

Kohlenstoff-Kreislauf und Klima : Betrachtungen aus geologischer Perspektive

Autor(en): **Weissert, Helmut**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **18 (2013)**

Heft 2

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-391147>

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.

Kohlenstoff-Kreislauf und Klima – Betrachtungen aus geologischer Perspektive Helmut Weissert¹

Vortrag gehalten an der 80. Jahresversammlung der SASEG am 22. Juni 2013 in Chamonix (F)

Zusammenfassung

Dieses Paper liefert eine Zusammenfassung der Forschung zum Kohlenstoff-Kreislauf und zur Entdeckung von atmosphärischem Kohlendioxid als Klimatreiber. Die Erforschung des Kohlenstoff-Kreislaufs kann bis ins späte 19. Jahrhundert zurückverfolgt werden, als S. Arrhenius erste Schätzungen der zu erwartenden Temperaturänderung bei einer Verdoppelung des atmosphärischen Kohlendioxids präsentierte. Den Argumenten von Arrhenius folgend mutmasste Thomas Chamberlin, dass das warme Kreide-Klima durch erhöhte atmosphärische Kohlendioxid-Konzentrationen verursacht war. Zur Zeit der beginnenden Erforschung des Kohlenstoff-Kreislaufs war es Eduard Suess, der die Bedeutung des Sphären-Konzepts in den geologischen Wissenschaften wiederentdeckte. Er prägte den Begriff «Biosphäre» für jenen Bereich der Erde, wo Leben und Umwelt in enger Wechselwirkung stehen. Kohlenstoff-Kreislauf und Biosphären-Forschung wurden in den sich entwickelnden Umweltwissenschaften Mitte des 20. Jahrhunderts kombiniert. Das Aufzeichnen des $p\text{CO}_2\text{atm}$ am Mauna Loa lieferte erste überzeugende Evidenz dafür, dass sich das Verbrennen fossiler Treibstoffe störend auf den globalen Kohlenstoff-Kreislauf, und damit auf die Biosphäre, auswirkt. Die Geschichte des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs und die Entwicklung der Biosphäre wurden neue Forschungsziele in den Erdwissenschaften. Mit Kohlenstoff-Isotopen-Geochemie entstand ein neues Werkzeug zur Rekonstruktion des Kreislaufs. Neue stratigrafische Instrumente liefern einen verbesserten Zeitrahmen zu Untersuchungen über grössere Störungen des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs in der geologischen Vergangenheit. Von grossem Interesse sind Untersuchungen zu Rückkoppelungsmechanismen der Biosphäre in Zeiten, als atmosphärische Kohlendioxid-Konzentrationen rasch änderten.

Abstract

This paper provides a short summary of Carbon Cycle research and of the discovery of atmospheric carbon dioxide as a climate-forcing factor. Carbon Cycle research can be traced back into the late 19th century when S. Arrhenius presented the first estimates on expected temperature change at doubled atmospheric carbon dioxide levels. Thomas Chamberlin, following the arguments of Arrhenius, suggested that warm Cretaceous climate was triggered by elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. At the time of beginning carbon cycle studies, Eduard Suess rediscovered the importance of the sphere concept in geological sciences. He coined the term «Biosphere» for earth's space where life and physical environment closely interact. C-cycle and biosphere research was combined in the evolving environmental sciences in the mid-20th century. Monitoring of $p\text{CO}_2\text{atm}$ on Mauna Loa provided first convincing evidence that accelerated burning of fossil fuels had a perturbing impact on the global carbon cycle and, therefore, on the biosphere. The investigation of the history of the global carbon cycle and the evolution of the biosphere became new research targets in earth sciences. With C-isotope geochemistry a new tool for tracing the carbon cycle was discovered. New stratigraphic tools provide an improved time frame for the investigation of major perturbations of the global carbon cycle in the geological past. Of major interest are investigations of response mechanisms of the biosphere, including physical, chemical and biological oceanography, at times when atmosphere's carbon dioxide levels rapidly changed.

¹ Geologisches Institut, ETH Zürich, CH-8092 Zürich

1 Einleitung: Die Erforschung des Kohlenstoff-Kreislaufs

«A great deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon climate». Mit diesem Satz begann der Chemiker Svante Arrhenius seine im Jahr 1896 publizierte Studie zum Einfluss von Kohlendioxid auf das Klima (Arrhenius 1896). In Anlehnung an John Tyndalls erste Untersuchungen zur Bedeutung von Kohlendioxid für das Klima errechnete Arrhenius, dass eine Verdoppelung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts zu einem globalen Temperaturanstieg von 4–6 Grad Celsius führen werde. Thomas Chamberlin, ein amerikanischer Geologe, stellte sich vor der Wende zum 20. Jahrhundert die Frage nach den Ursachen des Klimawandels in der Erdgeschichte und er formulierte im Jahr 1899 die Hypothese, dass hohe Kohlendioxid-Gehalte zum warmen Kreideklima geführt hätten. Chamberlin und Arrhenius erachteten in ihren Untersuchungen eine anthropogene Veränderung des Klimas durch Verbrennung fossiler Brennstoffe als möglich. Allerdings waren sie der Meinung, dass ein solches Szenario erst in sehr ferner Zukunft von Aktualität sein könnte (Chamberlin & Salesbury 1906). Mit Blick auf schon damals bekannte Schwankungen des erdgeschichtlichen Klimas vermutete Chamberlin, dass Veränderungen in der Kalksedimentation und damit gekoppelte Fluktuationen der Kohlendioxid-Konzentration im Meerwasser und in der Atmosphäre das warme Klima der Kreidezeit erklären könnten (Chamberlin 1898). Chamberlin konstruierte einen Kohlenstoff-Kreislauf, in welchem Kalkausfällung als Kohlendioxid-Quelle wirkte. In seiner Rekonstruktion des Kohlenstoff-Kreislaufs identifizierte er die Verwitterung von Silikaten als Kohlendioxid-Senke. Chamberlin hat in seiner Studie einen Kohlenstoff-Kreislauf skizziert, den wir Jahrzehnte später im Modell von Berner et al. (1984) wieder erkennen. Chamberlin konnte in seiner Analyse noch nicht wissen, dass Kalk im geolo-

