

GEOFOKUS



Sedimentäre Geologie: Status, Signifikanz, Perspektiven

Autorenkollektiv*

Im Dezember 2010 trafen sich die Leiter der Sedimentologie-Standorte in Deutschland auf Einladung der neuen GV-Sektion Sedimentologie/SEPM-CES (Central European Section of the Society of Sedimentary Geology), um eine Standortbestimmung vorzunehmen und eine Strategie für die nächsten Jahre zu entwickeln. Nach einer einführenden Statusanalyse werden im Folgenden, im Sinne einer Orientierung und als Wegweiser für zukünftige Verbundforschung, aber ohne Anspruch auf Vollständigkeit, zentrale Forschungsthemenfelder im Bereich der Sedimentären Geologie mit hohem Zukunftspotential skizziert.

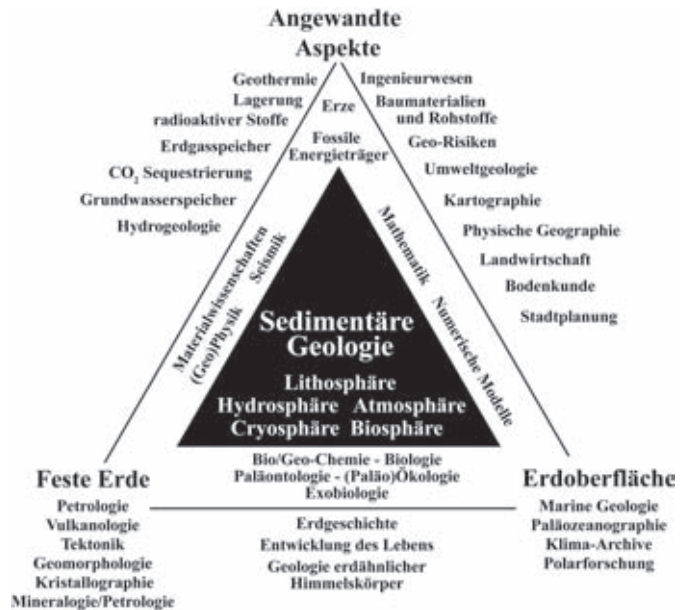
Als Sedimentäre Geologie wird eine Disziplin der Geowissenschaften bezeichnet, die sich mit der Zuordnung, dem Ursprung und der zeitlichen Veränderung von Lockersedimenten und Sedimentgesteinen sowie deren Ablagerungsräumen an der Oberfläche der festen Erde, in Seen, Flüssen und Ozeanen beschäftigt. Lockersedimente und ihre lithifizierten Äquivalente, die Sedimentgesteine, umfassen unter anderem die Verwitterungsprodukte von Kristallin-gestein (Siliziklastika), biogene, abiogene und organomineralische Karbonate, Evaporite, kieselige Sedimente, vulkanoklastische Sedimente oder organogene Ablagerungen wie Phosphate, Torf oder Kohle. Lockersedimente bedecken über 70 % der Erdoberfläche und den Boden von Seen, Flüssen und Ozeanen und große Teile aller erdähnlichen Planeten unseres Sonnensystems. Sedimente bilden somit den Kontaktbereich zwischen der festen Erde (Lithosphäre) und der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre.

Sedimentgesteine zeichnen seit vier Milliarden Jahren Veränderungen in der Umwelt unseres Planeten auf. Sie stellen die wichtigsten Informationsquellen zur Geschichte der Erde und der Entwicklung des Lebens dar. Diese Archivfunktion ist für das Selbstverständnis der Sedi-

mentären Geologie zentral. Die möglichst exakte chronostratigraphische Gliederung sedimentärer Sequenzen, auch über extrem diverse Ablagerungsräume und zeitliche wie räumliche Lücken hinweg, stellt somit eines der zentralen Ziele dar. Ein weiteres Ziel ist es, das sedimentäre „Dokument“ durch neue oder optimierte Analysetechniken besser zu verstehen und somit unser Verständnis der Paläoumwelt zu präzisieren. Die Kombination aus präziser Erfassung und exakter zeitlicher Kalibrierung legt den Grundstein zur Beschreibung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse und deren Rückkopplungen von der geologischen Vergangenheit bis heute.

Sedimente und Sedimentbecken sind zudem von enormer gesellschaftlicher Bedeutung. Bodensedimente bilden das Substrat für den Anbau von Nutzpflanzen und für Pflanzen im Allgemeinen. Lockersedimente formen die Rohstoffe der Bauindustrie, die wiederum Häuser und Straßen auf und in Sedimenten und Sedimentgesteinen errichtet. Sedimentäre Erzlagerstätten (hydrothermal oder als Seifen) stellen die wichtigsten Wirtsgesteine für Elemente wie Eisen, Titan, Uran, Gold, Silber, Blei oder Chrom dar. Ablagerungen in sedimentären Becken bilden Speicher und Wegsamkeiten für Grundwasser. Energie und Energieversorgung sind eng mit dem Begriff des sedimentären Beckens verbunden. Vor dem Hintergrund eines weiteren Anstiegs der globalen Energienachfrage um etwa 50 % bis zum Jahr 2030 muss es das Ziel sein, die adäquate und nachhaltige Energieversorgung zu akzeptablen Preisen zu gewährleisten und dabei gleichzeitig die Umweltbelastung signifikant zu reduzieren. Die Entwicklung eines schlüssigen Konzeptes zur Lösung dieses Dilemmas, durch die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe im Laufe dieses Jahrhunderts brisanter als jemals zuvor, stellt eine der vorrangigen Aufgaben der Weltgemeinschaft dar. Die Sediment-

Abb. 1: Sedimentäre Geologie im Kontext zu ihren Nachbar-disziplinen



geologie trägt hier mit grundlegenden Daten und Konzepten zur Bewältigung dieser Aufgaben bei.

