

SELBSTORGANISATION

**Jahrbuch für Komplexität
in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften**

**Herausgegeben von Ludwig Pohlmann (geschäftsführend)
in Zusammenarbeit mit Hans-Jürgen Krug und Uwe Niedersen**

Wissenschaftlicher Beirat

**Hans-Georg Bartel, Werner Ebeling, Rainer Feistel, Hermann Haken,
Rainer-M. E. Jacobi, Wolfgang Krohn, Hans-Jürgen Krug,
Hans-Peter Krüger, Lothar Kuhnert, Bernd-Olaf Küppers, Günter Küppers,
Niklas Luhmann †, Reinhart Mocek, Uwe Niedersen, Ludwig Pohlmann,
Ilya Prigogine, Peter Schuster, Frank Schweitzer**

Band 11 2000

**Nichtgleichgewichtsprozesse und
dissipative Strukturen in den Geowissenschaften**

**Non-Equilibrium Processes and
Dissipative Structures in Geoscience**

**Herausgegeben von
Hans-Jürgen Krug und Jörn H. Kruhl**



Duncker & Humblot · Berlin

SELBSTORGANISATION

Jahrbuch für Komplexität
in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften

Band 11

SELBSTORGANISATION

Jahrbuch für Komplexität
in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften

Band 11 2000

Nichtgleichgewichtsprozesse und
dissipative Strukturen in den Geowissenschaften

Non-Equilibrium Processes and
Dissipative Structures in Geoscience

Herausgegeben von
Hans-Jürgen Krug und Jörn H. Kruhl



Duncker & Humblot · Berlin

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Nichtgleichgewichtsprozesse und dissipative Strukturen
in den Geowissenschaften** = Non-equilibrium processes and dissipative
structures in geoscience / Hrsg.: Hans-Jürgen Krug ; Jörn H. Kruhl. –
Berlin : Duncker und Humblot, 2001
(Selbstorganisation ; Bd. 11)
ISBN 3-428-10506-0

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen
Wiedergabe und der Übersetzung, für sämtliche Beiträge vorbehalten
© 2001 Duncker & Humblot GmbH, Berlin
Fremddatenübernahme und Druck:
Berliner Buchdruckerei Union GmbH, Berlin
Printed in Germany

ISSN 0939-0952
ISBN 3-428-10506-0

Gedruckt auf alterungsbeständigem (säurefreiem) Papier
entsprechend ISO 9706 ⊗

Inhaltsverzeichnis

Einführung (<i>Hans-Jürgen Krug, Jörn H. Kruhl</i>)	7
 Aufsätze	
<i>Enrique Merino</i> (Bloomington), <i>Yifeng Wang</i> (Carlsbad): Geochemical Self-Organization in Rocks: Occurrences, Observations, Modeling, Testing – With Emphasis on Agate Genesis	13
<i>Ivan L'Heureux, Anthony D. Fowler</i> (Ottawa): Oscillatory Zoning in Minerals: Mechanisms and Implications	47
<i>Michael Landmesser</i> (Mainz): Selbstorganisation und Achatgenese: Wissenschaftsgeschichte, Problemfacetten und Resultate der neueren Forschung	73
<i>Hartmut Linde, Gudrun Linde</i> (Berlin), <i>Manuel G. Velarde</i> (Madrid): Morphogenese von Kiesel-Konkretionen mit komplexen Dissipativen Skulpturen	141
<i>Jörn H. Kruhl</i> (München): Korngrenzen als fraktale Muster und dissipative Systeme ...	187
<i>Cristian Suteanu, Dorel Zugravescu, Cristian Ioana</i> (Bukarest): Dynamic Fingerprints of Dissipative Systems with Discrete Appearance: Applications in the Study of Seismicity	209
<i>Bruce E. Hobbs, Hans-B. Mühlhaus, Alison Ord, Louis N. Moresi</i> (Nedlands): The Influence of Chemical Migration upon Fold Evolution in Multi-layered Materials	229
<i>Stephen A. Miller</i> (Zürich): The Role of Fluids on Self-Organization and Criticality in the Earth's Crust	253
<i>Hans-Jürgen Krug</i> (Berlin): Raphael Eduard Liesegang's Beiträge zu autonomen Strukturbildungsprozessen in Geologie und Mineralogie	265
 Edition	
<i>Giacomo Civitelli, Renato Funiciello, Salvadore Lombardi</i> : Einige Anmerkungen zur Genese der „Pietra Paesina“ (1970) (<i>Karl-Heinz Jacob</i>)	309
<i>Raphael Eduard Liesegang</i> : Schriftenverzeichnis (<i>Hans-Jürgen Krug</i>)	335