gischen Kohlenstoff-Kreislauf ($> 100'000$ Jahre) von einer Kohlendioxid-Quelle zu einer Senke des bei der Verwitterung entstandenen und in Wasser gelösten Kohlendioxids wird. Kalkausfällung ist jedoch Kohlendioxid-Quelle im Sinne von Chamberlin, wenn wir uns auf den kurzzeitigen Kohlenstoff-Kreislauf ($< 100'000$ Jahre) fokussieren, in welchem die Vergrabung von Kalk nicht berücksichtigt ist. Chamberlin und Arrhenius gehören mit ihren Arbeiten zu den Begründern der Kohlendioxid-Forschung der modernen Klimageologie. Nur punktuell wurde die von Chamberlin und Arrhenius begonnene Diskussion um Folgen beschleunigter Verbrennung fossiler Brennstoffe im frühen 20. Jahrhundert weitergeführt. Am klarsten hat der Biologe A. J. Lotka in seinem Buch «Elements of a physical Biology» auf den möglichen Einfluss des Menschen auf das Klima hingewiesen: «Economically we are living from our capital, biologically we are changing radically the complexion of our share in the carbon cycle by throwing into the atmosphere, from coal fires and metallurgical furnaces, ten times as much carbon dioxide as in the natural biological process of breathing...». (c.f. Ausubel 1983).

Die Erkenntnisse der Geowissenschaften des frühen 20. Jahrhunderts nehme ich zum Ausgangspunkt meiner Darstellung der modernen Erforschung des geologischen Kohlenstoff-Kreislaufs und des Global-Klimas. Ich werde diskutieren, wie Erforschung von Kreisläufen und globales Sphären-Denken am Anfang der modernen Klimageologie stehen. Ich werde darstellen, wie neue Erkenntnisse in der Geochemie und der technologische Wandel in der Mitte des 20. Jahrhunderts den Geowissenschaftlern den Zugang zu einer Analyse der Geschichte des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs ermöglichten. Erkenntnisse aus der Klimageologie wiederum sind von grösster Bedeutung,

wenn in der heutigen Klimadebatte diskutiert wird, ob und wie sich menschliche Eingriffe auf das Globalklima auswirken werden.

2 Sphären und Kreisläufe

Der deutsche Philosoph Peter Sloterdijk beschreibt in seinem Werk «Sphären» (1998), wie die kopernikanische Wende in der Kosmologie dazu führte, dass die Menschheit aus der kosmologischen Mitte geworfen wurde und dass sie damit aus der «kosmischen Schosslage» gestossen wurde, welche ihr Welt-Sphären als Abgrenzung gegen ein unbekanntes Aussen geboten hatten. Sphären wurden von Geologen im 19. Jahrhundert wieder als zentrale Elemente einer Welt-Natur identifiziert. Speziell soll in diesem Zusammenhang Eduard Suess erwähnt werden. In Ergänzung zu Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre definierte er die Biosphäre als eine neue Sphäre, welche in enger Verbindung mit den anderen Sphären steht: «Die Pflanze, welche ihre Wurzeln Nahrung suchend in den Boden senkt und gleichzeitig sich atmend in die Luft erhebt, ist ein gutes Bild der Stellung organischen Lebens in der Region der Wechselwirkung der oberen Sphären und der Lithosphäre, und es lässt sich auf der Oberfläche des Festen eine selbstständige Biosphäre unterscheiden» (Suess 1875).

Dem von Suess geprägten Begriff «Biosphäre» begegnen wir wieder in den Arbeiten des russischen Geologen Vladimir Vernadsky. Dieser formulierte in seinem Buch «La Biosphere» (Vernadsky 1929), wie Leben und physikalische Umwelt eine räumliche Einheit bilden. Er wies in dieser Studie auf die schon von Suess erwähnte enge Wechselwirkung zwischen Leben und physikalischer Umwelt hin. Vernadsky beschrieb, wie Leben auf der Erde vom Klima beeinflusst wird und wie Leben wiederum das Klima beeinflusst. Die Ideen von Suess und Vernadsky wurden in der geologischen Forschung des frühen 20. Jahrhunderts kaum

zur Kenntnis genommen. In der Sowjetunion nahmen einzelne Ökologen Bezug auf das Werk von Vladimir Vernadsky. Der Mathematiker und Ökologe V. A. Kostitzin (1935) fokussierte seine Untersuchungen zu Atmosphäre und Klima auf die chemischen Kreisläufe, welche Leben und physikalische Umwelt verknüpfen (c.f. Ausubel 1983). Als Mathematiker präsentierte er einen ersten Versuch einer Quantifizierung wichtiger chemischer Kreisläufe, jenem des Kohlenstoffs, des Sauerstoffs und des Stickstoffs. Er gehörte zu einer ersten Gruppe von mathematisch orientierten Ökologen, deren Erkenntnisse erst Jahrzehnte später von einer neuen Generation von Ökologen und Geochemikern wieder entdeckt wurden.

