

# Erdwissenschaften heute : ist GAIA endotherm?

Autor(en): **Hsü, K.J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **89 (1991)**

Heft 3

PDF erstellt am: **20.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-234575>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

- land», Österreichisches Kuratorium für alpine Sicherheit, Wien 1986, S. 161 ff.
- [11] Salm, B. u.a.: Vorlesung über Schnee, Lawinen und Lawinenschutz. Eidg. Technische Hochschule Zürich, Assistenten Wasserbau ETH Hônggerberg Zürich, S. 277.
- [12] Salm, B. u.a.: Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/Davos Mitteilung Nr. 47, 1990, S. 37.
- [13] Schwarz, W.: Entwicklung von Werktypen in Stahl. «Bündner Wald» 41. Jhg. August 1988, Chur, S. 13 ff.
- [14] Eidg. Forstdirektion (BUWAL) und Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung: Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. EDMZ Bern 1990, S. 76.
- [15] Heimgartner, M.: Fundation im Lawinenverbau. «Internationales Symposium über die Bildung, Bewegung und Wirkung von Lawinen». Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch/Davos, Nr. 43 1987, S. 19 ff.
- [16] «Bündner Wald»: 50 Jahre Schnee- und Lawinenforschung auf Weissfluhjoch, Separatdruck 5/1986 Chur, 44 S.
- [17] Leuenberger, F.: Handbuch/Bauanleitung Temporärer Stützverbau und Gleitschneeschutz. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch/Davos, Juni 1989, 81 S.
- [18] Campell, E.: Verwehungsverbau. Beiheft Nr. 9 zum «Bündner Wald». Dezember 1972, Chur, S. 144 ff.
- [19] Sommerhalder, E.: Ablenkverbau. Beiheft Nr. 9 zum «Bündner Wald». Dezember 1972, Chur, S. 155 ff.
- [20] Gubler, H.: Temporäre und permanente Lawinenschutzmassnahmen für touristische Anlagen. Mitteilung Nr. 45 des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch/Davos 1986, 10 S.
- [21] Föhn, P.: Die Lawinenkatastrophe vom Februar 1984. Winterbericht Nr. 48 des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung 1985, S. 186 ff.

Adresse des Verfassers:

André Burkard  
dipl. Kulturing. ETH  
Eidgenössisches Institut für  
Schnee- und Lawinenforschung  
CH-7260 Weissfluhjoch/Davos

## Erdwissenschaften heute: Ist GAIA endotherm?

K. J. Hsü

**GAIA ist ein Leitbild oder Konzept für die Gesamtheit der terrestrischen Prozesse in Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Lithosphäre, die als unentbehrliche Elemente jeder organischen Aktivität derart zusammenwirken, dass Leben auf der Erde möglich ist. Die Erde wurde zur GAIA, als Leben auf ihr entstand, GAIA war krank während Zeiten biologischer Krisen mit ihren Massensterben, und GAIA wird sterben, wenn das gesamte Leben ausgerottet wird. Endotherm bezieht sich hier auf die Fähigkeit eines Organismus, seine Körpertemperatur innerhalb der für sein Überleben notwendigen Grenzen halten zu können, wie es bei den Säugetieren allgemein der Fall ist. Wenn GAIA endotherm ist, was ist der temperaturregulierende Mechanismus?**

*GAIA est un concept pour l'ensemble des processus terrestres dans l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère. Ces processus constituent, de par leur interaction, les éléments indispensables à toute activité organique et permettent de créer ainsi les conditions nécessaires à la vie sur terre. La terre est devenue GAIA lorsque la vie y est apparue. GAIA a été malade lors des périodes de crise biologique marquées par des disparitions en masse, et GAIA s'éteindra lorsque toute vie aura cessé.*

*Dans le cas particulier, endothermique signifie l'aptitude d'un organisme à maintenir la température de son corps à la limite nécessaire pour sa survie, comme c'est généralement le cas chez les mammifères. Si GAIA est endothermique, quel est le mécanisme régulateur de température?*

«Wir leben in einem tragischen Zeitalter», klagte D. H. Lawrence (Lady Chatterly). Dass es so weit kam, ist zwei ideologischen Revolutionen zu verdanken, die ihrerseits in wissenschaftlichen Entdeckungen gründen. Die Menschheit währte sich nahe bei Gott, denn dieser entsandte sei-

nen einzigen Sohn, um uns zu retten; wir waren also auserwählt, ebenso wie die Welt, in der wir leben. Erste Revolution: Kopernikus lehrte uns etwas anderes. Es gibt weder Himmel noch Hölle, die Erde ist nur ein kleiner Planet unter unzähligen andern und umkreist einen Stern unter Mil-

liarden seinesgleichen. Die Revolution durch Darwin tat den Rest: Wir Menschen sind nur Homo sapiens, eine Spezies unter Millionen anderer Spezies. Die Menschheit fühlte sich verraten, denn Gott hatte kaum Zeit für uns, er hatte sich um zuviele andere Sterne und um zuviele andere Lebewesen zu kümmern; er war so weit weg.