Buchbesprechungen

<i>Tom G. Blenkinsop, Jörn H. Kruhl, Miriam Kupková (Eds.): Fractals and Dynamic Systems in Geoscience (Hans-Jürgen Krug)</i>	375
<i>Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.): Lagerstättenkundliches Wörterbuch der deutschen Sprache (Jörn H. Kruhl)</i>	376
Autorenverzeichnis	379

Einführung

Wie kaum ein anderer Zweig der Naturwissenschaft befassen sich die Geowissenschaften mit den Dokumenten einer nie zum Stillstand kommenden Entwicklung. Diese Stein gewordenen Dokumente sind die Fossilien ‚geologisch‘ lange dauernd und noch heute – fast unbemerkt – ablaufender Prozesse. Sie weisen oftmals untereinander sehr ähnliche Strukturen in jedoch verschiedensten, zuweilen weit auseinander liegenden Größenskalen auf. Mit diesen Funden können wir heute versuchen, den Ablauf ihres durch viele Schübe und Zäsuren bestimmten Werdens zu rekonstruieren. Aus im Grunde ‚schattenhaften‘ Zeugnissen der Erdkruste soll ein transparentes Bild ihrer Geschichte gewonnen werden.

Diese Aufgabe ist für den Geowissenschaftler aus mehreren Gründen problematisch. Da begegnet ihm zuerst der Konflikt der zeitlichen Dimensionen: Aus der Perspektive des heutigen Betrachters erscheint jedes zu Tage gebrachte Gesteinsstück als feststehend, physikalisch gesprochen als konservative Struktur. Dieser Eindruck entsteht, weil der Mensch die Zeitskalen seines eigenen Erlebnishorizonts unbewusst auf andere Bereiche überträgt.¹ Deshalb nimmt er die verborgenen, wie langsam Bildungs- und Umbildungsprozesse der Lithosphäre nicht wahr und billigt den steinernen Zeugen der Vergangenheit allenfalls einen längst abgeschlossenen Werdegang zu. Gleichwohl wurde der Mensch in seiner Geschichte oft leidvoll mit für ihn unberechenbaren Katastrophen wie Erdbeben oder Vulkanausbrüchen konfrontiert. Die kurze Dauer und Intensität dieser Ereignisse verstellt jedoch den Blick auf die im Untergrund ablaufenden Prozesse, die Teile der Lithosphäre nur allmählich an den Rand ihrer Instabilität bringen.²

Jedes aus der Tiefe der Erdkruste entnommene Handstück wird dadurch zwangsläufig aus dem Zusammenhang eines kaum messbaren, aber permanent wirkenden Energie- und Stoffwechsels mit seiner früheren Umgebung gerissen.³ So bleibt beispielsweise ein in eine mineralogische Sammlung verbrachtes verkieseltes Holz danach praktisch unverändert, während sich die Porenräume eines in der Erde belassenen benachbarten Stammes weiter mit Kieselsäure anreichern können. In den größeren Hohlräumen verkieselnder Hölzer wachsen zuweilen Achate, die ihre

¹ Zur unbewussten Übertragung von Erlebnishorizonten siehe Jakob von Uexküll, *Nie geschaute Welten*, Berlin 1939, S. 11 ff.

² Vgl. den Beitrag von Cristian Suteanu/Dorel Zugravescu/Cristian Ioana im vorliegenden Band.

³ Der Kolloidchemiker Raphael Eduard Liesegang (1869–1947) vertrat diese Auffassung bereits 1915 bezüglich der Achatgenese in: *ders.*, *Die Achate*, Dresden/Leipzig 1915, S. 22 ff.