Trotz der enormen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedeutung von Sedimentbecken, Lockersedimenten und Sedimentgesteinen sieht sich die Sedimentäre Geologie als Disziplin zu Beginn des 21. Jahrhunderts mit zwei fundamentalen Herausforderungen konfrontiert:

(1) Die Sedimentäre Geologie hat durch den Unterricht an Universitäten, gerade wegen ihrer großen wirtschaftlichen Bedeutung, die Aufgabe, Nachwuchskräfte für ein breites Spektrum angewandter Berufe auszubilden. Die geforderte Ausbildung umfasst die klassischen Kernkompetenzen der Sedimentologie und Stratigraphie (z.B. Gesteinsansprache, Beschreibung von Dünnschliffen, Korngrößenanalysen, Profilaufnahme oder die Kernbeschreibung, sedimentphysikalische Analysen und vieles mehr). Moderne Forschungsansätze in der Sedimentären Geologie nutzen diese Grundlagen, entwickeln sich aber nolens volens zunehmend in Bereiche der Grundlagenforschung, die – zumindest kurz-

fristig – oft keinen direkten Nutzen für die angewandten Bereiche erbringt. Die Industrie ist schwer davon zu überzeugen, Grundlagenforschung zu finanzieren, während die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) oder internationale Förderungsprogramme kaum bereit sind, industrierelevante Forschung zu fördern. Somit öffnet sich die Kluft zwischen den Anforderungen der Industrie und somit der Lehre einerseits und innovativer Grundlagenforschung andererseits.

(2) Die Sedimentgeologie durchläuft, wie viele klassische Bereiche, eine starke Diversifizierung und Aufspaltung. Wichtige Teilbereiche der Sedimentgeologie lösen sich ab und haben sich zu neuen, eigenen Disziplinen entwickelt. So verstehen sich sedimentäre Geowissenschaftler als Paläoklimatologen, Meeresgeologen, als Petrographen, Pedologen, Geobiologen, Geochemiker oder Quartärgeologen. Es steht außer Diskussion, dass beispielsweise Geomikrobiologen oder sedimentäre Geochemiker über ein breites Spektrum an Kenntnissen und modernsten analytischen Instrumenten verfügen, die der Verschmelzung mit Forschungsbereichen

der Biologie oder Chemie zu verdanken sind. Oft sind es diese interdisziplinären Forschungsansätze, die bahnbrechende Resultate erzielen. Nüchtern betrachtet wird aber gelegentlich auch „alter Wein in neuen Schläuchen“ unter Verwendung griffiger Wortkonstrukte verkauft. Die Problematik besteht in der Auffassung, dass in den Naturwissenschaften der Begriff „Sedimentäre Geologie“ zunehmend lediglich mit den traditionellen Kernkompetenzen assoziiert wird und neuartige Forschungsfelder – obwohl de facto Forschung an Sedimenten und -gesteinen – neuen Disziplinen zugeordnet werden.

Im Folgenden werden zentrale Themenfelder im Bereich der Sedimentären Geologie mit hohem Zukunftspotential vorgestellt.

Chronologie sedimentärer Archive

Die genaue zeitliche Einordnung sedimentärer Abfolgen bildet die Grundlage für deren Eignung und Verwendung als Archiv und damit für unser Verständnis von sedimentären, geochemischen und paläobiologischen Prozessen der Erdgeschichte. Basis für die zeitliche Einstufung sedimentärer Archive ist neben radiometrischen Methoden die Magneto- und Biostratigraphie. Provinzialismus und Diachronien beim Erstauftreten wichtiger Indexfossilien limitieren die Anwendung von Biostratigraphie. Zudem lassen sich randmarine und kontinentale Ablagerungsmilieus mit etablierten biostratigraphischen Methoden häufig nur unzureichend datieren. In den letzten zwanzig Jahren haben sich neue stratigraphische Methoden als leistungsstarke Werkzeuge für die Korrelationen verschiedener Faziesbereiche und räumlich weit entfernter Sedimentationsräume entwickelt. Vor allem die Verhältnisse stabiler Isotope ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) und zunehmend auch radiogener Isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, U-Th, U-Pb) reflektieren die Veränderlichkeit geodynamischer, klimatischer und biogeochemischer Prozesse. Die Strontiumisotopen-Stratigraphie beruht auf der langen Residenzzeit von Strontium im Meerwasser, wodurch der Ozean zu einer gegebenen Zeit ein homogenes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis aufweist. Im Gegensatz zu Strontium hat Osmium eine sehr

kurze Residenzzeit im Ozean und ermöglicht zeitlich hochauflösende Untersuchungen in der Änderung hydrothermaler Aktivität und/oder von Verwitterungsquellen sowie der Ozeanzirkulation. Uran-Thorium Altersdaten in Höhlenarchiven liefern – unter günstigen Bedingungen – extrem präzise Altersmodelle der letzten 500 kyr. Die genannten stratigraphischen Ansätze sind etablierte Methoden für Bereiche pelagischer und hemipelagischer Schichtenfolgen. In Bereichen, die von Flachwasserfazies oder von kontinentalen Sedimenten eingenommen werden, ist die Antwort auf die Frage, wie in einer solchen Abfolge zwischen den „Ankerpunkten“ der datierten Horizonte ein Altersmodell konstruiert werden kann, komplex.

Das geochemische Archiv der Sedimente kann natürliche Schwankungen der Strahlungsbilanz unserer Erde, die durch Variationen in den Orbitalparametern ausgelöst werden, aufzeichnen. Die orbitale Steuerung dieser Schwankungen wird mittelbar durch komplexe Rückkopplungsmechanismen zwischen Klima, hydrologischem Kreislauf, kontinentaler Verwitterung, Ozeanzirkulation und Sedimentation transferiert. Einige Merkmale der astronomischen Lösung der Orbitalschwankungen stehen in Beziehung zu den säkulären Frequenzen der äußeren Planeten und haben eine längere Zeitstabilität. Die Integration und Kalibrierung zyклоstratigraphischer Altersmodelle mit numerischen Datierungstechniken sind bereits Bestandteil der Geologischen Zeitskala (GTS 2004) im Neogen und liefern ein stratigraphisches Gerüst in einer bisher nicht gekannten Auflösung und Präzision. Damit können zukünftig die Mechanismen und Effekte klimagekoppelter Prozesse auf orbitalen Zeitskalen innerhalb der letzten 100 Mio. Jahre und deren wechselnde Rolle beim Übergang vom Warmhouse- zum Icehouse-Klima verstärkt erforscht werden.