Wir leben am Ende des 20sten Jahrhunderts, und eine dritte Revolution zeichnet sich ab. Die Erde ist nicht nur ein Planet unter unzähligen, es ist ein spezieller Planet, es gibt keine Anzeichen einer anderen «Erde» im ganzen Universum. Auch sind wir nicht eine Spezies unter Millionen, wir wissen von keinen anderen intellektuellen Wesen im Weltraum. Die Unzufriedenheit mit dem «Zeitalter der Intrigen» wächst, Rousseau gewinnt an Boden mit Greenpeace, WWF etc., und alles deutet auf eine Renaissance der Religion hin.

Ist GAIA endotherm? Was ist GAIA? Was heisst endotherm? Was wissen wir über die Klimageschichte der Erde? Hilft uns derartige Information weiter?

GAIA ist eine Metapher für die einen, eine Theorie für die anderen. Ich brauche es als Leitbild oder Konzept für die Gesamtheit der terrestrischen Prozesse in Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Lithosphäre, die als unentbehrliche Elemente jeder organischen Aktivität derart zusammenwirken, dass Leben auf der Erde möglich ist. Die Erde wurde zur

# Partie rédactionnelle

GAIA, als Leben auf ihr entstand, GAIA war krank während Zeiten biologischer Krisen mit ihren Massensterben, und GAIA wird sterben, wenn das gesamte Leben ausgerottet wird.

Endotherm bezieht sich hier auf die Fähigkeit eines Organismus, seine Körpertemperatur innerhalb der für sein Überleben notwendigen Grenzen halten zu können, wie es bei den Säugetieren allgemein der Fall ist. Wenn GAIA endotherm ist, was ist der temperaturregulierende Mechanismus?

## Der Kohlenstoffhaushalt

Die Oberflächentemperatur der Erde wird durch drei Faktoren beeinflusst: (1) von der Strahlungsenergie der Sonne – der Einstrahlung, (2) der Grösse des ins All reflektierten Anteiles – dem Albedo, und (3) dem von der Atmosphäre zurückgehaltenen Anteil der von der Erdoberfläche emittierten Infrarotstrahlung – dem Treibhauseffekt. GAIA kann die Einstrahlung nicht kontrollieren. Änderungen des Albedo hängen vorwiegend mit der Grösse der Eisflächen zusammen, also indirekt mit der Temperatur der Erdoberfläche. Die gängigen Theorien machen vor allem die sich verändernde Konzentration der Treibhausgase für die Klimawechsel verantwortlich. Kohlensäure ist dabei das wichtigste dieser Gase. Es entstammt primär dem Erdinnern und wird mit Wasserdampf durch Vulkanismus freigesetzt. Die Verschiebung des Gleichgewichtes, Produktion durch Vulkane und Bindung durch Organismen bestimmen die Wirkung des Treibhauseffekts.

Die Entwicklung des Lebens auf der Erde verhinderte eine heisse Venusatmosphäre (Überproduktion  $\text{CO}_2$ ) wie auch eine kalte Marsatmosphäre (zu starker Verlust von  $\text{CO}_2$ ). Das Treibhaus, bedingt durch das atmosphärische  $\text{CO}_2$ , ist die Kleidung der GAIA: Wird es zu warm, zieht sie etwas aus, wird es kühler, zieht sie sich besser an.

## Das atmosphärische $\text{CO}_2$ und der Kohlenstoffkreislauf

Auf einem Planeten ohne Leben wird das vulkanische  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre gelangen, dann durch allfällige Regen zum Teil auf die Oberfläche gebracht, wo es mit dem Gestein reagieren kann (Verwitterung, Erosion). Ein Teil dieses Kohlenstoffes wird für immer im Kalkstein chemisch gebunden bleiben und nicht mehr in die Atmosphäre zurückkehren. Die Atmosphäre kann nur einen konstanten  $\text{CO}_2$ -Druck aufrechterhalten, wenn die Produktion gewährleistet ist. Kein anderer Planet unseres Sonnensystems – ausser GAIA – konnte den  $\text{CO}_2$ -Gehalt kontrollieren.