Die Nachkriegsjahre seit 1945 werden als Jahre der beschleunigten Nutzung von fossilen Brennstoffen, von metallischen Rohstoffen, von Rohstoffen für die Landwirtschaft (z. B. Phosphor) in die Geschichte eingehen. Die beschleunigte Industrialisierung hat die Wissenschaft gezwungen, sich mit möglichen Folgen menschlichen Handelns für die Erde, die Umwelt zu befassen. Callendar formulierte 1949 die schon von Arrhenius und Chamberlin aufgeworfene Frage zum Einfluss des Menschen auf das Klima neu: «Can carbon dioxide influence climate?» hiess der Titel seiner Publikation zum Kohlenstoff-Kreislauf. Er formulierte die Hypothese, dass die Erwärmung des Klimas seit dem Ende der kleinen Eiszeit in der Mitte des 19. Jahrhunderts eine Folge eines durch Verbrennung fossiler Brennstoffe erhöhten Kohlendioxid-Gehaltes in der Atmosphäre sei. Wenige Jahre später gelang es Roger Revelle und Hans Suess im Internationalen Jahr der Geophysik (IGY 1957), die weitgehend in Vergessenheit geratene Kohlendioxid-Hypothese in einer neuen Untersuchung überzeugend zu rehabilitieren. Die im Jahr 1957 publizierte Arbeit der beiden Autoren hat den Titel «Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades» (Revelle & Suess

1957). Sie markiert einen Neustart in der Erforschung des Kohlenstoff-Kreislaufs und der Rolle des Menschen bei der Veränderung des Kohlendioxid-Gehaltes in der Atmosphäre. Charles David Keeling, ein «Post-Doctoral» Forscher im Team von Roger Revelle am Scripps Institute of Oceanography begann im Jahr 1958 in einem vom IGY unterstützten Projekt mit Messungen des atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalts. Die später als Keeling-Kurve bekannt gewordene Darstellung des kontinuierlichen Anstiegs der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre machte in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Folgen beschleunigter Verbrennung fossiler Brennstoffe für Wissenschaft und Gesellschaft sichtbar.

In den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckten die Ökologen das lange wenig beachtete Biosphären-Konzept neu. Eugene Odum, einer der Gründer der modernen Ökologie, wies auf die Bedeutung der biogeochemischen Kreisläufe hin, die als Gerüst der Biosphäre gezeichnet werden können (Odum & Barrett 1971). Die Biosphäre wiederum lässt sich in verschiedene Kompartimente oder Reservoirs unterteilen, welche über komplexe Regelkreise miteinander verknüpft sind. Die Ökologie entwickelte sich zu einer Systemwissenschaft, welche in den 60er Jahren auf die Bedeutung des Menschen als umweltveränderndem Faktor hinwies. Die Erde wurde mit einem begrenzt belastbaren Raumschiff verglichen und Resultate der

