

## INTERDISZIPLINÄRE ANSÄTZE ZUR INTERPRETATION VON GEOMETRIEN IN VON MIKROBENMATTEN GEPRÄGTEN SEDIMENTEN UND GESTEINEN

W. E. Krumbein, H.-J. Schellnhuber, A. Block & G. Gerdes, Oldenburg

Die Litoralbereiche der Meere stellen als Austauschgebiete von Hydrosphäre, Atmosphäre, Geosphäre und Biosphäre die vielleicht verwickeltsten dynamischen Systeme unseres Planeten dar. Diese Aussage gilt in noch stärkerer Form für das Wattenmeer und seine etwa 10 Teilsysteme, wo unter dem Einfluß von physikalischen Kräften, geochemische Reaktionen und biologische Aktivitäten unablässig Systeme höchster funktionaler und geometrischer Komplexität und geophysiologischer Wirksamkeit gebildet, transformiert und abgebaut werden. Hier ist an erster Stelle zu nennen die oberste, ca. 1 m dicke Schicht des küstennahen Sediments, welche u. a. als eine poröse, durch unterschiedlichste Tiergänge zusätzlich hochstrukturierte, geologische Membran für umfangreiche organische und anorganische Materieflüsse wirkt. Spezifische lokale oder globale Eigenschaften eines solchen Megasystems sind von hoher Bedeutung für das Gesamtverhalten des biologisch dynamisierten Erdkörpers. Welche sorptiven, friktiven und reaktiven Kapazitäten im Hinblick auf Schadstoffimmissionen durch Flüsse, Schiffe oder Atmosphäre besitzen beispielsweise die extrem belebten Schlickfelder des Wattenmeeres?

Es liegt auf der Hand, daß eine Bewältigung dieser und verwandter Fragestellungen nicht innerhalb der traditionellen Grenzen nur einer naturwissenschaftlichen Einzeldisziplin geleistet werden kann, sondern intensive Kooperation zwischen den Fächern Sedimentologie, Mikrobiologie, Geochemie und Physik erfordert. Ebenso ist klar, daß sich die unter dem permanenten Antrieb von Wind, Gezeiten, Strahlung und chemischen bzw. biologischen Gradienten erzwungenen komplexen Morphologien mariner Systeme den üblichen Homogenitätsannahmen weitgehend entziehen und möglicherweise anomale Eigenschaften (Transport, Stabilität, Katalyse etc.) implizieren. Bis vor wenigen Jahren erschienen entscheidende Fortschritte im Verständnis typisch hochstrukturierter Objekte wie Mikrobenmatten, Sedimentgesteine oder "verfingerten" Schadstoff-Fronten zweifelhaft aufgrund des Fehlens eines von Mathematik und Physik bereitzustellenden theoretisch-quantitativen Fundaments: Solche Systeme

sind im Prinzip "mesoskopisch", d. h. nicht durch eine dominierende "charakteristische Länge" gekennzeichnet, sondern durch "Struktur auf allen Skalen". Weder kann die Geometrie dieser Objekte im Rahmen der klassischen "differenzierbaren" Mathematik beschrieben werden, noch ihre Genese und Dynamik im Rahmen der traditionellen "linearen reversiblen" Physik: Die sonst erfolgreichen vereinfachenden Arbeitshypothesen - absolut regelmäßige Ordnung oder völlige Amorphizität - sind nicht anwendbar; eine quantenmechanisch exakte Betrachtung auf einer atomaren Längenskala ist ebensowenig sinnvoll wie eine thermo-dynamisch-mechanische in "Alltagsgrößenordnungen".

In jüngster Zeit haben jedoch neben den neuen Hypothesen über den Bioplaneten sowohl in der Mathematik als auch in der Physik wissenschaftliche Durchbrüche stattgefunden, die eine methodische Basis für die quantitative Analyse mesoskopischer Systeme als Teilelemente eines geophysiologischen Geschehens geschaffen haben. Geophysikologie wird hier als die Physik solcher Planeten bezeichnet, die in ihrer eigenen Dynamik und ihren atmosphärischen, geochemischen und tektonischen Systemen von Lebensprozessen beherrscht sind. Der Analyse solcher Bioide oder Bioplaneten dienen:

1. Die Entwicklung der sog. Fraktalkalküls, womit eine wohldefinierte mathematische Beschreibung und Klassifikation hochstrukturierter Objekte durchgeführt werden kann. Im Verbund mit neueren Resultaten hinsichtlich der Charakterisierung von topologischer und kompositioneller "Unordnung" gestattet dieses Kalkül eine präzise geometrische Analyse von so komplexen Systemen wie porösen Sedimentgesteinen.
2. Die Entdeckung fundamentaler morphogenetischer Prinzipien im Rahmen der Physik nichtlinearer dynamischer Systeme und getriebener irreversibler Prozesse. Massive Fortschritte in diesem Bereich haben insbesondere bewirkt, daß die Entstehung natürlicher komplexer Systeme wie etwa Zellkolonien heute mittels Wachstumsmodellen verstanden oder doch wenigstens computersimuliert werden kann.

