

## Änderungen im Kohlenstoffkreislauf der jüngsten Vergangenheit, Rekonstruktion mit corallinen Schwämmen

Florian Böhm

GEOMAR, Kiel

### Einleitung

Als "coralline Schwämme" werden Poriferen bezeichnet, die ähnlich Riff-Korallen ein Basalskelett aus Aragonit oder Hochmagnesium-Kalzit bauen und dieses als dünner Film lebenden Gewebes bewohnen (Reitner, 1992). Wie Riffkorallen leben coralline Schwämme in tropischen Flachmeeren. Allerdings wachsen sie wesentlich langsamer und bilden daher keine optisch erkennbaren Jahresringe aus. Ein großer Vorteil ist dagegen die Art der Skelettbildung, die größtenteils außerhalb des lebenden Gewebes stattfindet. Dadurch bildet sich das  $\text{CaCO}_3$  des Skelettes in isotopischem Gleichgewicht mit dem im umgebenden Meerwasser gelösten  $\text{CO}_2$  (Druffel & Benavides, 1986, Böhm et al., 1996). Das  $\text{CO}_2$  des Oberflächenwassers der Ozeane ist chemisch und isotopisch mit atmosphärischem  $\text{CO}_2$  equilibriert. Allerdings wird der isotopische Equilibrierungsprozess, welcher sehr langsam abläuft, durch ständigen Austausch mit Ozeantiefwasser gedämpft (Broecker & Maier-Reimer, 1992).

### Material und Methoden

Die von uns untersuchten Schwämme (Fig. 1) lebten in der Karibik, wo sie in den Jahren 1995 und 1996 von Helmut Lehnert (Univ. Göttingen) und Christian Dullo (Geomar, Kiel) aufgesammelt wurden. Zwei große Exemplare stammen aus einer Höhle des äußeren Riffes von Montego Bay (Jamaika), aus 20 m Wassertiefe. Ein kleineres Exemplar wurde mit Hilfe des Tauchbootes "Jago" aus 125 m Tiefe vom Hang der Pedro Bank geborgen. Letz-

tere Probe entstammt dem Top der Thermokline, die in der Karibik bei etwa 100 m Wassertiefe beginnt.

Datierungen mit der Uran-Thorium-Methode durch Anton Eisenhauer (Univ. Göttingen) erbrachten Alter von ca. 600 Jahren für alle drei Exemplare (Fig. 1). Proben für Isotopenbestimmungen wurden mit einem 0,5 mm-Bohrer aus den sehr massiven Aragonitskeletten gewonnen. Bei Wachstumsraten zwischen 0,2 und 0,4 mm/Jahr (Fig. 1) erreichen wir somit eine zeitliche Auflösung von 2 - 4 Jahren pro Probe. Die Isotopenmessungen führte Michael Joachimski an der Universität Erlangen (Institut für Geologie) durch.

Zu quantitativen Betrachtungen des Kohlenstoffkreislaufes wurde eine modifizierte Version des einfachen 3-Box-Modells von Walker (1991) verwendet.

### Ergebnisse: Sauerstoffisotope

Die Sauerstoffisotopenwerte (Fig. 2) sowohl der Flachwasser- als auch der Tiefwasserproben zeigen nur sehr geringe Schwankungen während der vergangenen 600 Jahre. Sofern das überlieferte Signal vollständig als Temperatursignal betrachtet wird (d. h. keine Salinitätsänderungen), ergeben sich maximale Änderungen in den mehrjährigen Mittelwerten von  $<0,7^\circ\text{C}$  (Flachwasser) bzw.  $<0,5^\circ\text{C}$  (Tiefwasser). Ein undeutliches Maximum während dem 17. und 18. Jahrhundert stimmt zeitlich gut mit der "Kleinen Eiszeit" überein (Keigwin, 1996). Anschließend deutet sich ein langfristiger Erwärmungstrend an (Fig. 1). Dieser beginnt bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts

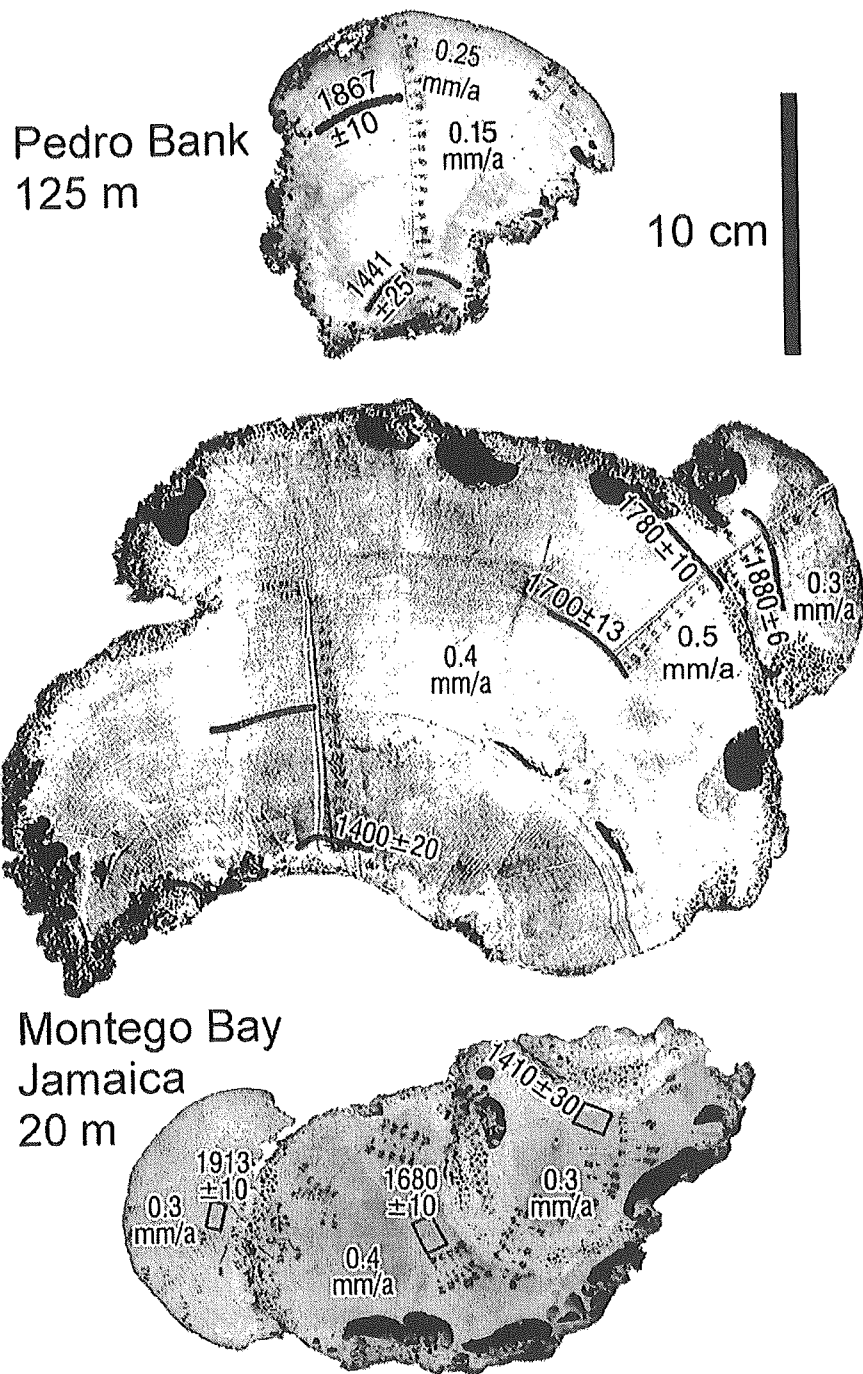


Fig. 1: Schnitte der untersuchten Schwämme (*Ceratoporella nicholsoni*). Angegeben sind die Lage und Ergebnisse der Altersdatierungen (in Kalenderjahren, A.D.), sowie die sich daraus ergebenden mittleren Wachstumsraten. Kleine Punkte sind die Bohrlöcher der Isotopenproben.

und muss daher einen natürlichen Trend (Ende der "Kleinen Eiszeit") darstellen. Leider sind die Amplituden dieser Änderungen sehr klein, kaum größer als die Messgenauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit unserer Messungen.