Sedimentologie und Erdoberflächenprozesse

Die Erdoberfläche ist eine Grenzfläche, an der zahlreiche physikalische, chemische und bio-

logische Prozesse ablaufen und globale Stoffkreisläufe anknüpfen. Gleichzeitig ist sie der Lebensraum des Menschen, der verstärkt in diese Prozesse und Kreisläufe eingreift. Die Erkenntnis, dass zwischen endogenen und exogenen Prozessen Wechselwirkungen bestehen und diese vor allem in der Ausbildung der Erdoberfläche (Geomorphologie) zum Ausdruck kommen, hat zur Herausbildung des neuen, interdisziplinären Forschungsfeldes der „Erdoberflächenprozess-Analyse“ geführt. Erdoberflächenprozesse laufen auf unterschiedlichsten Raum- und Zeitskalen ab, was sehr verschiedene methodische Herangehensweisen erfordert. Die Sedimentologie nimmt in diesem innovativen Feld eine zentrale Rolle ein, da sie die genutzten Geoarchive erschließt und in einen Zusammenhang bringen kann. Wichtige Grundlagenaufgaben der Sedimentologie sind dabei weiterhin geologische Kartierungen, die sedimentäre Faziesanalyse zur Ableitung und Rekonstruktion von Ablagerungsprozessen, diagenetischer Geschichte und stratigraphischer Abfolge. Alle diese Aufgaben können nur mit einer mindestens hinreichenden Geländekomponente erfüllt werden. Aus diesem neuen Umfeld haben sich auch neue Herausforderungen ergeben: (1) Entwicklung sequenz- und zykl stratigraphischer Konzepte für hoch-diskontinuierliche, fossilarme Sedimentabfolgen, (2) Quantifizierung von Sedimentvolumen zur Bestimmung von Langzeitprozessraten, (3) Entwicklung neuer Methoden zur Liefergebietsanalyse und (4) Entwicklung neuer Proxy-Methoden (z.B. multi-Proxy-Ansätze und Paläoaltimetrie). Diese Ansätze erfordern in der Regel einen hohen apparativen Einsatz sowohl an Laboranalytik, an Geländetechnik (Bohrarüstung, geophysikalische Untergrundkundung) als auch an Rechnerkapazität (z.B. 3-D-Untergrundmodelle). Keines dieser Entwicklungsfelder ist losgelöst von anderen Teildisziplinen. Austausch ist insbesondere notwendig mit der Geochemie (terrigen kosmogene Nuklide, Isotope), der Geophysik (v.a. Seismik und Georadar als strukturabbildende Verfahren) und Paläontologie (Proxies, Stratigraphie, Palynologie).

Klastische *Source-Sink*-Systeme: von den Gebirgen bis zu den Ozeanen

In den großräumigen Flusssystemen der Erde konzentriert sich die langfristig wesentliche Massenumlagerung an der Erdoberfläche. Sie ist Teil des globalen Materialkreislaufs und wichtiges Element der Kopplung zwischen Kontinenten und Ozeanen. Massenumlagerung an der Erdoberfläche beginnt mit der „Sedimentproduktion“ in den Liefergebieten durch Verwitterung und Erosion, wird gefolgt von überwiegend periodischem Sedimenttransport in Flüssen und endet mit der finalen Ablagerung in einem Sedimentbecken. Sedimenttypen und Transferaten werden gesteuert von den Gesteinstypen und der tektonischen Situation im Liefergebiet, den klimatischen Gegebenheiten im Liefergebiet und dem Transportsystem, sowie der konkreten Situation im Ablagerungsraum einschließlich Meeresspiegelschwankungen. Veränderungen dieser Kontrollfaktoren in Zeit und Raum sowie Wechselwirkungen zwischen endogenen und exogenen Prozessen sind bestimmend für die Entwicklung dieser komplexen Geosysteme. Die Quantifizierung solcher klastischen *Source-Sink*-Systeme auf diversen Zeit- und Raumskalen ist eine enorme Herausforderung in der modernen Sedimentologie, da erst dann die o.g. steuernden Parameter, ihre Variabilität in Zeit und Raum und potentielle Rückkopplungsmechanismen verstanden und getestet werden können. Im Vordergrund stehen prinzipiell Fragen nach Menge (Volumina und Raten pro Zeiteinheit und Fläche) und Zusammensetzung (Petrographie, Granulometrie, Geochemie, Einzelkorn-„Fingerprinting“) der Sedimentzufuhr vom Liefergebiet zum Ablagerungsraum. Aufbauend auf belastbaren Daten müssen quantitative Modelle der großräumigen Sedimentgenerierung, -verteilung und -ablagerung entwickelt werden. Solche Modelle brauchen wir als Grundlage, um (1) Sedimentationsraten und regional differenzierte Abtragungsraten zu integrieren und hinsichtlich ihrer tektonischen, klimatischen und eustatischen Kontrollfaktoren zu testen, (2) Sedimentzusammensetzungen und

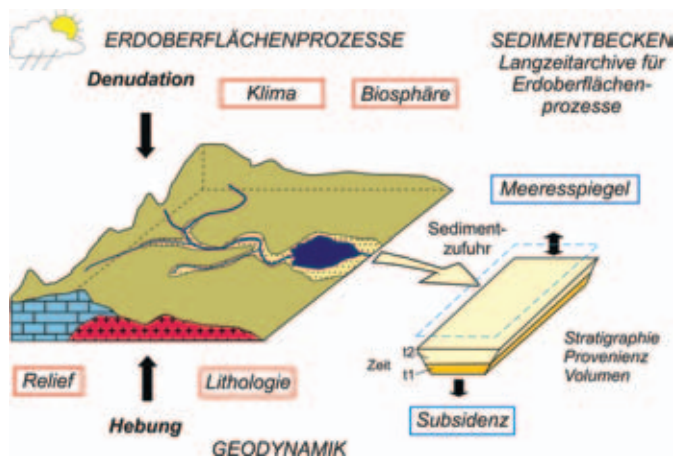


Abb. 2: Erdoberflächenprozesse. Vereinfachtes Schema der Steuerung der Sedimentflüsse im Hinterland („source“) und deren Verknüpfung mit Sedimentvolumen über bestimmte Zeitabschnitte (t_1 , t_2) in angrenzenden Sedimentbecken („sink“). Primäre lithologische Signaturen der zur Senke exportierten Feststoffe werden mehr oder weniger intensiv maskiert, können aber durch kombinierte und neue Provenienzmethoden zunehmend entschlüsselt werden.