3. Die Entwicklung von neuen Methoden und Ansätzen der Geophysikologie und Mikrobiologie in der Erforschung von immobilisierten Mikroorganismen, Mikrobennetzen und anderen Komplex-Systemen des Küsten- und Flachmeerbereiches und hierdurch
4. Die Entdeckung, daß mikrobielle Prozesse in weit stärkerem Maße als je zuvor vermutet sämtliche geochemischen und energetischen Reservoirs, Pools und Umwälzungen zumindest von Atmosphäre, Hydrosphäre und der Erdkruste kontrollieren.

In allen angesprochenen Bereichen ist noch umfangreiche Grundlagenarbeit zu leisten; dies gilt noch mehr für das Verständnis der teilweise spektakulären physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften von Systemen mit "fraktaler" Morphologie, wie z. B. "Marine Snow", "Fecal Pellets" und "Microbial Mats". Die derzeit verfügbaren Methoden garantieren jedoch bereits einen völlig neuen mathematisch-physikalischen und somit auch mikrobiologischen Zugang zur Meeresforschung. Im Mittelpunkt der Erforschung der Prozesse an, um und in den drei genannten "Fabriken" oder Durchgangs-Systemen durch Wassersäule und Sediment stehen Fragen nach:

- Entstehung, Feinstruktur und Diagenese von küstennahen Sedimenten und Sedimentgesteinen
- Transport- und Filtereigenschaften fraktal-poröser Sedimente
- Geometrie und Dynamik von Mikrobennetzen
- Biogener Metalleanreicherung und Agglomerationsprozesse in der Wassersäule
- Wechselwirkung von Mikroorganismen und Makromolekülen mit hochstrukturierten Festkörpern
- Schadstoffausbreitung (anthropogene Stoffe) in raumzeitlich turbulenten Medien
- Natürlicher Ausbreitung und Fixierung von Energie und Stoffen in bioaktiven Sedimenten und während ihrer Diagenese

Einige der vorwiegend angestrebten Arbeitsthemen sollen im folgenden kurz vorgestellt werden. Es sei erwähnt, daß es sich hier nahezu immer um kooperative Projekte zwischen Mikrobiologen, Geologen, Sedimentologen, Chemikern, Mathematikern und Physikern in wechselnden Kombinationen handelt, die sich wieder und wieder mit dem benthischen System der Mikrobennetzen befassen sollen. Im Vordergrund unserer Bemühungen standen und stehen vor allem folgende Themen:

- Geometrische Charakterisierung ("Fraktalkartierung") rezenter und fossiler Sedimente (Biolaminite) im Flachmeerbereich
- Erforschung von Morphologie-, Dichte- und Energiegehaltänderungen sowie der chemischen Veränderung

rezenter Sedimente unter zunehmendem Druck, geochemischer und bioaktiver Transformation

- Neumodellierung der Transport- und Reaktionseigenschaften hochstrukturierter mariner Systeme
- Theoretische Beschreibung und experimentelle Überprüfung globaler Speicher- und Austauschprozesse im Flachmeerbereich unter besonderer Berücksichtigung geometrischer Determinanten

Im einzelnen

- Entstehung, Feinstruktur und Diagenese von küstennahen Sedimenten und Sedimentgesteinen
- Transport- und Filtereigenschaften fraktal-poröser Sedimente
- Geometrie und Dynamik von Mikrobennetzen
- Biogene Metalleanreicherung und Agglomerationsprozesse in der Wassersäule
- Wechselwirkung von Mikroorganismen und Makromolekülen mit hochstrukturierten Festkörpern
- Stoff- und Schadstoffausbreitung in raumzeitlich turbulenten Medien
- natürliche (geophysikologische) globale Bilanzen zwischen Sediment, Wassersäule und Atmosphäre im Küstenbereich unter Berücksichtigung fossiler Biosphären im Vergleich zu deren anthropogener Beeinflussung
- Erforschung der Flachwasser- und Küstenökosysteme
- Untersuchung der biogeochemischen und geochemischen Stoffkreisläufe im Wattenmeer und in benthischen Biolaminiten
- Experimentelle Untersuchungen und Modellentwicklung der Einbindung der Lebensprozesse mariner Organismen in die Physik und Chemie benthischer Systeme
- Beitrag zur biologischen Überwachung des Wattenmeeres
- Forschungen zum Verbleib und zur Dynamik von Schadstoffen
- Erforschung der für das Küsteningenieurwesen bedeutsamen Naturprozesse an der deutschen Nordseeküste.