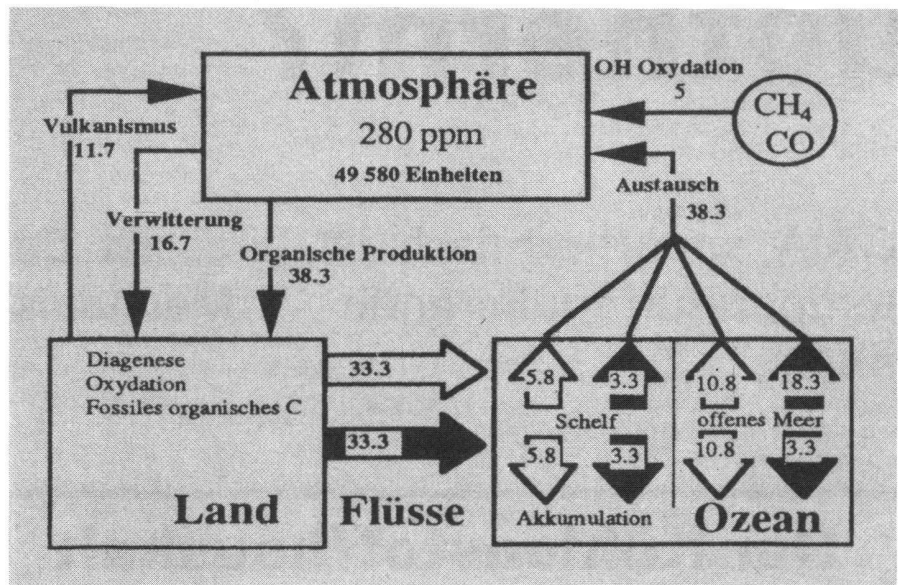


Abb. 1: Das Modell von Wollast und MacKenzie des geologischen Langzeithaushaltes von  $\text{CO}_2$  (F. MacKenzie 1990). Die Einheiten sind  $10^{12}$  mol pro Jahr. Organischer Kohlenstoff ist durch schwarze Pfeile, anorganischer durch weisse Pfeile dargestellt.

Heute enthält die Erdatmosphäre 50 000 Einheiten  $\text{CO}_2$  (zu je  $10^{12}$  mol Kohlenstoff, vgl. Abb. 1). Die jährliche Produktion durch Vulkanismus beträgt 11,7 Einheiten, der Verbrauch durch Verwitterung an Land 16,7 Einheiten. Ohne Leben auf Erden entstünde ein Defizit von 5 Einheiten pro Jahr und in 10 000 Jahren wäre alles  $\text{CO}_2$  aufgebraucht (mit kalten Folgen!).

Auf den ersten Blick verbraucht aber das Leben mehr  $\text{CO}_2$ , als es zurückgibt. Die organische Produktion entzieht der Atmosphäre jährlich 38,3 Einheiten. Trotzdem deutet die Klimageschichte auf einen ausgeglichenen Kohlenstoffhaushalt während der letzten 10 000 Jahre. Es müssen also noch andere Quellen vorhanden sein. Durch Verwesung und Zerfall der abgestorbenen Lebewesen entstehen  $\text{CH}_4$  und andere Gase, die durch Oxydation etwa 5 Einheiten an die Atmosphäre zurückgeben. Doch dies ist nicht genug! Der grosse Rest des Defizits wird im Austausch mit dem Ozean kompensiert, welcher es seinerseits von den Kontinenten erhält. Durch die Verwitterung der Karbonatgesteine an Land gelangt mit den Flüssen genügend Kohlensäure ins Meer ( $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ).

Die Karbonatreserve auf den Kontinenten ist riesig, und diese Reserve ist das Geheimnis der GAIA, womit sie ihren Kohlenstoffhaushalt im Gleichgewicht hält. Während der Eiszeit war der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre etwa bei 200 ppm. Luftblasen im alten Polareis deuten auf einen Gehalt von 280 ppm am Ende der Eiszeit hin, und in den letzten 200 Jahren stieg er auf 350 ppm. Durch die heutige intensive Verbrennung der Erdölprodukte muss der Ozean gar als Empfänger von  $\text{CO}_2$  funktionieren statt als Spender.

Es sollte langsam klar werden, wie komplex dieser Kohlenstoffhaushalt ist, dabei haben wir so wichtige Mitwirkende wie z.B. die Tropischen Regenwälder noch gar nicht erwähnt.

Eine Anzahl von Bedingungen zu einer bestimmten Zeit werden einen Kohlensäureüberschuss oder ein Defizit in der Atmosphäre bewirken, so dass wir die Klimawechsel in der Erdgeschichte als Abbild der Verschiebungen im Kohlenstoffgleichgewicht betrachten können. Die Tatsache, dass GAIA die letzten 4 Milliarden Jahre überlebt hat, beweist, dass sie die verschiedenen Inflationen und Rezessionen der  $\text{CO}_2$ -Wirtschaft immer wieder regulieren konnte. Wir war das möglich, insbesondere in der frühen Erdgeschichte, als das Karbonatreservoir an Land noch sehr beschränkt war? Die Antwort ist Kohlenstoffbindung.