ihre zeitlich-räumliche Variabilität zu verstehen und zu prognostizieren, (3) Rückkopplungsprozesse zwischen endogenen und exogenen Kontrollfaktoren zu erfassen und quantifizieren, und (4) auf rezenten Daten beruhende Erkenntnisse in die geologische Vergangenheit zu übertragen. Eines der Ziele der geplanten engeren Kooperation der großen internationalen Projekte IODP (Integrated Ocean Drilling Program) und ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) ist es, sich verstärkt der Land-See-Kopplung zu widmen, wobei Source-Sink-Systeme eine zentrale Rolle spielen.

Interaktion zwischen Mikroben, Sedimenten und Biomineralen

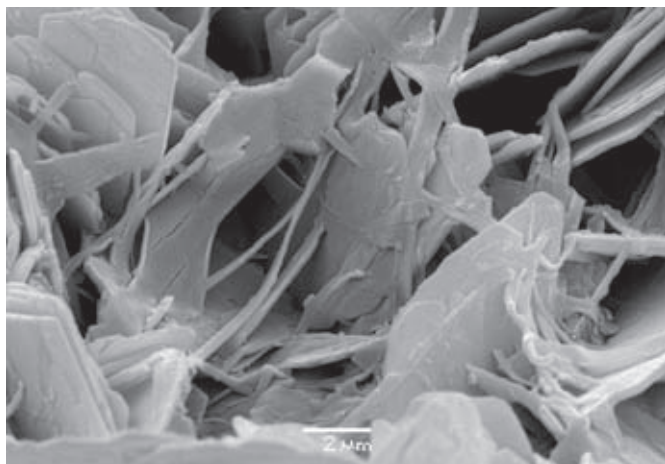
Mikrobielle Sedimentgesteine umfassen ein weites Spektrum von mineralogisch diversen Fällungsprodukten (Karbonate, Silikate, Phosphate, Sulfide, Oxide), welche, z.B. in Riffen oder Erzlagerstätten, erhebliche Volumina bilden können. Neben Fällung und Lösung von Mineralen spielen mikrobielle Gemeinschaften (Bacteria, Archaea, Pilze und einzellige eukaryotische Algen) aber auch bei der Stabilisierung und Gefügebildung in Sedimenten eine wichtige, nur partiell verstandene Rolle. Die Abhängigkeit

der mikrobiellen Fällung und Korrosion von externen Umweltfaktoren prädestiniert Mikrobiolite und mikrobielle Korrosionsspuren als Proxy für hydrochemische Parameter sedimentärer Habitate. Auch ist die Erkennung organogener bzw. biogener Strukturen Voraussetzung für den Nachweis fossilen mikrobiellen Lebens gegenüber unbelebter Organik.

Bei der mikrobiellen Sedimentgesteinsbildung kommt sicherlich der Effektivität einzelner Stoffumsätze unter verschiedenen Umweltbedingungen und der damit verbundenen Verschiebung chemischer Gleichgewichte im Mikromilieu eine zentrale Rolle zu. Parallel dazu sind beim Aufbau von Mikrogradienten wie auch der Bildung initialer Fällungsprodukte extrazelluläre polymere Substanzen von entscheidender Bedeutung. Ihre Bildung, funktionelle Gruppen und stereochemische Anordnung, wie auch deren Degradation gilt es bezüglich der Effekte auf sedimentäre Komponenten (z.B. Ooide) und Gesteine in geomikrobiologischen Laborexperimenten wie in heutigen Modellhabitaten durch eine Kombination von isotopengeochemischen, biogeochemischen, mikrobiologischen, molekularbiologischen und mineralogischen Methoden zu entschlüsseln.

Abb. 3: Hochauflösende elektronenmikroskopische Aufnahme diagenetisch gebildeter Chlorite mit Bitumen-Überzug im Porenraum eines Gasspeicher-Sandsteins (Mitteleuropäisches Becken)

Foto: G. Rusek, Jena



Biomminerale sind biologisch induzierte oder kontrollierte Präzipitate von oft hoher Komplexität. Ein besseres Verständnis, wie Organismen Biomminerale über metastabile Vorgängerphasen (z.B. amorphe Karbonate) bilden und dann zu stabileren Phasen ausformen und modifizieren, dient als Schlüssel zur Interpretation von sedimentären Archiven. Für die angewandten Aspekte der Bioremediation ist eine verbesserte Kenntnis von Biommineralisationsprozessen von großer Bedeutung. Aus Sicht der Sedimentären Geologie ist es wichtig, den Kontakt zu benachbarten Disziplinen zu suchen und mithilfe interdisziplinärer Forschung auszubauen. Das Verständnis der Paläoumwelt und ihrer Veränderung ist hier von entscheidender Bedeutung.

Diagenese von Sedimentkörpern im drei- und vierdimensionalen Raum

Der Begriff „Diagenese“ umschreibt alle Veränderungen in Lockersedimenten nach ihrer Ablagerung mit Ausnahme der Verwitterung. Diagenese umfasst im weitesten Sinne die Gesteinswerdung und somit Prozesse wie Kompaktion, Auspressung von Wasser, Lösung von metastabilen Phasen und Fällung von stabileren Mineralphasen sowie die Adsorption von organischen und anorganischen Molekülen und Kolloiden an der Mineral-Fluid-Grenzfläche.