Über die Frage der Sorption und Desorption von chemischen Verbindungen an den Mineralpartikeln der Sedimente kann auch ein Beitrag zur Erforschung des Verbleibs von Umweltbelastungen im Küstenbereich erwartet werden. Hierzu können insbesondere neue biogeophysikalische und geophysikologische Modelle beitragen. Diese werden oftmals mit teils der Kolloidalchemie teils der Oberflächophysik entlehnten Techniken und Rechenprozessen gelöst werden müssen.

Eine Art "fraktaler Kartographie" in Abhängigkeit von Standort, Material, Schichttiefe und den ablaufenden mikrobiologischen Prozessen durch die fast ausschließlich immobilisierten marinen Mikroorganismen müßte entwickelt werden. In weiteren Schritten sollte der Sedimentationsprozeß unter verschiedenen Randbedingungen und die Biogenese von Porosität (z. B. aufgrund der Einlagerung und Umwandlung von Schleimstrukturen und Organismenspuren) untersucht werden, um die möglichen Zusammenhänge zwischen Bildungsbedingungen von Flachmeerablagerungen und Biomineralisationen in ihnen und daraus entstehender Feinstruktur zu erhellen. Ein in die Diagenese reichendes Teilziel geophysilogischer Forschung ist die Untersuchung der Morphologie- und Dichteänderungen von Sedimentlagen unter dem zunehmenden Druck neugebildeter Schichten und fortschreitender interner physikalischer, geochemischer und bioaktiver Transformation. Auch diese Prozesse und Zusammenhänge müssen in der Folge berücksichtigt werden, ehe ein Gesamtbild der Geophysilogie rezenter Sedimente und der aus ihnen entstehenden Gesteine entworfen werden könnte. Daraus folgen Fragen nach

1. Fließen, Sickern, Diffundieren von Substanzen durch poröse Substrate (also z. B. Schadstoffausbreitung im Sediment),
2. Nährstoff- und Lichtzufuhr bei Mikrobematten,
3. lateralem Transport von unterschiedlich schweren und beweglichen Materialien über biologisch aktive und inaktive Meeresböden von gegebener (fraktaler) Rauigkeit,
4. dem Sorptionsverhalten feinkörniger Schichten (z. B. Filtrationsfähigkeit von Sandlagen, Absaugeffekt von Schlack),
5. den Austauschraten und Eindringtiefen von Sauerstoff und anderen biogenen Elementen innerhalb des Sedi-

ments und den sie auslösenden und steuernden mikrobiellen Prozessen,

6. den Lebensbedingungen (Beweglichkeit, Nahrungsfluß, Botenstoffausbreitung) von Mikroorganismen/Mikrofauna in labyrinthartigen Biotopen,
7. der raum-zeitlichen Dynamik von chemischen Reaktionen im Wattediment als heterogenem katalytischen Substrat.

Um zu globaleren und gleichzeitig verlässlicheren Werten über die Umwälzung relevanter Substanzen in bestimmten Regionen des Flachmeeres und insbesondere seiner Produkte (Böden und Sedimente) zu gelangen, muß neben den Transporteigenschaften der festen oder schleimigen Substrate komplementär die mesoskalige Dynamik der Wassersäule und des Direktüberganges in die Atmosphäre berücksichtigt werden. Wie kürzlich gezeigt wurde sind die Lagrangesch Trajektorien von Flüssigkeitsteilchen im allgemeinen fraktale Pfade, deren Dimension davon abhängt, ob die Strömungsverhältnisse deterministisch-turbulenten oder stochastisch-turbulenten Charakter besitzen. Ein längerfristiges Ziel im Zusammenhang mit den oben skizzierten Fragestellungen sollte somit die experimentelle und theoretische Untersuchung der Stoffaustauschverhältnisse zwischen Sedimenten, Mikrobematten, Detritus Kotbällchen, Wurm- und Organismengängen und Gangmündungen und der Wassersäule sein. Letzteres aber nach Maßgabe ihrer statischen und dynamischen Geometrien.

Als Fernziel ist die Bilanzierung der Geophysilogie planetärer Prozesse unter Berücksichtigung der biogeochemischen Umsetzung im sedimentären System und ihrer Auswirkung auf die globalen Speichermechanismen von natürlichen Energieträgern und Stoffen (Stoff- und Energiereservoir und deren turnover in geologischen Zeiträumen) zu sehen.