al. (2022). Geoinspired syntheses of materials and nanomaterials, *Chemical Society Reviews*, [doi.org/10.1039/D0CS01283A](https://doi.org/10.1039/D0CS01283A)

Heuss-Aßbichler S, Amthauer G, John M Eds. (2018). Highlights in Applied Mineralogy, De Gruyter, [doi.org/10.1515/9783110497342](https://doi.org/10.1515/9783110497342)

Tribaudino M, Vollprecht D, Pavese A (2023). *Minerals and Waste*, Springer, [doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3)

### 3.4 Urbane Geowissenschaften

Bricker S, Jelenek J, van der Keur P, La Vigna F, O'Connor S, Ryzynski G, Smith M, Schokker J, Venvik G (2024). Geoscience for Cities: Delivering Europe's Sustainable Urban Future. *Sustainability* 2024, 16, 2559, [doi.org/10.3390/su16062559](https://doi.org/10.3390/su16062559)

British Geological Survey (2015). *Urban Geology – the foundation for cities*, [bgs.ac.uk/download/urban-geoscience-brochure](https://bgs.ac.uk/download/urban-geoscience-brochure)

Kraas F, Aggarwal S, Coy M, Mertins G (2014). *Megacities. Our Global Urban Future*. Springer Verlag.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2016). Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Berlin: WBGU, [wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte](http://wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte)

### 3.5 CO<sub>2</sub>-Entnahme

European Academies Science Advisory Council EASAC (2018). Negative emission technologies: What role in meeting Paris agreement targets? (Vol. 35), [interacademies.org/publication/negative-emission-technologies-what-role-meeting-paris-agreement-targets](http://interacademies.org/publication/negative-emission-technologies-what-role-meeting-paris-agreement-targets)

Fuss S, Lamb W F, Callaghan M W, Hilaire J, Creutzig F, Amann T, Beringer T, de Oliveira Garcia W, Hartmann J, Khanna T, Luderer G, Nemet G F, Rogelj J, Smith P, Vicente J L V, Wilcox J, del Mar Zamora Dominguez M, Minx J (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13, [doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f)

Mercer L and Burke J (2023). Strengthening MRV standards for greenhouse gas removals to improve climate change governance. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, [lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2023/05/Strengthening-MRV-standards-for-greenhouse-gas-removals-updated.pdf](https://lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2023/05/Strengthening-MRV-standards-for-greenhouse-gas-removals-updated.pdf)

National Academies of Sciences, E., Medicine (2019). Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. The National Academies Press, Washington, DC, [nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda](http://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda)

### Observatorium Erdoberfläche

Kögel-Knabner I, Teutsch G, Adrian R, von Blanckenburg F, Flügge UI, Kolle 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. [dfg.de/resource/blob/171256/7ba616d024033582a56df7c97de97e2d/strategiepapier-infrastruktur-de-data.pdf](http://dfg.de/resource/blob/171256/7ba616d024033582a56df7c97de97e2d/strategiepapier-infrastruktur-de-data.pdf)

### Infobox Umweltseismologie

Montagner J P, Mangeney A, Stutzmann E (2020). Seismology and Environment, in *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, ed. Harsh K. Gupta, *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (Cham: Springer International Publishing), 1–8, [doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7\\_258-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_258-1)

Larose E et al. (2015). “Environmental Seismology: What Can We Learn on Earth Surface Processes with Ambient Noise?,” *Journal of Applied Geophysics* 116, 62–74, [doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.00](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.00)

### Infobox Naturbasierte Lösungen

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2024). Klima – Wasserhaushalt – Biodiversität: für eine integrierende Nutzung von Mooren und Auen. Halle (Saale), [leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/klima-wasserhaushalt-biodiversitaet-fuer-eine-integrierende-nutzung-von-mooren-und-auen-2024](http://leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/klima-wasserhaushalt-biodiversitaet-fuer-eine-integrierende-nutzung-von-mooren-und-auen-2024)

Reise J, Siemons A, Böttcher H, Herold A, Urrutia C, Schneider L, Iwaszuk E, McDonald H, Freluh-Larsen A, Duin L, Davis M (2022). Nature-based solutions and global climate protection: Assessment of their global mitigation potential and recommendations for international climate policy. German Environment Agency, Dessau-Roßlau, [umweltbundesamt.de/publikationen/nature-based-solutions-global-climate-protection](http://umweltbundesamt.de/publikationen/nature-based-solutions-global-climate-protection)

Seddon N (2022). Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science* 376:1410-1416, [doi.org/10.1126/science.abn9668](https://doi.org/10.1126/science.abn9668)

### Infobox Komplexe Systeme

Thurner S, Hanel R, Klimek P (2018). *Introduction to the Theory of Complex Systems*. Oxford



## Die Arbeitsgruppe Verbundprojekte

Die Arbeitsgruppe Verbundprojekte wurde im Mai 2022 im Dachverband der Geowissenschaften mit dem Sprecher Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg gegründet, um innerhalb der Geowissenschaftlichen Disziplinen zukünftige Themen, die sich für Verbundprojekte eignen, zu identifizieren und strategische Beratung anzubieten.