Die zweite Flachwasserprobe lässt keine derartigen Trends erkennen.

**Ergebnisse: Kohlenstoffisotope**  
Die Kohlenstoffisotopenkurven ( $\delta^{13}\text{C}$ ) der letzten 600 Jahre unserer Karibik-

Schwämme weisen zwei herausstechende Merkmale auf (Fig. 3):

1. Besonders deutlich bildet sich der anthropogene, durch Verbrennung fossiler Energieträger und Vernichtung von Waldbeständen verursachte Anstieg von  $\text{CO}_2$  ab. Die Zufuhr von an  $^{12}\text{C}$  angereichertem  $\text{CO}_2$  führte zu einer beständigen Abnahme des  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses seit Beginn der Industrialisierung in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts.
2. Weniger augenfällig sind natürliche Schwankungen im Zeitraum davor. In den beiden Flachwasserschwämmen ist eine Phase erhöhter  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Werte etwa im Zeitraum 1650 - 1750 zu erkennen. Vergleich-

che mit  $\text{CO}_2$  Konzentrationen aus Eiskerndaten der Antarktis (Etheridge et al., 1996) zeigen im gleichen Zeitraum erniedrigte  $\text{CO}_2$ -Gehalte der Atmosphäre. Das  $\delta^{13}\text{C}$  von  $\text{CO}_2$ -Einschlüssen in Eiskernen der Antarktis (Roger Francey, CSIRO, Victoria, persönliche Mitteilung, Januar 1998) zeigt wiederum erhöhte Werte zu dieser Zeit. Der Zeitraum entspricht dem Maximum der "Kleinen Eiszeit". Am besten lassen sich diese Beobachtungen mit erhöhter Bioproduktivität und nur geringer globaler Abkühlung der Ozeane (ca. 0,5 bis  $1^\circ\text{C}$ ) während der "Kleinen Eiszeit" erklären.

$\delta^{18}\text{O}$  (permill VPDB)