## Das archaische Treibhaus

Zur Bildung von organischem Zellgewebe werden verschiedene Kohlenstoff- und Energiequellen benutzt. Mittels der Kohlenstoffisotopen-Analyse kann man mehrere Prozesse der Kohlenstoffbindung unterscheiden. Der Kohlenstoff kennt zwei stabile Isotopen: C-12 und C-13. Wenn ein bestimmtes Enzym (RuBP) durch die chemische Reaktion, genannt Carboxylierung,  $\text{CO}_2$  bindet und Carboxylsäure bildet:  $\text{CO}_2(\text{extern}) \gg \text{CO}_2(\text{intern}) \gg \text{RCOOH}$ , wird bevorzugt C-12 gebraucht, und das Verhältnis C-12/C-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ist im Endprodukt um etwa 30% verschieden von jenem im  $\text{CO}_2$ . Auf dieser Erkenntnis können wir die fossilen organischen Koh-

lenstoffe analysieren und feststellen, ob und wann in der Erdgeschichte diese Reaktion vermehrt ablief. Fazit: zu allen Zeiten in der Erdgeschichte war das Isotopenverhältnis des sedimentären organischen Kohlenstoffs etwa gleich, nämlich um die -25%, verglichen mit dem Standard, oder mit andern Worten: GAIA benutzte seit Urzeiten immer denselben Mechanismus, um «ihre Stube kühl zu halten».

Welches waren die ersten Lebensformen? Die Paläobiologen sind sich heute einig, dass die ersten Organismen anaerobe Fermentierer waren, wie sie in den 3.5 Milliarden Jahren alten Gesteinen der Warrawoona-Formation in Australien gefunden werden. Diese schwarzen laminierten Silexite mit den ältesten archaischen Mikrofossilien wurden in reduzierendem Milieu abgelagert. Es muss sich um prokaryontische mattenbildende «Pflanzen» handeln, die an der Sedimentoberfläche in untiefem Wasser oder der Gezeitebene lebten.

Die Existenz dieses Urschlammes verhinderte die Entwicklung in Richtung Venus. Wie aber wurde GAIA erwärmt, da die Astronomen behaupten, die Einstrahlung zu jener Zeit sei 25% schwächer gewesen als heute? Um auch eine Entwicklung in Richtung Mars zu verhindern, muss der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre 80–600mal grösser gewesen sein wie heute. Dazu könnte man den viel aktiveren Vulkanismus im Archaikum heranziehen. Oder man könnte sich einen Rückkopplungseffekt der Verwitterung vorstellen. Die Verwitterung braucht CO<sub>2</sub> der Atmosphäre und produziert Kalk:  $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaCO}_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ .

Das Mass der Silikatverwitterung ist bedingt durch den CO<sub>2</sub>-Partialdruck und die Temperatur. Wenn der CO<sub>2</sub>-Druck auf der Erde niedrig war und ebenso die Temperatur als Folge der geringeren Einstrahlung, so wäre auch der CO<sub>2</sub>-Verbrauch durch die Verwitterung reduziert, und die vulkanische Entgasung könnte Schritt halten. Falls dieser Mechanismus wirksam war, weshalb entdeckte dann der Mars diesen Thermostaten nicht? Und wieder wird die Biosphäre herangezogen, man sucht die Antwort in der Aktivierung von Kohlenstoff im organischen Reservoir.

Die Isotopenanalysen deuten auf verbreitete Methan verarbeitende bio-chemische Prozesse hin, die vor 2.8–2.5 Milliarden Jahren Kerogene mit δ<sup>13</sup>C-Werten von etwa -50‰ produzierten. Zu jener Zeit war die Methanogenese ein wichtiger Faktor in der anaeroben Verwesung von organischem Material. Methan ist aber ein viel aktiveres Treibhausgas als CO<sub>2</sub>. War die Methanbildung effizienter als die sulfatreduzierenden Bakterien, als GAIA sich zu erkälten drohte?

## Die proterozoische Klimatisierung

Früher oder später verstärkte sich die Einstrahlung. GAIA musste den Wintermantel ausziehen, der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre musste um den Faktor 100 oder mehr reduziert werden. Wie und wann geschah das?

Es wird berichtet, dass im späten Archaikum (2.9–2.5 Ga = 10<sup>9</sup> Jahre) auf der Erdoberfläche grosse Umwälzungen stattfanden. Frühere anaerobe Lebensformen ertrugen den freien Sauerstoff nicht. Die neuentstandenen Proto-Cyanobakterien waren selber imstande, durch Photodissoziation aus Wasser Sauerstoff zu machen. Sie waren auch resistent gegenüber der UV-Strahlung und füllten erfolgreich die ökologischen Nischen im euphotischen, benthonischen Lebensraum (Meeresbodenteil mit Tageslicht). Die Entwicklung der Photosynthese mit Sauerstoff erlaubte gleichzeitig die Entwicklung von Sauerstoffverwertern, die Cyanobakterien und alle höheren Lebensformen. Der Aufbau der Ozonschicht in der oberen Atmosphäre begünstigte die Entwicklung von nicht UV-resistenten Formen wie die planktonischen Prokaryonten und erlaubte die weite Verbreitung der stromatolithischen Lebensgemeinschaften in vielen neuen Lebensräumen. Diese nun einsetzende kräftige Bioproduktion bewirkte eine zunehmende Sedimentation und damit eine Archivierung von Kohlenstoff.