Entstehung Jahrtausende währenden Diffusionsvorgängen verdanken.⁴ Jedes Stück einer Sammlung ist also das durch den menschlichen Eingriff fixierte bzw. konservierte Standbild eines in der Natur sonst transientes Zustandes.

Wenn wir also zum einen nur immer Zeuge eines extrem kurzen Zeitabschnittes der Entwicklungsgeschichte der Gesteine sein können und uns wichtige, aber kurzlebige Zwischenstufen dieser Entwicklung vermutlich nie begegnen werden, ist zum anderen unser Wissen über den Aufbau und die Entwicklung der Lithosphäre äußerst lückenhaft, da geologisch interessante Handstücke häufig am Rande ökonomisch motivierter Explorationen gesammelt und unter vorgefassten theoretischen Aspekten oder ästhetischen Gesichtspunkten archiviert werden.⁵

Kehren wir aber zu den rezenten Strukturindizien der Erdgeschichte und damit zum Thema des vorliegenden Bandes zurück. In vielen geologischen Aufschlüssen, Handstücken und selbst einzelnen Kristallen finden sich Bänderungen oder konzentrische Muster. Dieses ins Auge springende aber wegen seiner Häufigkeit oft verdrängte Phänomen wurde in der Geologie oder Mineralogie gewöhnlich als Ergebnis „äußerer“ diskontinuierlicher Sedimentations- oder Kristallisierungsprozesse gedeutet. Das ist insofern eine legitime Annahme, da es in der Natur tatsächlich zahlreiche externe Rhythmen gibt, die in etwa gleichem Takt die Bedingungen für Sedimentation, Konkretion oder Kristallisation im Erdinnern variieren. Diese sind der Tag- und Nachtrhythmus, der Wechsel der Jahreszeiten und schließlich sporadisch auftretende klimatische Katastrophen, die (in dieser Abfolge) zunehmend massive biogene Sedimente hervorbringen. Gegen die pauschale Gültigkeit dieser Annahme spricht jedoch, dass Bänderungen oftmals in den verschiedensten Größenkalen auftreten, periodische Unterstrukturen und Pseudoklassen in homogenem Untergrund aufweisen. Beispielsweise finden sich in vielen Gesteinen gebänderte Erze, die ihrem gänzlich unstrukturierten Untergrund nur überlagert, also erst später – vermutlich in einem vormaligen Gelstadium – dort gefällt worden sein müssen.⁶

⁴ Vgl. Michael Landmesser, Zur Entstehung von Kieselhölzern, in: extraLapis No. 7: „Versteinertes Holz“, (1994), S. 49–80; ders., Die Genese der Kieselhölzer aus Sicht der physikalisch-chemischen Mineralogie, in: Katalog zur Ausstellung „Edle Steine aus Holz“ (3. 9.–15. 11. 1999), Idar-Oberstein 1999, S. 29–45.

⁵ In diesem Zusammenhang ist eine Stelle aus der Autobiographie von R. Ed. Liesegang interessant, der sich ab 1909 im Senckenberg-Museum in Frankfurt a. M. mit der Genese von Achaten befasste: „Es mußte untersucht werden, was für die Entstehung aus dem Feurflüssigen oder aus dem Wäßrigen sprach. Die Entscheidung fiel für das letztere. Trotz ihrer Schönheit und Größe waren aber Prachtstücke im Senckenberg wenig geeignet, Auskunft über den weiteren Mechanismus der Entstehung zu geben. Die für 50 Pfennige erworbenen Achatabfälle einer Chemikalienfirma waren wissenschaftlich wertvoller. Denn sie enthielten kleine Achatbruchstücke, an denen noch Nebengestein haftete.“ (Ders., Und doch! (Autobiographie aus dem Jahre 1945), in: H.-J. Krug/L. Pohlmann (Hrsg.), Evolution und Irreversibilität (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Band 8), Berlin 1997, S. 215–296, hier S. 265).