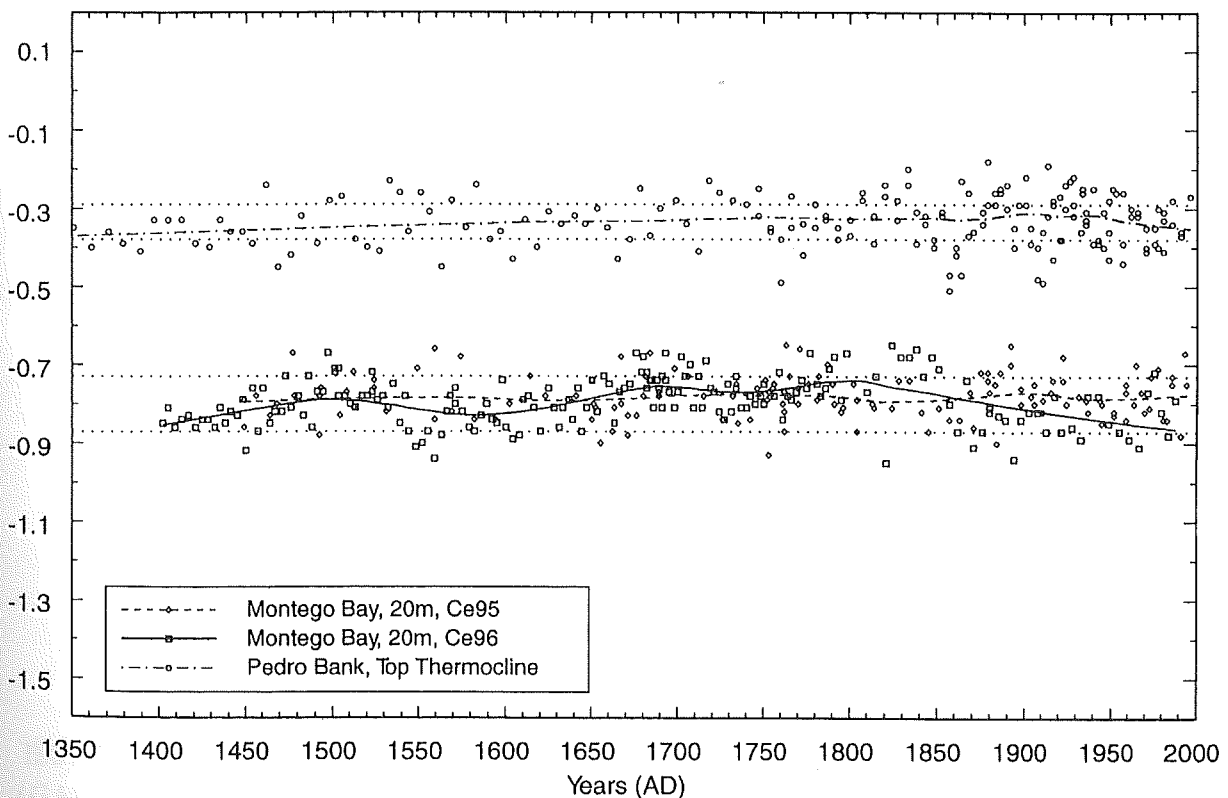


Fig. 2: Sauerstoffisotopentrends der untersuchten Schwammskelette. Linien sind LOWESS-Glättungen (locally weighted regression). Die Punktlinien dienen der besseren Orientierung. Der in Probe Ce96 sichtbare langfristige Trend zu erhöhten Werten im 17. und 18. Jahrhundert ("Kleine Eiszeit") tritt in der in nächster Umgebung gewachsenen Probe Ce95 nicht in Erscheinung. Die Thermoklinen-Probe zeigt eine langfristige Zunahme der Werte bis etwa 1900, was sich als Abkühlung oder Salinitätszunahme deuten lässt.