Der Bereich der Diagenese endet im Übergang zur Anchimetamorphose bei Temperaturen von ca. 200 °C. In der sedimentären Geologie spielt das Verständnis von Diageneseprozessen eine Schlüsselrolle bei der Rekonstruktion der Sedimentbeckenentwicklung sowie der Auswertung geologischer Archive. In der Regel kontrollieren komplexe Diageneseepfade die räumliche Verteilung von Porosität und Permeabilität in Sedimentbecken. Sandsteine und Karbonate sind wichtige Speichergesteine (Kohlenwasserstoffgewinnung, Geothermie, Erdgasspeicherung, CO₂-Sequestrierung). Die Größe des Porenraumes, die Permeabilität des Gesteinskörpers und die Kompartimentierung des Speichervolumens im Gestein wird durch Diageneseprozesse entscheidend bestimmt. Für die Prognostizierung von Speichervolumina sind Kenntnisse zum zeitlichen Ablauf und der räumlichen Wirksamkeit von Fluid-Mineral-Reaktionen während der Diagenese unerlässlich. Diese Kenntnisse können nur durch die Kombination von guten Beobachtungsdatensätzen mit Laborexperimenten und Modellierungen verbessert werden.

Neben der räumlichen Verteilung von sedimentären Grenzflächen spielen Kluftsysteme eine wichtige Rolle für den Fluidfluss in Karbonaten, Sandsteinen und unkonventionellen Reservoi-



Abb. 4: Banded-Iron-Formation-Gesteine der Fig-Tree-Gruppe (ca. 3.255–3.225 Ma) im Barberton Greenstone Belt Südafrikas sind ungewöhnliche Sedimentgesteine, deren biologischer oder chemischer Ursprung immer noch debattiert wird. Sie sind Zeugen einer sauerstofffreien oder -armen Welt.

ren. Die dreidimensionale Verteilung von Kluftsystemen ist aus Aufschluss- und Bohrlochdaten allein jedoch oft nur schwierig zu rekonstruieren. Mit Hilfe von geomechanischen Modellen lassen sich jedoch Vorhersagen über die Orientierung und Bildungsbedingungen von Klüften treffen. Eine skalenbezogene Transformation quantitativer Daten zur effektiven Reaktivität und eine daraus resultierende Bilanzierung der Konzentration von Diagenesprodukten ist bisher kaum durchführbar und sollte im Fokus zukünftiger Forschungsinitiativen stehen.

Präkambrische Sedimentäre Geologie – die Archive der frühen Erde

In den ersten 80 % der Erdgeschichte wurden alle fundamentalen Bestandteile des Erdsystems eingerichtet (Atmosphäre, Ozeane, ozeanische und kontinentale Kruste, kohlenstoffbasiertes Leben). Weil – wie in der Gegenwart, so auch in der erdgeschichtlichen Vergangenheit – alle Prozesse an der Erdoberfläche

entweder chemisch oder physikalisch eng mit Lebensprozessen verbunden sind, können Sedimentgesteine viel zur Aufklärung der Entstehung, Etablierung und Ausbreitung des Lebens beitragen.

Dies gilt sowohl für den speziellen Fall unseres eigenen Planeten als auch für dieses Thema im Allgemeinen und bildet das zentrale Feld der Astrobiologie. Trotz jahrzehntelanger Arbeit ist die Forschung jedoch immer noch im Unklaren, wie, wo und wann das Leben auf unserem Planeten entstand. Das Genom und die speziellen Anpassungen vieler Archaea, die zu den ursprünglichsten Lebewesen zählen, deuten möglicherweise auf eine multiple, mehr oder weniger gleichzeitige Entstehung hin. Klar ist jedoch, dass Sedimente durch die katalytische Wirkung von Tonen und Sulfiden, durch die Bereitstellung von Porenräumen, die als chemische Labordiensten, und (via Verwitterung) durch den Transport und die Verteilung von Nährstoffen zentral in die frühe Geschichte des Lebens eingebunden waren. Beginnend mit den

ältesten Sedimentgesteinen der Welt (4,0–2,5 Ga) steigert sich die Informationsdichte durch das Archaikum hindurch mit abnehmendem Metamorphosegrad (meta-)sedimentärer Gesteine. Sedimentabfolgen, erhalten in orogenen Greenstone Belts und in wenigen stabilen, bis heute kaum deformierten Plattformen, bieten ab dem Archaikum ausgedehnte Archive, die über die Aspekte des Lebens hinaus auch die Entwicklung der Plattentektonik, der wechselnden Meerwasser- und atmosphärischen Zusammensetzung und des Erdmantels wiedergeben.

Geologische Arbeit aller Art im Präkambrium hat, unabhängig von ihrer Ausrichtung, ein Problem mit der relativen Zuordnung und Korrelation von Ereignissen, weil unser wichtigstes Werkzeug, die Biostratigraphie, wegen der Abwesenheit fossilisierbarer Skelettbestandteile bis zum späten Neoproterozoikum (ca. 630 Ma) hinein nur sehr eingeschränkt beitragen kann. Die ältesten Sedimentgesteine der Erde sind stark deformiert und häufig schlecht aufgeschlossen. Dort ist ein Erkenntnisgewinn stark auf detaillierte Kartierungen, eine aus der Sedimentologie abgeleitete Litho- und Sequenzstratigraphie, und eine enge Zusammenarbeit mit der Chemo-, Chrono- und Magnetostratigraphie angewiesen. Diese Sedimentgesteine sind aber nur bedingt mit denen rezenter oder phanerozoischer Ablagerungsprozesse vergleichbar.

Zukünftige sedimentgeologische Erkenntnisse aus den mächtigen fossilleeren Folgen des Präkambriums sind sicherlich nur im Verbund mit Nachbardisziplinen vorstellbar, und auch nur dann, wenn sedimentäre Geologen Beprobung, Analyse und Auswertung durch eigene Beiträge in Kontext stellen. Die erstaunlichen Verbesserungen zahlreicher analytischer Methoden werden sich dann in verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung niederschlagen und uns erlauben, die immensen Zeiträume des Präkambriums mit Ereignissen zu füllen.