⁶ Es ist heute fast in Vergessenheit geraten, dass bereits Anfang des 20. Jahrhunderts von prominenten Forschern wie Felix Cornu (1882–1909) und Paul Krusch (1869–1939) eine so genannte „Gelerztheorie“ entwickelt wurde.

Deshalb, und viele andere Indizien ließen sich anführen, ist es wahrscheinlich, dass gebänderte Strukturen nicht auf Schwankungen der äußeren Bedingungen bzw. nicht auf sie allein zurückgeführt werden können.

Wir haben bereits oben angedeutet, dass die Lithosphäre von Anfang an ein Schauplatz stofflicher und energetischer Transformationen gewesen ist, die an ihrer Oberfläche spektakulär als Vulkanausbrüche, zumeist aber für uns verborgen in tieferen Bereichen als diffusive, konvektive oder chemische Prozesse ablaufen. Solche permanenten Stoff- und Energietransformationen sind aber in den modernen, aus der Physik bzw. der physikalischen Chemie gewachsenen Selbstorganisationstheorien eine zentrale Voraussetzung zur Erzeugung autonomer, d. h. von äußeren Rhythmen unabhängiger, so genannter *dissipativer Strukturen*.⁷

Die Vermutung, dass lang anhaltende physikochemische Prozesse zu geologischen Veränderungen beitragen können, wurde schon zu Anfang des 19. Jahrhunderts geäußert und führte zur Annahme mineralischer Stoffkreisläufe in der oberen Lithosphäre. Aber erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts erkannte man in der physikalischen Chemie, dass kontinuierliche Stoff- und Energietransformationen durch inhärente Rückkopplungen zu räumlichen und zeitlichen Mustern führen können. Dies entspricht einer selbstorganisierten Transformation von Kontinuität (der einwirkenden Kräfte) zur Diskontinuität (der räumlichen wie zeitlichen Resultate). Bereits vorhandene, etwa sedimentär gebildete Bänderungen werden dabei nicht nur umgebildet, sondern es entstehen – ohne äußere Vorprägung – auch völlig neue Strukturen.

1896 wurden vom Physikochemiker Raphael Eduard Liesegang (1869 – 1947) die später nach ihm benannten Fällungsmuster entdeckt, die sich relativ schnell zu einem Vorbildexperiment für sich selbst organisierende Strukturen auch in den Geowissenschaften durchsetzten. Liesegang selbst hatte noch vor dem ersten Weltkrieg in zwei damals durchaus wohlwollend rezipierten Monographien auf die Relevanz von Diffusions- und Fällungsvorgängen in der Geologie und Mineralogie hingewiesen.⁸ Diese Vorläuferschaft Liesegangs konnte aber erst in den letzten beiden Jahrzehnten wieder aufgegriffen werden, nachdem in der modernen Physik bzw. der physikalischen Chemie sich mit den Schulen von Prigogine und Haken

⁷ Die auf Ilya Prigogine und Hermann Haken zurückgehenden modernen naturwissenschaftlichen Selbstorganisationstheorien wurden in unserer Jahrbuchreihe bereits mehrfach thematisiert. Die für das Auftreten dissipativer bzw. selbstorganisierter Strukturen notwendigen systemischen Voraussetzungen seien deshalb nur skizziert. Zu ihnen gehören: 1. dauerhafte Gleichgewichtsferne, 2. Überschreiten kritischer Bedingungen, 3. nichtlineare thermodynamische Kraft-Fluss-Beziehungen (vermittelt durch kinetische Rückkopplungen innerhalb des Systems).

⁸ R. Ed. *Liesegang*, Geologische Diffusionen, Dresden / Leipzig 1913; ders. Die Achate, Dresden / Leipzig 1915. Getragen von der sich stürmisch entwickelnden Kolloidwissenschaft war der von Liesegang propagierte Diffusionsansatz bis in die 30er Jahre des 20. Jahrhunderts in den Geowissenschaften durchaus akzeptiert. Vgl. dazu Gottlob Linck, Stichwort „Diffusion in Mineralien und Gesteinen“, in: H. Dittler (Hrsg.), Handwörterbuch der Naturwissenschaften, 2. Aufl. Jena 1933, S. 1053 – 1055.