Zwei Formen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre sind bekannt: fossiler organischer Kohlenstoff und Karbonatgesteine. Im zunehmend oxydierenden Milieu verminderte sich der Anteil an fossilem Kohlenstoff, welcher selbst vermehrt oxydiert wurde. Dagegen nahm die Sedimentation von zwei spezifischen Karbonattypen überhand: die gebänderten Eisenerze (als Siderit gebildet, später zu Hämatit umgewandelt) im späten Archaikum (2.2–1.8 Ga) und dann vor allem die Stromatolithe im frühen Proterozoikum (1.7–1.5 Ga). Durch diese zunehmende Kohlenstoffixierung in den Stromatolithen werden die vorher dominanten biogenen Silexite nun durch biogene Karbonate abgelöst. Die Fällung des Kohlenstoffs als Karbonate ist ein wirksames Mittel, um Kohlenstoff der Atmosphäre zu entziehen, und dadurch wurde die Erde von einem Venusklima verschont, als die Einstrahlung intensiviert wurde.

## Die Krise zu Beginn des Kambriums

Bevor im Kambrium die ersten Trilobiten auftraten, waren zwei wichtige Schritte in der biologischen Evolution vollzogen worden. Die ersten Lebewesen waren die Prokaryonten (Bakterien, Cyanobakterien

oder «Blau-grün-Algen»), Formen ohne Unterteilungen der Zellen in Kern, Organellen etc. Irgendwann nach 1.5 Ga im späten Proterozoikum wurden die Eukarionten erfunden, ein- oder mehrzellige Organismen (Protisten, Pilze, Pflanzen und Tiere), die sich durch Zellteilung entwickeln und reproduzieren konnten. Eine erste Verbreitung dieser Eukarionten ist durch die bekannte Edicaria Fauna belegt. Der freie Luftsauerstoff diente der Respiration wie auch der Nitratbildung für Nährstoffe.

Der zweite wichtige Schritt war die «kambrische Explosion», das Überhandnehmen der Eukarionten. Die Hartteile (z.B. CaCO<sub>3</sub>) wurden erfunden. Die Trilobiten und andere kalkige Organismen kamen auf den Plan.

Diese beiden revolutionären Entwicklungsschübe passierten während kritischen Umweltbedingungen: Eine fast globale Eiszeit hatte von 1.0 bis 0.6 Ga fast alle Kontinente erfasst (ausser Antarctica). Die Expansion der Eukarionten ging mit dem Niedergang der Stromatolithen einher. Waren die endothermischen Kräfte von GAIA aktiv?

Die Stromatolithen waren «Air-conditioners», sie produzierten Karbonat, die Metazoen ohne Kalkskelette dagegen gaben an GAIA zurück, was sie von ihr wegnahmen: sie nahmen CO<sub>2</sub> zum Bau der Zellen, bei der Verwesung wurde wieder CO<sub>2</sub> frei. Da in den letzten 3.8 Ga das δ<sup>13</sup>C in den Karbonaten relativ konstant war, muss auch die gesamte Biomasse über diese Zeit etwa konstant geblieben sein. Diese These leuchtet ein, denn seit Beginn des Lebens spielt die oben erwähnte Carboxylierung des Enzyms RuBP, wozu Phosphor gebraucht wird. Also war Phosphor immer der limitierende Faktor für das Leben. Später, als die Eukarionten begannen, Nitrate zu verarbeiten, waren Phosphor und Stickstoff die begrenzenden Nährstoffe. Als die Eukarionten sich entwickelten und ebenfalls Nährstoffe brauchten, hatten die Prokaryonten eben weniger zur Verfügung.

Die Cyanobakterien nahmen mehr CO<sub>2</sub>, als sie zurückgaben. War die proterozoische Eiszeit eine Warnung an GAIA, die versuchte, Kohlenstoffreserven in Sedimenten anzulegen? Waren die Metazoen ein göttlicher Segen, um den Kohlenstoffhaushalt wieder in den Griff zu bekommen? Welches ist denn der Thermostat von GAIA? Wenn die Temperatur steigt, wird die Klimaanlage eingeschaltet, wenn es kalt wird, läuft die Heizung an! Der Thermostat ist die Temperaturbeständigkeit der verschiedenen Lebensformen.

Mittels Sauerstoffisotopen als Paläothermometer fanden Geochemiker, dass die Oberflächentemperatur der Erde vor 3.0 Ga etwa 70 °C und vor 1.3 Ga noch etwa 52 °C war. In diesem Klima konnten die Cyanobakterien den Grossteil des Kohlen-

# Partie rédactionnelle

stoffbudgets von GAIA für sich beanspruchen. Mit sinkenden Temperaturen konnten dann die besser organisierten Metazoen ihren Anteil vergrößern. Mit dem Niedergang der Stromatolithen wurde die Klimaanlage abgeschaltet, und die Edicariafauna entwickelte sich.