Kontinentale Sedimente – Umweltarchive in Seen und Höhlen

Die Limnogeologie beschäftigt sich mit Seesedimenten der geologischen Vergangenheit,

während chemisch gefällte Sedimente in Höhlen (Stalagmite, flowstones etc.) eine sehr präzise zeitliche Auflösung mit geochemischen Signalen der letzten 500 kyr kombinieren. Diese Forschungsrichtungen haben sich in den 1990er Jahren etabliert und gewinnen immer weiter an Bedeutung. Seesedimente und Stalagmite gehören zu den höchst aufgelösten Umweltarchiven der Vergangenheit. Im Idealfall, wie z.B. jüngst an Messel-Sedimenten demonstriert, kann selbst für viele Millionen Jahre alte Sedimente eine Jahresauflösung erreicht werden und damit schnappschussartige Einblicke in hochfrequente Klimazyklen der Vergangenheit bieten. U-Th Altersmodelle an Tropfsteinen bieten, in Kombination mit einer jahreszeitlichen Lamination, vergleichbare zeitliche Auflösung für die letzten 500 kyr. In postglazialen Seesystemen wird häufiger Jahresauflösung erreicht; diese Phase bietet auch im Hinblick auf die Entwicklung des Menschen ein ausgedehntes Forschungsfeld für paläolimnologische Multi-Proxy-Rekonstruktionen des Klimas und der Umwelt. Mit ihren oft organik-reichen Ablagerungen können fossile Seesedimente zudem auch Träger von ökonomisch wertvollen Kohlenwasserstoffvorkommen (z.B. Messel, Eozän-Seen in USA, kreidezeitliche Seen in China) und Kohlen (z.B. Saar-Nahe-Becken) sein. Höhlen treten weltweit in allen Klimazonen auf und lassen sich mit Sauerstoff-Isotopie-Zeitreihen mit den Eiskernen hoher Breiten korrelieren. Diese Bedeutung für das Verständnis von Klima und Umweltdynamik in der Erdgeschichte und Nutzung als Ressource führte zu größeren See-Projekten, z.B. European Lake Archives (ELA) und im Internationalen kontinentalen Tiefbohrprogramm (ICDP). Zurzeit laufen unter deutscher Leitung das Potrok-, Aike-, El'gygytyn-, Vansee- und Ohridsee-Bohrprojekt in Patagonien, Nordost-Sibirien, der Ost-Türkei bzw. in Albanien/Serbien. Vergleichbare internationale Projekte stehen in der jungen Disziplin der Höhlen-Archivforschung noch aus.

Folgende Forschungsthemen der Limnogeologie, meist verankert in sedimentologischen Arbeitsgruppen, stehen in Deutschland im Vor-



Abb. 5: In Tropfsteinen zeichnen Höhlen zeitlich höchstauflösende Archive der Umwelt auf (Breitscheidter Großhöhle, NRW).

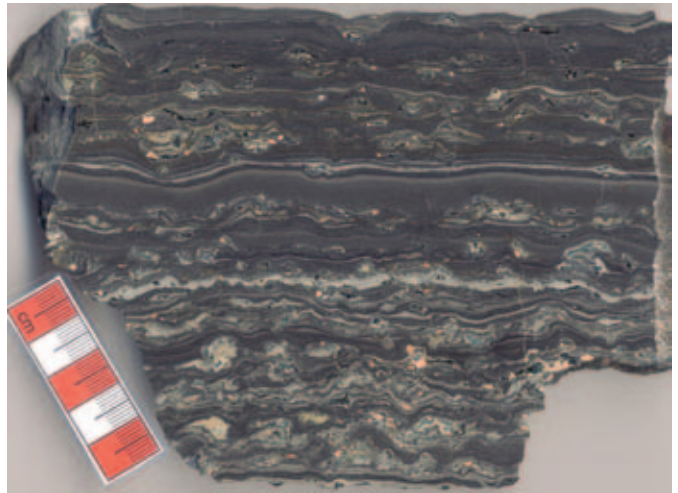
dergrund: (1) Rekonstruktion langer Klimazeitreihen aus Seesedimentkernen (ICDP s. oben, ELSA Eifel) (2) Hochfrequente Klimazyklen und Klimaereignisse mit Schwerpunkt Eozän und Pleistozän; (3) Umweltveränderungen des Menschen im Holozän; (4) Ostafrikanische Riftseen und die Umwelt des frühen Menschen; (5) Rekonstruktion des asiatischen Monsunklimas. Diese Themen sind von internationaler Relevanz. Ein Verständnis der vielfältigen allochthonen und autochthonen Sedimentationsprozesse in Seen ist dabei entscheidend. Verbundforschung an deutschen Höhlenarchiven wird in Deutschland und zunehmend im Alpenen Raum sowie im Mittelmeerraum gefördert.

Auswirkungen und sedimentäre Überlieferung von Extremereignissen

Die vielfältigen Naturgefahren repräsentieren gleichsam spontane und massive Einwirkungen auf Lebens- und Ablagerungsräume. Dies wurde in jüngster Vergangenheit auf erschreckende Weise in Japan in Erinnerung gerufen. Sie sind verbunden mit nahezu gleichzeitig wirkenden Erosions- und Ablagerungsprozessen, in manchen Fällen auch mit Hebungen oder Senkungen des Terrains. Erosions- und Ablagerungsprozesse sind oftmals nur unvollständig verstan-

den, eindeutig indikative sedimentologische Merkmale nur in Teilen bekannt und die Erkennung und Analyse in der sedimentären Überlieferung daher nur eingeschränkt möglich. Zudem wird eine trennscharfe Analyse der Ablagerungen und Bildungsprozesse häufig durch die Unvollständigkeit der überlieferten Archive erschwert. Zu den für die Sedimentgeologie relevanten Naturgefahren gehören festländische und submarine gravitative Massenverlagerungen, meteorologische Extremereignisse, Tsunamis, Vulkaneruptionen und Meteoriteneinschläge. Als Beispiel sollen die hydrodynamischen und sedimentologischen Prozesse bei Auf- und Abfließen von Tsunamis in Küstenregionen nach Erdbeben, submarinen Hangrutschen oder Vulkaneruptionen gelten, die immer noch weitgehend unverstanden sind. Es gibt bisher weder eindeutige sedimentologische Merkmale noch ein integrierendes Faziesmodell, mit denen eine Analyse entsprechender Bildungen in der sedimentären Überlieferung zu steuern wäre. Eine Unterscheidung von Sturmablagerungen ist oftmals nicht eindeutig möglich. Daraus resultiert eine erhebliche Unsicherheit in der Ermittlung von Rekurrenzintervallen und damit der Gefährdung von zum Teil dichtbesiedelten Küstenräumen (z.B. Japan 2011). Darüber hinaus