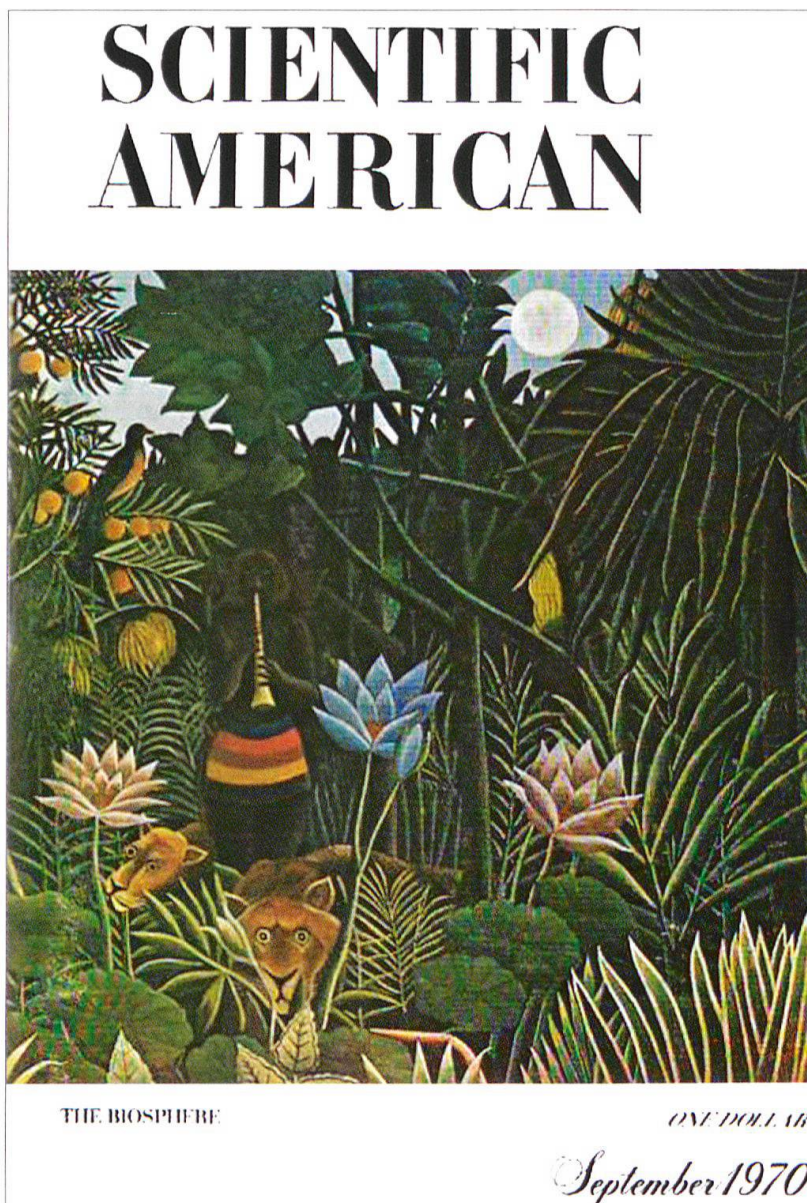


Fig. 1: Anfänge der modernen Biosphärenforschung: Scientific American mit «The Biosphere».

ökologischen Forschung lösten eine erste globale Umweltbewegung aus, welche in Kalifornien mit dem «Whole Earth Projekt» um 1968 ihre Anfänge hatte. 1970 publizierte das «Scientific American» eine Ausgabe mit dem Titel «The Biosphere» und im gleichen Jahr 1970 wurde der erste «Earth Day» zelebriert, wiederum war Kalifornien und speziell San Francisco der Kristallisationspunkt der schnell wachsenden Umweltbewegung. Die Studie zu «Limits of Growth» des Club of Rome (Meadows et al. 1972), vorgestellt am 3. St. Galler Symposium 1972, initiierte eine bis heute andauernde Diskussion über Wachstum, Ökologie und Ökonomie.

3 Geologie und Systemdenken

Robert Garrels, Fred McKenzie und Cynthia Hunt publizierten 1973 eine bahnbrechende Studie zu «Chemical cycles and the global environment: Assessing human influences», welche den geologischen Wissenschaften den Weg zu einer Systemwissenschaft aufzeigte. Noch blieb die Frage offen, wie die Geschichte der Biosphäre und ihrer chemischen Kreisläufe in den geologischen Archiven aufgezeichnet sein könnte. Nicht überraschend stand die Frage nach der geologischen Geschichte des Kohlenstoff-Kreislaufs bald im Zentrum der Erdsystem-Forschung in den 70er Jahren. Die jährlich publizierten CO₂-Werte am Mauna Loa liessen kaum mehr Zweifel gelten, der Mensch verändere mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe die Atmosphärenchemie. Kontrovers diskutiert wurde die Frage nach den klimatischen Konsequenzen. Broecker (1975) prognostizierte, dass die Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration im 21. Jahrhundert zu einer starken Erwärmung des Globalklimas führen würde. Er hat diese Hypothese in einer Zeit formuliert, als kühle Temperaturen, verursacht durch natürliche Klimafluktuationen, den zunehmenden Effekt der Treibhausgase maskierten. Manche Wissenschaftler äusseren in den 70er Jahren sogar die Befürch-

tung, dass eine neue Eiszeit anbrechen werde. Mercer (1978) simulierte erstmals die Veränderungen des antarktischen Eisschildes unter wärmeren Klimabedingungen. In seinen Modellen errechnete er einen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern bis ins frühe 21. Jahrhundert. Die Paläoklimafor-scher John Imbrie und Katherine Imbrie Palmer veröffentlichten 1979 ihre Synthese einer neuen Eiszeitgeschichte unter dem Titel «Ice Age-solving the mystery» (Imbrie & Palmer Imbrie 1979). In ihrem Buch evaluieren die Autoren mögliche klimasteuernde Faktoren. Imbrie & Palmer Imbrie dokumentieren, wie Veränderungen der Orbitalparameter in chemischen Signaturen mariner Sedimente aufgezeichnet sind und wie diese zu bestens dokumentierten zyklischen Veränderungen des Erdklimas im Eiszeitalter geführt hatten. Ob zusätzlich auch Veränderungen des atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalts zu den Kalt-Warmzyklen der letzten Jahr-millionsen beigetragen hatten, lassen die Autoren in ihrem Buch offen. Sie schreiben, dass es vermutlich kaum Möglichkeiten geben werde, die «CO₂-Hypothese» zu überprüfen, da es an geeigneten Methoden fehle, die Geschichte der Chemie der Atmosphäre zu rekonstruieren. Imbrie & Palmer Imbrie konnten damals nicht voraussehen, dass schon wenige Monate nach Erscheinen ihres Buches Daten zu Variationen des Kohlendioxid-Gehalts in Antarktis-Eis gemessen wurden (z.B. Delmas et al. 1980). Gasblasen, eingefroren im Eis, speichern die Zusammensetzung vergangener Atmosphären und sie dokumentieren, wie in Kaltzeiten der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre tiefer war als in Warmzeiten. Diese überraschenden Resultate nährten die Vermutung, dass Kohlendioxid als Klimasteuerungsfaktor im Eiszeitalter von Bedeutung war. Veränderungen in den Himmelsparametern lösten Kalt-Warm Zyklen im Eiszeitalter aus, diese Zyklen wurden durch Veränderungen in der Atmosphärenchemie verstärkt.