Das plötzliche Erscheinen von kalkigen Organismen zu Beginn des Kambriums kann nicht mit ausgeprägten Klimafaktoren korreliert werden. Die kambriische Explosion entstand mitten in einer Erwärmungsphase, die Stromatolithengemeinschaft war am Serbeln. Die Cyanobakterien besetzten die Küstengebiete und absorbierten den Karbonatzufluss zu den Ozeanen, indem sie direkt oder indirekt die Stromatolithen aufbauten. Der präkambriische Ozean war deshalb untersättigt mit Calcium. Mit dem Rückgang der Stromatolithen reichte sich das Meerwasser mit Calcium an und erlaubte die schnelle Entwicklung der kalkigen Organismen zu Beginn des Kambriums.

Während des Kambriums und Ordoviziums scheinen die kalkigen Organismen nicht derart verbreitet gewesen zu sein, wie die Cyanobakterien im Proterozoikum. In Faunengemeinschaften kambriischer Sedimente aus reduzierendem Milieu dominieren medusenartige Metazoen. Als Folge der Verwesung dieser Weichtiere gelangte viel organischer Kohlenstoff in die Sedimente, und die sulfatreduzierenden Bakterien hatten Hochbetrieb. Während des warmen Klimas im Kambrium und Ordovizium bildeten sich überall pyritische Tonsteine.

## Karbonwälder und permische Eiszeit

Der nächste Meilenstein in der Entwicklung war die Verbreitung der Landpflanzen. Ihre Produktion war derart rasch, dass ihr sumpfiger Lebensraum bald mit Sauerstoff übersättigt war. Viel des organischen Kohlenstoffs wurde in dicken Kohleflözen begraben, GAIA war nie so verschwenderisch wie damals, und der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre sank. Eis bedeckte grosse Teile von Gondwanaland zu Beginn des Perm, GAIA fror und musste erneut ein Treibhaus aufbauen. Die Hauptschuldigen am Desaster waren die ersten Opfer: Die riesigen, üppigen, aber wenig anpassungsfähigen Gattungen verschwanden. Andere thermophile Formen litten ebenso. Die Katastrophe war beinahe vollständig, 95% der permischen Gattungen erlebten den Übergang zur Trias nicht.

## Von der Wüste der Trias zum Ozean der Kreide

Pangäa war ein einziger Riesenkontinent am Anfang der Trias mit einer grossen Wü-

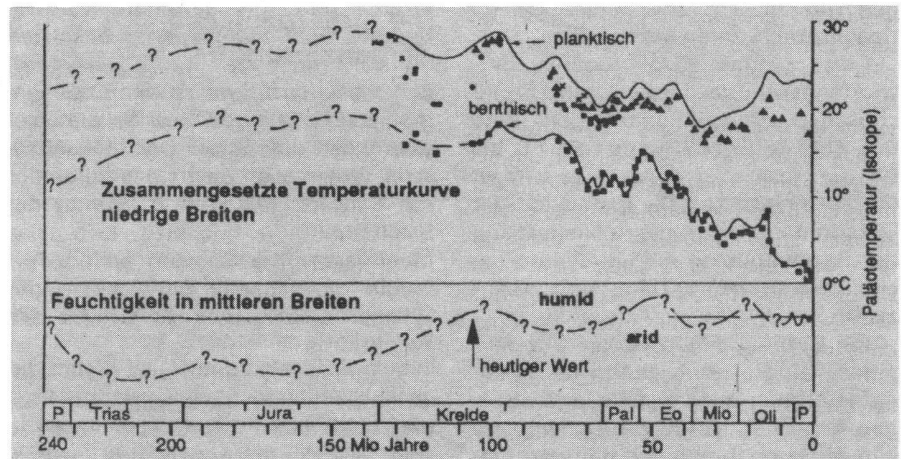


Abb. 2: Mesozoische und känozoische Klimageschichte (Frakes 1986).

ste im Innern, wo nur wenig Bäume wuchsen. Die Kohlenstoffbindung durch Pflanzen war minimal, und die intensive terrestrische Erosion brachte viel fossilen Kohlenstoff in Umlauf. Das Klima wurde wärmer, während Trias und Jura und zu Beginn der Kreide herrschte ein Treibhausklima (Abb. 2). In der mittleren Kreide kam die Wende. Weshalb?

Die wichtigsten Fortschritte in der Entwicklung des Lebens im Mesozoikum waren die Blütenpflanzen auf dem Lande und das kalkige Plankton (kleine treibende Meerestiere und Pflanzen) im Ozean. Die Fällung von  $\text{CaCO}_3$  aus dem Meerwasser entfernte wirksam  $\text{CO}_2$  aus dem Kreislauf. Die Verbreitung der Angiospermen dürfte indirekt mitgespielt haben: Die Entwicklung der Pflanzen mit jährlichem Laubwurf verstärkte die Verwitterung der Gesteine auf dem Land und erhöhte dadurch das Calciumangebot des Meerwassers und damit die Produktion von kalkigem Plankton.

## Kreide/Tertiär-Katastrophe und Restauration im Paleozän

Am Ende der Kreidezeit kam die stete Abkühlung seit der mittleren Kreide plötzlich zum Stillstand. Das Paleozän begann mit einem Temperaturanstieg, um ab dem mittleren Eozän dann wieder schrittweise abzunehmen. Wie das?