Abb. 6: Neoproterozoische lakustrine Turbidite mit porphyrischen Bims-Lapilli, Wadi Abu Barqa Fm., Jordanien.



leitet das Verständnis aktuogeologischer Prozesse die Interpretation (prä-)historischer Ereignisse. Neben Geländestudien und Laborexperimenten ist insbesondere von der numerischen Simulation der wirksamen Prozesse ein signifikanter Erkenntnisgewinn zu erwarten.

Sedimentäre Becken und Vulkanismus

Beckensysteme, in denen sich vulkanische und subvulkanische Komplexe entwickeln, sind seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts in den Blickpunkt der Grundlagenforschung gerückt. Diese sogenannten „volcanic basins“ spielen aber auch bei der Kohlenwasserstoff-Gewinnung (z.B. Rockall Trough nordwestlich von Irland) oder im Zusammenhang mit Auslösern paläoklimatischer Krisen und von Aussterbe-Ereignissen eine wachsende Rolle (z.B. Sibirische Trapps und Karroo Basin).

Besonders interessant ist hierbei die Platznahme des Magmas als Lagergang oder Lakkolith und die Interaktion mit dem sedimentären Wirt. Die Einbeziehung des intra-Becken-Magmatismus hilft darüber hinaus, die tektonischen Modelle der Beckenentwicklung zu präzisieren. Ein weiterer Forschungsfokus sind vulkanosedimentäre Transport- und Ablagerungsprozesse in aktiven und fossilen Vulkanzonen. Beispiels-

weise ist im Bereich von Vulkaninseln die Faziesbeziehung zwischen subaerischen pyroklastischen Abfolgen und deren subaquatischen Pendanten (i.w. vulkanogene Massenströme) Forschungsthema der Grundlagen- und Gefahrenforschung und erhöht das Verständnis bestimmter Eruptionsformen. Vulkanische Ausbrüche, wie z.B. die der Soufriere Hills auf Montserrat in den 90er Jahren, produzieren pyroklastische Ablagerungen, die große textuelle Ähnlichkeiten mit vulkanogenen Sedimenten aufweisen können. Die Faziesanalyse vulkanosedimentärer Ablagerungen bleibt deshalb ein Forschungsschwerpunkt im Überlappungsbereich von Sedimentologie und Vulkanologie. Sie bildet auch die Voraussetzung, vulkanische Extremereignisse der Vergangenheit besser zu verstehen.

Sedimentäre Becken und Energieversorgung

Derzeit besteht der Energiemix aus fossilen, nuklearen und erneuerbaren Energieträgern, wobei die fossilen Energiequellen noch etwa 80 % des weltweiten Energiebedarfs decken. Die wesentlichen Energieressourcen werden dabei in Sedimentbecken gebildet und gespeichert. Durch die Entwicklung numerischer Ansätze und

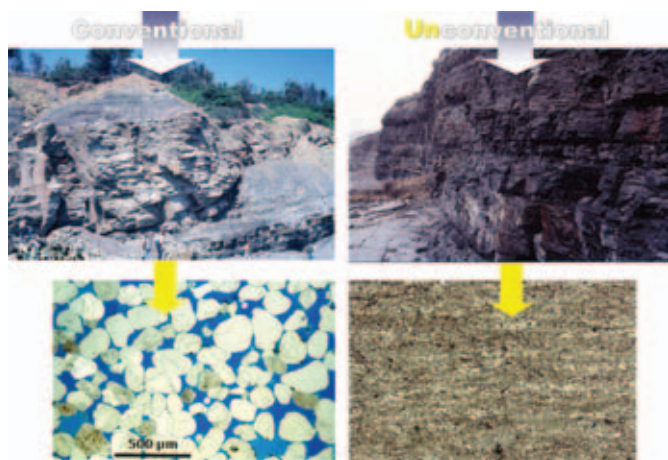


Abb. 7: Konventionelles poröses Reservoirgestein links, unkonventionelles dichtes Reservoirgestein rechts.

von Simulationsprogrammen sind seit etwa 20 Jahren Prozesse und Vorgänge in Sedimentbecken quantifizierbar. Darüber hinaus sind Lagerstätten von Erdöl- und -gas bekannt, deren Inhalt nicht mit konventionellen Methoden gefördert werden kann und die deshalb als „unkonventionelle“ Lagerstätten bezeichnet werden. Die Erschließung dieser Lagerstätten stellt eine große technologische Herausforderung dar, insbesondere für die deutsche Energiewirtschaft, da große Mengen an unkonventionell gespeicherten Kohlenwasserstoffen in den Sedimentbecken Deutschlands vermutet werden.

Das Wissen über die Entwicklung von Sedimentbecken und deren Lagerstättenpotentiale hat stark zugenommen. Der quantitativen Untersuchung der Lösungs- und Fällungsprozesse im Porenraum von Sedimentgesteinen wird dabei eine besondere Bedeutung beigemessen, da sie die Speicherfähigkeit von Reservoiren für Wasser, Erdgas und Erdöl determinieren. Die zukünftigen Arbeitsziele werden auch auf dem Gebiet der Erforschung dynamischer Prozesse bei der Ablagerung von feinkörnigen Sedimenten im Hinblick auf die Bildung von Wegsamkeiten und das Zusammenwirken von organischem und mineralischem Detritus und der darin dokumentierten Informationen zu Paläoklima und Paläodynamik liegen.