Die Messungen an Eiskernen geben heute Informationen zur Geschichte der Atmo-

sphäre über die letzten 800'000 Jahre. Für eine Rekonstruktion der Atmosphärenchemie über geologische Zeiträume müssen Paläoklimaforscher Atmosphären-Proxies identifizieren. In den späten 70er Jahren des 20. Jahrhunderts erkannten Geologen, dass die stabilen Isotope des Kohlenstoffs, gespeichert im marinen Kalk, zur Rekonstruktion der Geschichte des Kohlenstoff-Kreislaufs und damit indirekt des atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalts genutzt werden können.

4 C-Isotope, C-Kreislauf und Kohlendioxid

In den geologischen Wissenschaften stellte sich die Frage nach geologischen Beispielen möglichen zukünftigen Treibhausklimas auf der Erde. Man erinnerte sich an Chamberlins Hypothese, dass hohe Kohlendioxid-Gehalte Ursache des warmen Klimas der Kreidezeit waren. Chamberlin hat in seiner Arbeit «The Influence of Great Epochs of Limestone Formation upon the Constitution of the Atmosphere» (1898) eine erste Darstellung des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs präsentiert, in welcher er die Bedeutung der Verwitterung für die Kohlendioxid-Fixierung und der Kalkbildung für die Kohlendioxid-Freisetzung beschrieb. Ebenso hat er die Wichtigkeit des organischen Kohlenstoff-Kreislaufs für das atmosphärische Kohlendioxid-Budget erkannt. Chamberlin hat die Hypothese formuliert, dass in der Kreidezeit, als bei hohem Meeresspiegel verbreitet epikontinentale Meere entstanden, verbreitete Kalkablagerungen in den flachen Schelfmeeren zu einer Erhöhung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts geführt hätten, welche wiederum für das warme Klima der Kreidezeit verantwortlich gewesen seien. Erst weit im 20. Jahrhundert gelang es Geochemikern, den von Chamberlin skizzierten globalen Kohlenstoff-Kreislauf über geologische Zeiträume zu modellieren (z.B. Berner et al. 1983, Louis-Schmid et al. 2007).

Chamberlins Hypothese, dass verbreitete Kalkbildung zum Kreide-Treibhausklima geführt hätte, musste auf Grund der Modellrechnungen modifiziert werden. Dass der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in der Kreidezeit höher war als in anderen erdgeschichtlichen Epochen wurde aber dank ersten GCM basierten Klimamodellen bestätigt (Global Circulation Models; Barron 1983). Paläoozeanographen erkannten zudem, dass weit verbreitete Schwarzschiefer-Ablagerungen in den Kreideozeanen auf episodische massive Störungen des Kohlenstoff-Kreislaufs hinwiesen. Die an organischem Kohlenstoff angereicherten Ablagerungen entstanden in der mittleren Kreidezeit in Zeiträumen von tausenden bis hunderttausenden von Jahren, in welchen die marine Produktivität höher als üblich war (Weissert & Erba 2004). Bei beschleunigter Ablagerung von organischem Kohlenstoff in den Weltmeeren wird auch mehr Kohlendioxid von Atmosphäre und Ozean in die Sedimente verfrachtet. Schon Chamberlin erkannte organisches Material als bedeutende Senke für atmosphärisches Kohlendioxid. Die «organische Kohlenstoff-Pumpe» war in Zeiten verbreiteter «Black Shale»-Ablagerung aktiver als in anderen Zeiten. Ursachen der wiederholten Veränderungen der Ozeanographie in der Kreidezeit blieben noch unbekannt, erst mit der Etablierung neuer geochemischer Methoden gelang den Geologen der Nachweis, dass die «Oceanic Anoxic Events», wie sie von Schlanger & Jenkyns (1976) definiert wurden, in der Kreidezeit an Störungen des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs gekoppelt waren (Scholle & Arthur 1980).

Der Schlüssel für ein besseres Verständnis der Dynamik des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs lag in der Entdeckung, dass die Kohlenstoff-Isotopenzusammensetzung in marinem Kalk als Fingerabdruck des Kohlenstoff-Kreislaufs in der Erdgeschichte dienen konnte. Scholle & Arthur (1980) präsentierten erstmals eine detaillierte Kohlenstoff-Isotopenkurve der Kreidezeit. In dieser Kurve