Die Produktion dieser Schrift wurde allein aus den Mitgliedsbeiträgen des Dachverbandes der Geowissenschaften und ohne Fördermittel externer Organisationen finanziert.

Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg (Sprecher)	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Anne Bernhardt	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Celine Hadziioannou	Universität Hamburg
Prof. Dr. Wolfgang Kießling	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Heidrun Kopp	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Michael Krautblatter	Technische Universität München
Prof. Dr. Horst Marschall	Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt a. M.
Prof. Dr. Andreas Mulch	Senckenberg – Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research, Frankfurt/Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt a. M.
Prof. Dr. Onno Oncken	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Dr. Ana-Catalina Plesa	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin-Adlershof
Prof. Dr. Frank Schilling	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Peter van der Beek	Universität Potsdam

## Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Mathias Burisch-Hassel	Colorado School of Mines
Dr. Armin Dielforder	Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Katja Emmerich	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Max Frenzel	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Prof. Dr. Nico Goldscheider	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Jürgen Grötsch	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Christian Hallmann	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Celine Hadziioannou	Universität Hamburg
Prof. Dr. Christoph Hilgers	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Sandro Jahn	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Timm John	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Wolfgang Kießling	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Michael Krautblatter	Technische Universität München
Prof. Dr. Horst Marschall	Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt a. M.
Prof. Dr. Andreas Mulch	Senckenberg – Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research, Frankfurt
Dr. Birgit Müller	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Carsten Münker	Universität zu Köln
Prof. Dr. Onno Oncken	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Dr. Ana-Catalina Plesa	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin-Adlershof
Prof. Dr. Magdalena Scheck-Wenderoth	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Frank Schilling	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Dr. Susanne Stein	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Christiane Stephan-Scherb	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Dörthe Tetzlaff	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) Berlin
Dr. Nicola Tosi	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin-Adlershof
Prof. Dr. Peter van der Beek	Universität Potsdam
Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Daniel Vollprecht	Universität Augsburg
Prof. Dr. Thorsten Wagener	Universität Potsdam
Prof. Dr. Claudia Weidenthaler	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung Mülheim an der Ruhr
Prof. Dr. Max Wilke	Universität Potsdam

#### Weitere Beitragende

Prof. Dr. Marco Bonhoff	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Sascha Brune	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Dr. Michael Fischer	Universität Bremen
Prof. Dr. Heiner Igel	Ludwig-Maximilians-Universität München
PD Dr. Kathrin Menberg	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Christine Thomas	Universität Münster

## Gutachterinnen und Gutachter

#### Gesamte Schrift und Strategisches Konzept

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Adrian Immenhauser	Ruhr-Universität Bochum

#### Einzelne Kapitel

Prof. Dr. Wolfgang Bach	Universität Bremen
Prof. Dr. Harry Becker	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Liane Benning	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Hans-Peter Bunge	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Peter Dietrich	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ
Dr. Jonathan Donges	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Prof. Dr. Olaf Eisen	Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Dr. Friederike Erxleben	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
PD Dr. Georg Feulner	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Dr. Dieter Franke	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover
Prof. Dr. Susanne Fritz	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv), Halle-Jean-Leipzig
Prof. Dr. Nico Goldscheider	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Bastian Gundlach	Universität Münster
Dr. Oskar Hagen	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena
PD Dr. Sebastian Hainzl	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Conny Hammer	Universität Hamburg
Prof. Dr. Ulrich Hansen	Universität Münster
Dr. Ulrich Harms	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Andreas Hartmann	Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Stefan Hergarten	Universität Freiburg