Dreidimensionale Reflexionsseismik – die sedimentgeologische Perspektive

Die dreidimensionale (3-D) reflexionsseismische Tiefenerkundung bietet heutzutage die Gelegenheit, den Aufbau des Erduntergrundes anhand von Schalldaten mit einer horizontalen und vertikalen Genauigkeit von 10–20 m bis in Tiefen von über 5.000 m zu erkunden. Gleichzeitig erstrecken sich 3-D reflexionsseismische Datensätze oft über mehrere 100 bis zu einigen 1.000 km² und können damit zusammenhängend große Teile von Sedimentbecken erfassen. Damit hat sich die 3-D reflexionsseismische Tiefenerkundung in den vergangenen 20 Jahren als eines der wichtigsten geophysikalischen Verfahren zur Suche nach konventionellen Energieressourcen (Öl, Gas), aber auch zunehmend in Bezug auf die Exploration geothermischer Ressourcen entwickelt.

Im Bereich der Sedimentgeologie liegt die Stärke der modernen 3-D reflexionsseismischen Tiefenerkundung in der einzigartigen Möglichkeit, sedimentäre Körper und stratigraphische Beziehungen großräumig im dreidimensionalen Detail darzustellen. Vor dem Hintergrund des stetigen Zuwachses der globalen 3D reflexionsseismischen Datenbasis in unterschiedlichsten Bereichen der Erde ergeben sich für sedimentologische Forschungsfragenstellungen insbeson-

dere zukünftige Herausforderungen: (1) zur 3-D Erfassung, stratigraphischen Korrelation und Kalibration von Flächen, Sedimentkörpern und gesamten Ablagerungssequenzen. Arbeiten hierzu werden wesentlich zur Erweiterung des Verständnisses der Entwicklung großräumiger sedimentärer Systeme wie z.B. submariner Fächer, Deltas oder Karbonatplattformen beitragen; (2) zur 3-D Darstellung und Analyse diagenetischer Fronten, um derzeit offene Fragen zur Bewegung von Fluiden im Untergrund zu bearbeiten; sowie (3) zur volumetrischen Analyse von Sedimentkörpern und -einheiten, um den Transfer von Sediment aus Liefergebieten in Ablagerungsbereiche zu quantifizieren. Diese Arbeiten ermöglichen u.a. interdisziplinäre Analysen der Beziehung von Materialtransfer und Sedimentationsprozessen zu Klimaveränderungen, der dynamischen Entwicklung von Topographie sowie zur großräumigen geodynamischen Entwicklung auf und an den Rändern von Kontinenten. Zusammenfassend bietet die Anwendung dreidimensionaler reflexionsseismischer Tiefenerkundung auf sedimentgeologische Forschung derzeit eine einzigartige Möglichkeit, grundlegende Beziehungen von Sedimentkörpern multidimensional und quantitativ zu bearbeiten.

Sedimentäre Geologie: Status, Signifikanz, Perspektiven

Die Methoden und Konzepte der Sedimentgeologie werden zunehmend in Nachbarfächern integriert, aber auch grundlagenorientiert weiterentwickelt. Teilgebiete der sedimentgeologischen anwendungsnahen Forschung bekommen Finanzierungsprobleme zwischen Industrie und Förderorganisationen, während andere Forschungs-Teilgebiete aufgrund des nötigen Aufwandes wesentlich von großen Unternehmen (z.B. der Kohlenwasserstoff-Industrie) vorangetrieben werden müssen. Die Forschungsförderung der im weitesten Sinne „sedimentgeologischen“ Themen hat in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Die Sedimentgeologie machte im gleichen Zeitraum einen Wandel durch. Ihre „Absorption“ in andere

geowissenschaftliche Subdisziplinen und in Nachbarfächer wird auch darin erkennbar, dass immer weniger Professuren/Lehrstühle schlicht „Sedimentgeologie“ oder gar „Sedimentologie“ benannt werden. Eine Diversifizierung der Sedimentgeologie und ihre zunehmende Integration in viele Nachbarfächer ist als Zeichen ihrer Relevanz grundsätzlich positiv und im Fächerkanon kein Einzelfall. Dies sollte allerdings nicht zu einer solch großen Divergenz führen, dass Verständnisfähigkeit und projektbezogene Integrierbarkeit leiden. Die Sedimentgeologie kann deswegen am besten als ein Kompetenzfeld verstanden werden, das viel zum grundlegenden Verständnis von erdoberflächennahen Vorgängen, aber auch zur praktischen Bewältigung fundamentaler Fragen beiträgt. Einige dieser vielen zukunftssträchtigen und herausfordernden Forschungsthemenfelder wurden hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit kurz skizziert. Die Sektion Sedimentologie der GV (SEPM-CES) macht sich unter anderem zur Aufgabe, (1) durch integrierende Veranstaltungen (z.B. Workshops) der fachlichen Divergenz entgegenzuwirken, (2) die Verbundfähigkeit der Sedimentgeologie (v.a. im deutschsprachigen Raum) zu stärken und (3) Möglichkeiten zu transdisziplinären Verbundprojekten und Einzelvorhaben auszuloten sowie Anregungen zu deren Umsetzung zu geben.

*Autoren (in alphabetischer Reihenfolge): Arp, Gernot, Göttingen; Back, Stefan, Aachen; Bahlburg, Heinrich, Münster; Betzler, Christian, Hamburg; Breitkreuz, Christoph, Freiberg; Fischer, Cornelius, Göttingen; Gaupp, Reinhard, Jena; Heimhofer, Ulrich, Bochum; Heubeck, Christoph, Berlin; Hinderer, Matthias, Darmstadt; Immenhauser, Adrian, Bochum; Möhle, Barbara, Aachen; Reichenbacher, Bettina, München; Reicherter, Klaus, Aachen; Reuning, Lars, Aachen; Spiske, Michaela, Münster; Stollhofen, Harald, Erlangen; Voigt, Silke, Frankfurt; von Eynatten, Hilmar, Göttingen