erkennt man Fluktuationen der im marinen Karbonat gemessenen C-Isotopenzusammensetzung. Die Autoren erkannten, dass mariner Kalk ein wertvolles Archiv der ursprünglichen marinen Kohlenstoff-Zusammensetzung von Meerwasser ist. Veränderungen der Isotopensignatur des Kalks manifestieren sich als «positive Exkursionen» (Jahrhunderttausende) oder als «negative Ereignisse» (Jahrtausende bis Jahrzehntausende). Positive Exkursionen markieren erdgeschichtliche Episoden mit erhöhter Vergrabungsrate von organischem Material (Weissert 1979), negative Ereignisse hingegen können ozeanographisch nur entstehen, wenn in kurzer Zeit (10^3 – 10^5 Jahre) grosse Mengen isotopisch leichten Kohlenstoffs in das Meerwasser verfrachtet werden. Als wichtigste Quellen von leichtem Kohlenstoff gelten heute Methan aus destabilisierten Gashydraten oder vulkanisches Kohlendioxid, das aus sogenannten «Large Igneous Provinces» stammt. Manche dieser riesigen Vulkanprovinzen entstanden in der Zerfallsphase des Grosskontinents Pangea im Mesozoikum. Die pazifische Ontong-Java Provinz, welche die Grösse von Grönland erreicht, entstand in der Kreidezeit innerhalb weniger Millionen Jahre. Sie dürfte Auslöser des von Schlanger & Jenkyns als OAE1 identifizierten «Oceanic Anoxic Events» in der Aptzeit (123 Mio. Jahre) gewesen sein, dessen Anfang durch eine markante negative Kohlenstoff-Isotopenanomalie gekennzeichnet ist (Méhay et al. 2009). Die Geologen haben dank der Isotopengeochemie Zeiten von Störungen des Kohlenstoff-Kreislaufs identifizieren können. Noch mussten neue «Proxies» entdeckt werden, welche Information zum Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre lieferten. Neue Methoden zur Rekonstruktion des Paläo- pCO_2 -Gehalts wurden von Paläobotanikern und Geochemikern entwickelt. Die Analyse der Stomatadichte in fossilen Blättern (Woodward 1987), die Isotopenzusammensetzung von Kalk in Calicheböden (Cerling et al. 1989), oder die Variation in der Fraktionierung von C-Isotopen zwischen

Karbonat und Phytoplankton (Freeman & Hayes 1992) können heute als Proxies vergangener Atmosphärenzusammensetzung genutzt werden.

5 Treibhausklima – Zukunft in der Vergangenheit?

In den letzten 15 Jahren gelang es den Klimageologen, dank Kombination von Sedimentologie und Stratigraphie mit Kohlenstoff-Isotopengeochemie an marinem Kalk und mit neuen Proxies des Paläo- pCO_2 , die Geschichte des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs präziser zu entziffern. Neue stratigraphische Methoden, wie Chemostratigraphie, Astrochronologie und Magnetostratigraphie werden heute mit Biostratigraphie und Geochronologie kombiniert. Mit diesen Methoden erreichen die Geologen in ihren erdgeschichtlichen Analysen oft eine zeitliche Auflösung, die im Bereich von 10^3 – 10^5 Jahren liegt. Markante kurzzeitliche (10^3 – 10^5 Jahre) Kohlenstoff-Isotopenanomalien wurden an der Perm-Trias Grenze (z. B. Hermann et al. 2010), an der Trias-Jura Grenze (z. B. Crne et al. 2011) und an der Kreide-Paläogen Grenze (Schulte et al. 2013) identifiziert. Störungen des Kohlenstoff-Kreislaufs waren z. B. an der Trias-Jura Grenze begleitet von massiven Veränderungen des atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalts. Die Hinweise verdichten sich, dass grosse Aussterbens-Ereignisse an der Perm-Trias Grenze und an der Trias-Jura Grenze durch extreme Vulkanereignisse und damit verbundene Veränderung des Klimas ausgelöst wurden. Die Ursache des Massensterbens an der Kreide-Paläogen Grenze bleibt noch umstritten. Extreme vulkanische Aktivität (Deccan Traps) und der Einschlag eines Meteoriten werden beide als mögliche Auslöser des Massensterbens und der Störung des Kohlenstoff-Kreislaufs in Betracht gezogen. Eine negative Kohlenstoff-Isotopenanomalie markiert auch den Beginn des «Oceanic Anoxic Events 1» (Aptian, Kreidezeit, Mene-

gatti et al. 1998). Diese Störung des Kohlenstoff-Kreislaufs war nicht von einem Massensterben begleitet. Die beobachtete Erhöhung des Kohlendioxid-Gehalts (Mehay et al. 2009), welche den negativen «spike» in der Kohlenstoff-Signatur begleitet, löste eine Veränderung des Klimas und der physikalischen, biologischen und chemischen Ozeanographie aus (z. B. Keller et al. 2009). Eine

bis zu einer Million Jahre dauernde «positive Exkursion» in der Kohlenstoff-Isotopenkurve folgt stratigraphisch auf den negativen «spike». Diese positive Exkursion in der Kohlenstoff-Isotopie widerspiegelt erhöhte Vergrabungsraten von isotopisch leichtem organischem Kohlenstoff und damit auch von atmosphärischem Kohlendioxid. Oder, anders formuliert: in der Biosphäre wurden