Prof. Dr. Francois Holtz	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. Bärbel Hönisch	Columbia University, New York, USA
Prof. Dr. Carina Hoorn	University of Amsterdam, NL
Prof. Dr. Heiner Igel	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Andreas Kappler	Universität Tübingen
Prof. Dr. Jonas Kley	Georg-August-Universität Göttingen
Prof. Dr. Julia Kowalski	RWTH Aachen
Prof. Dr. Andreas Lang	Paris Lodron Universität Salzburg
Prof. Dr. Mark Lawrence	Research Institute for Sustainability – Helmholtz Centre Potsdam (RIFS)
Prof. Dr. Bodo Lehmann	DMT Group
Dr. Axel Liebscher	Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE, Salzgitter
PD Dr. Till Markus	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig
Prof. Dr. Frank Melcher	Montanuniversität Leoben
Prof. Dr. Volker Mosbrugger	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
Prof. Dr. Carsten Münker	Universität zu Köln
Dr. Andreas Musloff	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig
Prof. Dr. Lena Noack	Freie Universität Berlin
Dr. Sven Petersen	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Frank Postberg	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Andreas Rietbrock	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Mario Schirmer	Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs (Eawag) Dübendorf, CH
Prof. Dr. Wolfgang Schmahl	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Jürgen Schreuer	Ruhr-Universität Bochum
Dr. Christoph Sens-Schönfelder	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung
Prof. Dr. Dörthe Tetzlaff	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) Berlin
Prof. Dr. Thorsten Wagener	Universität Potsdam
Prof. Dr. Markus Weiler	Universität Freiburg
Prof. Dr. Gerhard Wörner	Georg-August-Universität Göttingen
PD Dr. Wolfgang Graf zu Castell	GFZ Helmholtz Zentrum für Geoforschung

**Begutachtung der Grafiken**

Prof. Dr. Martin Meschede	Universität Greifswald
---------------------------	------------------------

**Weitere Mitwirkende**

**Redaktionelle Bearbeitung**

Dr. Christian Bücker	Universität Hamburg
Prof. Dr. Heidrun Kopp	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Dr. Laura Krone	Freie Universität Berlin
Niklas Wehmann	Universität zu Köln
Dr. Simon Felix Zoppe	Naturhistorisches Museum Mainz

**Projektbegleitung**

Tamara Fahry-Seelig	Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo)
---------------------	---

Wir danken allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Gutachterinnen und Gutachtern und den weiteren Mitwirkenden, die durch Texte, Kommentare, oder Diskussionen mit großem freiwilligem Engagement zu dieser Schrift beigetragen haben.

# Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo)



## Geschäftsstelle Berlin

Luisenstraße 58/59, 10117 Berlin

E-Mail: [info@dvgeo.org](mailto:info@dvgeo.org)

[www.dvgeo.org](http://www.dvgeo.org)

Der Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo) stellt eine übergreifende geowissenschaftliche Vereinigung dar, deren Ziel die Förderung der Geowissenschaften und deren Anwendung in der Ausbildung, deren Vertretung in Politik und Gesellschaft sowie der Transfer von Wissen ist. Dieser Aufgabe kommt er u. a. durch die Organisation von Veranstaltungen für Entscheidungsträger, Kooperationen mit Gesellschaften anderer naturwissenschaftlicher Disziplinen und der Deutschen Olympiade der Geowissenschaften nach. Der Dachverband wurde am 3. September 2015 in Berlin von vier großen geowissenschaftlichen Vereinigungen in Deutschland aus Geophysik (DGG), Geologie (DGGV), Mineralogie (DMG) und Paläontologie (PalGes) gegründet. Als assoziierte Mitglieder wurden die DTTG (2021) und die FH-DGGV (2022) aufgenommen, zu diesem Zeitpunkt liegen weitere Anträge und Interessensbekundungen vor.

## Impressum

### Herausgeber

Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo)

Luisenstraße 58/59, 10117 Berlin

### Koordination

Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg, Freie Universität Berlin

### Grafiken

Dorothee Post, Wien [dorotheepost.de](mailto:dorotheepost.de)

### Gestaltung und Satz

Designbüro Muschiol, Berlin

### DOI

[doi.org/10.23689/figeo-6525](https://doi.org/10.23689/figeo-6525)

### Lizenz

Das Material darf genutzt und verbreitet werden, so lange die Quelle (siehe unten) angegeben wird.

Die Nutzung erfolgt auf eigenes Risiko.

Texte und Grafiken stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY-ND 4.0

[creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0)

### Zitiervorschlag

Dachverband der Geowissenschaften DVGeo (2024): Zukunftsforschung in den Geowissenschaften – Entdeckungen, Diagnose, Lösungen. [doi.org/10.23689/figeo-6525](https://doi.org/10.23689/figeo-6525)

### Redaktionsschluss

11.12.2024

Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo)  
Luisenstraße 58/59  
10117 Berlin

[www.dvgeo.org](http://www.dvgeo.org)