Eine Umweltkatastrophe sondergleichen markiert die Wende Kreide-Tertiär (Aussterben der Dinosaurier, Ammoniten etc.). Die Sauerstoffisotopenkurve zeigt ein Abweichen vom systematischen Trend während der ersten Million Jahre im Tertiär. Nachher, als die Kontinuität wiederhergestellt war, sollte der Abwärtstrend der Temperatur der späten Kreide wieder einsetzen. Doch nun beginnt die paleozäne Restauration (Abb. 2)! Die Umkehr dieses Trends wird mit einer Umverteilung des

Kohlenstoff-Kuchens in Verbindung gebracht. Das kalkige Plankton erholte sich nur langsam von der Katastrophe, die Calcitkompensationstiefe (CCD) war im Eozän relativ hoch, da die Karbonatproduktion im offenen Meer reduziert war. Demgegenüber war in dieser Zeit das kieselige Plankton sehr aktiv, wie die verbreiteten eozänen Radiolarienschlammbelegen. Somit war die Entnahme von  $\text{CaCO}_3$  aus dem Meerwasser im frühen Tertiär reduziert.

Im Oligozän setzte erneut eine starke Produktion von kalkigem Plankton ein mit einem positiven Rückkopplungseffekt als Folge. Der Verbrauch von viel  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre leitete eine Abkühlung ein, gefolgt von intensiver Ozanzirkulation. Gute Zirkulation verteilt die Nährstoffe günstig und bewirkt eine weitere Produktionszunahme. Organischer Kohlenstoff wird in anoxischen Sedimenten gebunden und anorganischer Kohlenstoff im Meerwasser angereichert.

## Eiszeit und Milankovitch Zyklen

Die CCD tauchte zu Beginn des Oligozäns wieder markant ab. Dies bedeutet vermehrte Produktion von kalkigem Plankton, vermehrte  $\text{CaCO}_3$ -Entnahme, weniger Treibhaus- $\text{CO}_2$ , tiefere Temperatur. Das Meer hat sich endlich gänzlich erholt von der Kreide/Tertiär-Katastrophe. Eine antarktische Eiszeit begann Ende Eozän oder Anfang Oligozän. Im mittleren Miozän dehnte sie sich noch weiter aus. Die letzte Eiszeit der Nordhalbkugel setzte vor etwa 2.5 Millionen Jahren ein. Es gab kältere und wärmere Perioden, Glaziale und Interglaziale, Zeiten mit mehr und solche mit weniger  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre. In Bohrkernen von Gletschereis kann der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre mit dem Klima der Eiszeit gut korreliert werden. Da-

bei stimmen klimatische Zyklen mit astronomischen Periodizitäten von 40 000 und 100 000 Jahren, den sogenannten Milankovitch Zyklen, überein. Diese Zyklen waren kaum allein schuld an der Eiszeit, nur 3–4 °C dürfte auf ihr Konto gehen, doch verstärkten sie durch Herabsetzung des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre den Milankovitch Mechanismus: Kalte Ozeane begünstigen die CO<sub>2</sub>-Abfuhr durch stärkere Zirkulation, die mehr Nährstoffe in tropische Gewässer bringt, die Produktion von kalkigem Plankton forciert und damit CaCO<sub>3</sub> bindet.

## Was tun wir GAIA an?

Die Ausgewogenheit des Kohlenstoffhaushaltes wird durch den Homo sapiens mächtig gestört. Selbst wenn die Hälfte unserer CO<sub>2</sub>-Produktion durch den Ozean absorbiert würde, verdoppelte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre in den nächsten 100 Jahren – bei gleichbleibendem Ausstoss. Die daraus folgenden Langzeitwirkungen wie allgemeine Erwärmung, Verschiebung der Klimagürtel mit grossflächiger Verwüstung, Meeresspiegelanstieg mit Überschwemmungen etc., liegen auf der Hand.

Ist das gut oder schlecht?

Vielleicht wurde die Spezies Mensch geschaffen, um GAIA eine Unterkühlung zu ersparen. Vielleicht trieb die Erde gegen marsische Verhältnisse zu, und der

Mensch tritt in Erscheinung, um fossilen Kohlenstoff in den Kreislauf zu bringen, um die Heizung von GAIA anzustellen. Natürlich könnte das auch übertrieben werden. Die proterozoischen Bakterien schaufelten ihr Grab, als sie allzu effizient den Kohlenstoff zu binden begannen. Wenn wir zu gute Heizer werden, so könnte die Erde für den Homo sapiens unbewohnbar werden. Treiben wir die Temperatur auf 70 °C, würde GAIA zum Proterozoikum mit seinen Cyanobakterien zurückkehren – und der Kreislauf wäre geschlossen.