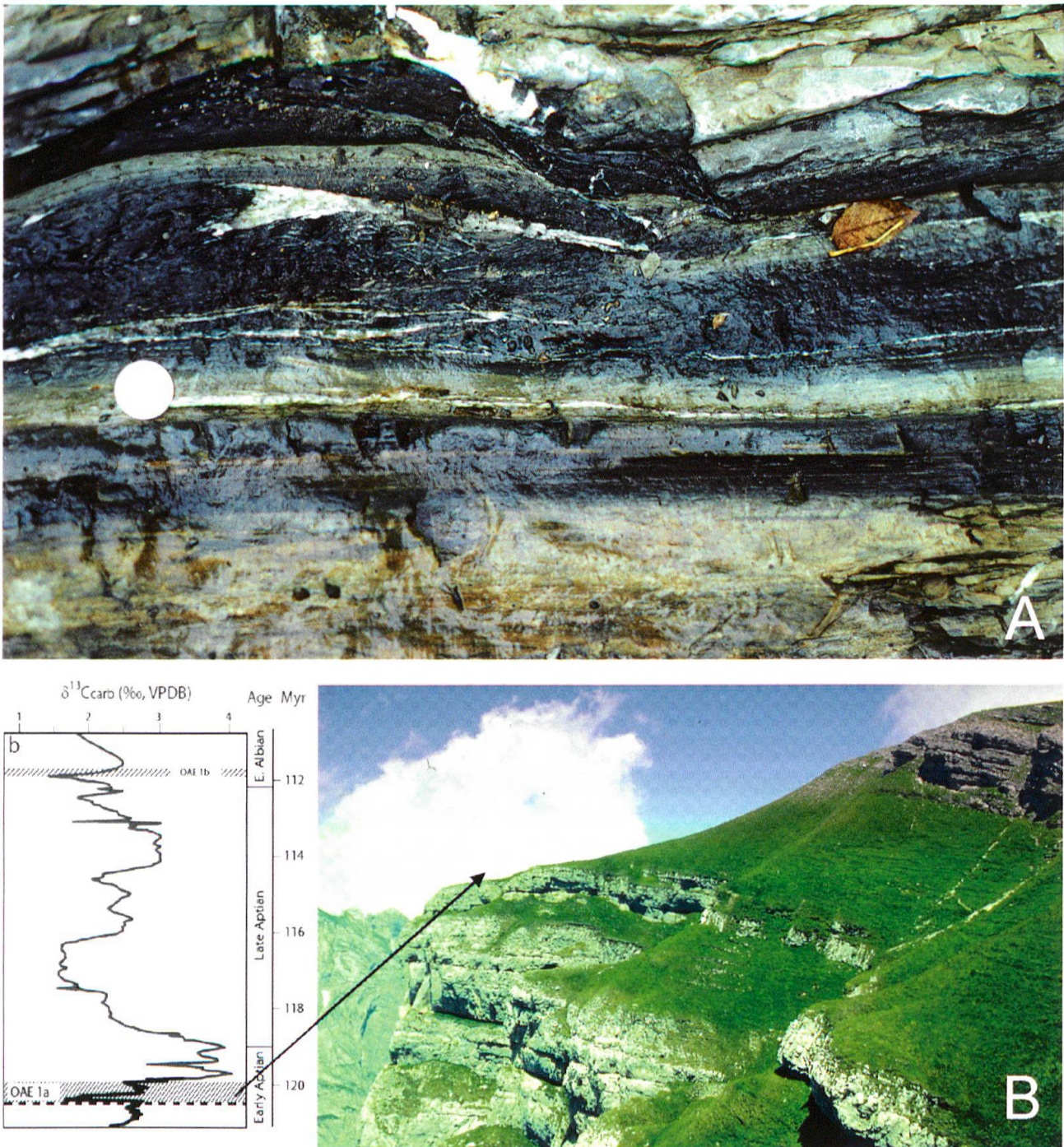


Fig. 2: Störung des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs in der Kreidezeit. [A] Veränderung der Ozeanographie mit weit verbreiteten Schwarzschieferablagerungen im tiefen Meer. [B] Kalkkrise im Helvetikum: Schrattekalk, überlagert von der Garschella Formation, Alpstein. Die Kalkkrise fällt mit der negativen Kohlenstoff-Isotopenanomalie OAE1a im Aptian zusammen (Figur z. T. modifiziert nach Mehay et al. 2009).

über Veränderung der Ozeanographie langfristig klimastabilisierende Prozesse ausgelöst. Veränderte ozeanische Strömungsbedingungen und erhöhte marine Produktivität waren verantwortlich für die weit verbreitete Ablagerung von «black shales» und damit für einen beschleunigten Entzug von überschüssigem Kohlendioxid aus der Atmosphäre (Fig. 2). Die Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre löste neben der Klimaänderung auch eine weit verbreitete Biokalzifizierungskrise aus (Fig. 2). Manche Autoren erklären diese Krise als Resultat einer «Versauerung» der Ozeane, welche über Jahrtausende bis Jahrzehntausende Organismen in ihrem Kalzifizierungsprozess beeinträchtigte (Erba et al. 2010).

Die Kohlenstoff-Kreislaufstörung in der Aptzeit dient den Klimageologen als wertvolles Dokument, wenn es um ein verbessertes Verständnis des Zusammenwirkens von Klima und Leben geht. W. Hay hat in seiner Studie zu Klimaanomalien in der Kreidezeit die provokative Frage gestellt: «are we returning back to the Cretaceous?» (Hay 2011).

Die Untersuchungen des Kohlenstoff-Kreislaufs in der geologischen Geschichte verbessern unser Verständnis des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs und sie schärfen unseren Blick in eine Zukunft, welche mit Folgen eines anthropogen veränderten Kohlenstoff-Kreislaufs konfrontiert sein wird. Nicht nur das Thema «CO₂ und Temperatur» steht im Zentrum der Problematik, sondern die viel breiter gefächerte Frage, wie die Biosphäre in ihrer Gesamtheit auf die heutige Veränderung der Atmosphärenchemie und damit des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs reagiert.