So weit werden wir es wohl nicht kommen lassen. Eine wichtige Deponie für organischen Kohlenstoff sind die marinen Sedimente. Das Sauerstoffmanko der Ostsee ist bereits derart fortgeschritten, dass an die 10% des gesamten anthropogenen CO<sub>2</sub> im toten Plankton jener schwarzen Sedimente gebunden ist. Dies kann aber nicht die Lösung unseres Treibhausproblems sein. Es war eine Lösung für GAIA in der Kreidezeit, als grosse Teile des Kreidemeeres anoxisch wurden und in schwarzen Schiefen die grössten Kohlenwasserstoffreserven beidseits des Atlantiks gebildet wurden. Ein weltweit anoxischer Ozean, wie es heute das Schwarze Meer ist, würde der Homo sapiens kaum überleben. Der selbstregulierende Mechanismus sollte nicht überschätzt werden. Wenn wir den Kohlenstoffhaushalt allzu sehr strapazieren, könnte das nur noch

mühsam funktionierende Gleichgewicht irreparabel kippen. Wir haben uns bei GAIA genug bedient, und es wird höchste Zeit, dass wir diese einseitige Ausbeutung überdenken und den «Handel» mit GAIA auf eine andere Basis stellen.

Das ETH-Bulletin, Januar 1991, ist im Zusammenhang mit der öffentlichen Informationstagung des Departements Erdwissenschaften der ETH Zürich vom 26. Januar 1991 dem Thema «Erdwissenschaften heute» gewidmet. Es enthält 26 Beiträge zu allgemeinen Grundlagen, ausgewählten Forschungsgebieten, Beispielen aus der Praxis sowie zur Ausbildung. Das Heft kann bezogen werden bei:

ETH-Bulletin, Versandzentrale  
ETH Zentrum, CH-8092 Zürich  
Telefon 01 / 256 20 76

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr. Kenneth J. Hsü  
Professor für Geologie  
ETH Zentrum, CH-8092 Zürich  
(Übersetzung: Ueli Briegel)

## Veranstaltungen Manifestations

### Interpraevent 1992

29. Juni bis 3. Juli 1992 in Bern

Internationaler und interdisziplinärer Erfahrungsaustausch über praktische Probleme des Schutzes des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen ist das zentrale Anliegen von Interpraevent. Dass dieses Bedürfnis besteht, zeigten die unter internationaler Beteiligung abgehaltenen Symposien Interpraevent 1967 in Klagenfurt, 1971 in Villach, 1975 in Innsbruck, 1980 in Bad Ischl, 1984 in Villach und 1988 in Graz.

Die Schweiz wurde 1987 von schweren Unwettern heimgesucht. Fachleute verschiedener Disziplinen sind dabei, die Ursachen dieser und ähnlicher Naturereignisse abzuklären, die Schäden zu analysieren und Schutzmassnahmen zu verwirklichen. Die Erfahrun-

gen, die aus der Bewältigung dieser Katastrophe gesammelt wurden, bilden den Anlass, Interpraevent zum ersten Male ausserhalb Österreichs abzuhalten.

In der Interpraevent 1992 sollen sowohl die Analysen der Ursachen und der ablaufenden Prozesse als auch die Möglichkeiten des Handelns – sei es baulich, planerisch oder gesetzgeberisch – in einem interdisziplinären Rahmen diskutiert werden, wobei folgende Schwerpunkte festgelegt wurden:

- Ursachen und Prozesse
- Auswirkungen auf den Lebensraum
- Schutzkonzepte und ihre Realisierung

#### Anmeldung von Beiträgen

Teilnehmer, die einen schriftlichen Beitrag präsentieren wollen, senden dem Organisationskomitee bis zum 31. Mai 1991 eine Kurzfassung von maximal 60 Zeilen.

#### Auskünfte

Interpraevent 1992  
c/o Bundesamt für Wasserwirtschaft  
Postfach, CH-3001 Bern

### Geotechnica

Internationaler Fachkongress  
18. bis 21. September 1991 in Köln

Mit dem von der Alfred-Wegener-Stiftung in Zusammenarbeit mit der KölnMesse durchgeführten Kongress wird erstmals im Rahmen der «geotechnica – Internationale Fachmesse und Kongress für Geowissenschaften und Geotechnik» sämtlichen geowissenschaftlichen Disziplinen und der Geotechnik sowie allen verwandten Wissenschaftsbereichen die Möglichkeit zum interdisziplinären Austausch geboten. Erstmals in Europa stellen internationale Experten und Fachleute aus Forschung und Praxis Forschungsergebnisse und Lösungsansätze zur Bewältigung der Probleme unserer Zeit disziplinübergreifend zur Diskussion. Der Kongress, der sich unter dem Generalthema: «Bewahrung der Erde – Herausforderung an Wissenschaft und Technik» als interdisziplinäres Forum im Dienste der Welt versteht, wird sich an den vier Kongresstagen mit vier grundlegenden Themenkreisen beschäftigen, die sich aus der hochgesteckten Zielsetzung folgerichtig ableiten.