Literatur

- Arrhenius, S. 1896: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(251), 237–276.
- Ausubel, J. H. 1983: Annex 2: Historical Note. In: Changing Climate. Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee, edited by Commission on Physical Sciences National Research Council, Mathematics and Resources. Board on Atmospheric Science and Climate, 4881–4891. Washington, DC, National Academy of Sciences.
- Barron, E. J. 1983: A warm, equable Cretaceous: the nature of the problem: Earth-Science Reviews, v. 19, 305–338.
- Berner, R. A., Lasaga, A. C. & Garrels, R. M. 1983: The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. Am. J. Sci., 283(7), 641–683.
- Broecker, W. S. 1975: Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? Science, 89, 460–464.
- Callendar, G. S. 1949: Can carbon dioxide influence climate? Weather, 4, 310–314.
- Cerling, T. E., Quade, J., Wang, Y., Bowman, J. R., 1989: Carbon isotopes in soils and paleosoils as ecology and paleocology indicators. Nature, 341, 138–139.
- Chamberlin, T. C. 1898: The influence of great epochs of limestone formation upon the constitution of the atmosphere. The Journal of Geology, 6(6), 609–621.
- Chamberlin, T. C. & Salesbury, R. D. 1906: Geology, in three volumes. John Murray, London.
- Crne, A. E., Weissert, H., Gorican, P. & Bernasconi, S. M. 2011: A biocalcification crisis at the Triassic-Jurassic boundary recorded in the Budva Basin (Dinarides, Montenegro). Geological Society of America Bulletin, 123, 40–50.
- Delmas, R. J., Ascencio, J.-M. & Legrand, M. 1980: Polar ice evidence that atmospheric CO₂ 20,000 yr BP was 50 % of present. Nature, 284, 155–157.
- Erba, E., Bottini, C., Weissert, H. J. & Keller, C. E. 2010: Calcareous nannoplankton response to surface-water acidification around Oceanic Anoxic Event 1a. Science, 329(5990), 428–432.
- Freeman, K. H. & Hayes, J. M. 1992: Fractionation of carbon isotopes by phytoplankton and estimates of ancient CO₂ levels. Glob. Biogeochem. Cycles, 6(2), 185–198.
- Hay, W. W. 2011: Can humans force a return to a 'Cretaceous' climate? Sedimentary Geology, 235, 5–26.
- Hermann, E., Hochuli, P. A., Bucher, H., Vigran, J. O., Weissert, H. & Bernasconi, S. M. 2010: A close-up view of the Permian-Triassic boundary based on expanded organic carbon isotope records from Norway (Trøndelag and Finnmark Platform). Glob. Planet. Change, 74, 156–167.
- Imbrie, J. & Palmer Imbrie, K. 1979: Ice ages – Solving the mystery: Enslow, Short Hills, NJ, 224 pp.

- Keller, C. E. et al. 2009: A volcanically induced climate warming and floral change preceded the onset of OAE1a (Early Cretaceous). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 305(1), 43–49.
- Kostitzin, V. A. 1935 : Evolution de l'atmosphère: circulation organique: Epoques glaciaires.
- Louis-Schmid, B., Rais, P., Schaeffer, P., Bernasconi, S. M. & Weissert, H. 2007: Plate tectonic trigger of changes in pCO₂ and climate in the Oxfordian (Late Jurassic): Carbon isotope and modeling evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258(1), 44–60.
- Meadows, D. H., Randers, J. & Behrens, W. W. 1972: *The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome* (1972). Universe Books, New York.
- Méhay, S., Keller, C. E., Bernasconi, S. M., Weissert, H., Erba, E., Bottini, C. & Hochuli, P. A. 2009: A volcanic CO₂ pulse triggered the Cretaceous Oceanic Anoxic Event 1a and a biocalcification crisis. *Geology*, 37, 819–822.
- Menegatti, A. P., Weissert, H., Brown, R. S., Tyson, R. V., Farrimond, P., Strasser, A. & Caron, M. 1998: High-resolution delta C-13 stratigraphy through the early Aptian «Livello Selli» of the Alpine Tethys: Paleooceanography, 13, 530–545.
- Odum, E. P. & Barrett, G. W. 1971: *Fundamentals of ecology*. W. B. Saunders, Comp. Philadelphia – London – Toronto.
- Revelle, R. & Suess, H. E. 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus*, 18–27.
- Schlanger, S. O. & Jenkyns, H. C. 1976: Cretaceous anoxic events: causes and consequences: *Geol. Mijnb.*, 55, 179–184.
- Scholle, P. & Arthur, M. A. 1980: Carbon isotopic fluctuations in pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *Am. Ass. Petroleum Geologists*, 64, 67–87.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Barton, P. J., Bown, P. R., Bralower, T. J., Christeson, G. L., Claeys, P. & Cockell, C. S. 2010: The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327, 1214–1218.
- Suess, E. 1875: *Die Entstehung der Alpen*. W. Braumüller.
- Vernadsky, W. 1929: *La Biosphère*, F. Alcan, Paris.
- Weissert, H. J. 1979. *Die Paläoozeanographie der südwestlichen Tethys in der Unterkreide*. Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 6349.
- Weissert, H. J. & Erba, E. 2004: Volcanism and palaeoclimate: A Late Jurassic – Early Cretaceous carbon and oxygen isotope record. *Geological Society of London Journal*, 161, 695–702.
- Woodward, F. I. 1987: Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from pre-industrial levels. *Nature*, 327(6123), 617–618.