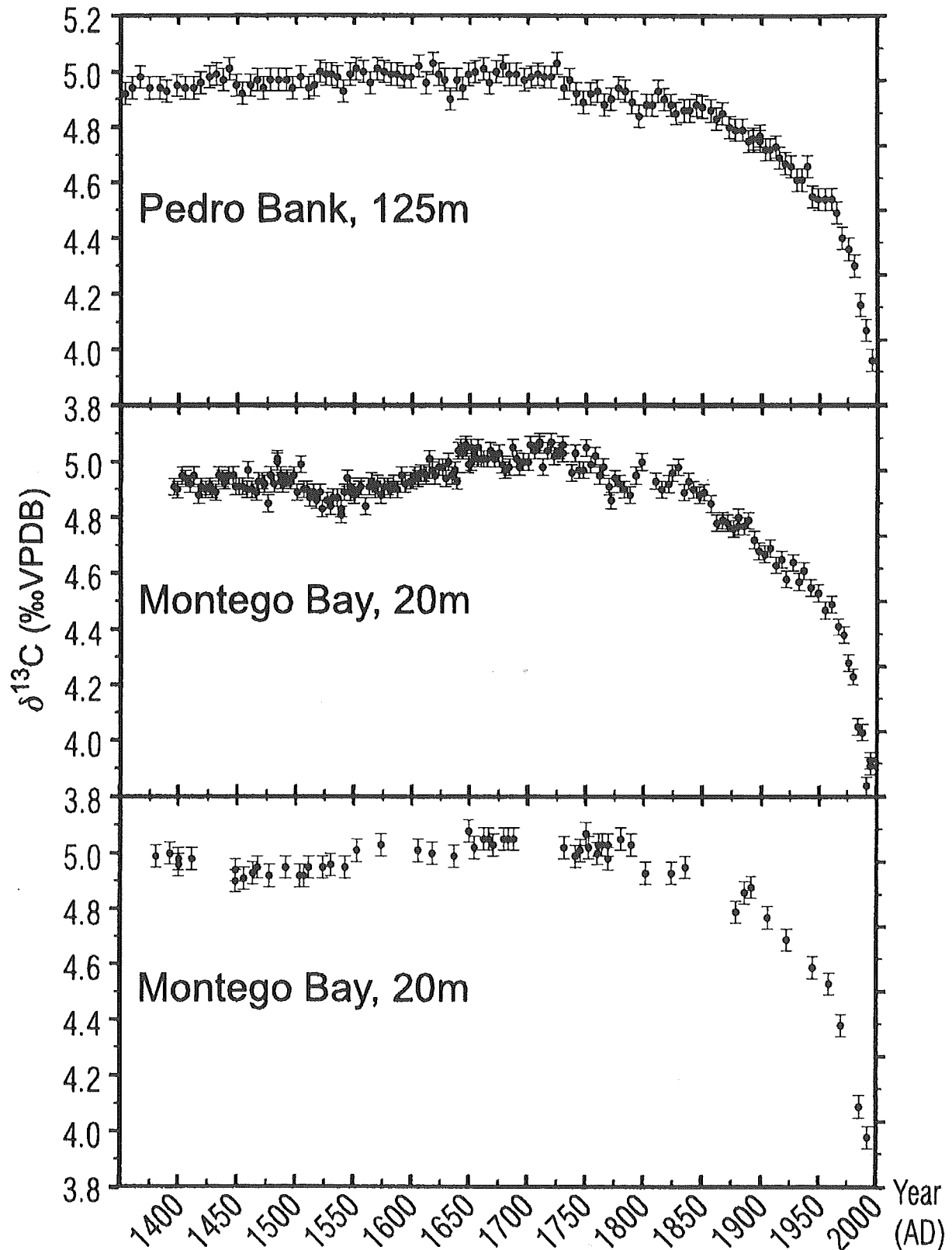


Fig. 3: Kohlenstoffisotopenwerte der untersuchten Schwammskelette. Man beachte die geringen Variationen in der präindustriellen Zeit und den steilen Abfall, vor allem seit 1950. Die Flachwasserproben zeigen leicht erhöhte Werte während dem 17. und 18. Jahrhundert. Fehlerbalken bezeichnen den 95 %-Vertrauensbereich der externen Messgenauigkeit.

Der Bereich erhöhter  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Werte lässt sich in der Schwammprobe vom Top der Thermokline nur erahnen. Dort, in ca. 125 m Wassertiefe, bewirkt der verstärkte Einfluss von Tiefenwasser eine Dämpfung des präindustriellen Signals unter das Niveau der Messgenauigkeit von ca. 0,1 ‰ (PDB). Die Variation des Isotopensignals von nur  $\pm 0,06$  ‰ (95 %-Vertrauensbereich) in diesem Zeitbereich zeigt die hervorragende Genauigkeit mit der das Kohlenstoffisotopensignal des Meerwassers im Schwammskelett gespeichert ist.

Interessanterweise erkennt man aber

auch in diesem Tiefwasserschwamm eine erste relative Zunahme von  $^{12}\text{C}$  bereits gegen Ende des 18. Jahrhunderts, also noch deutlich vor Beginn der Industrialisierung. Zur gleichen Zeit kam es in der Atmosphäre (Baumringdaten, Stuiver & Becker, 1993) zu einer extremen Abnahme von  $^{14}\text{C}$  auf den niedrigsten präindustriellen Stand seit Beginn der Kleinen Eiszeit (Fig. 4). Letzteres könnte auf klimatische Ursachen im Zusammenhang mit der Sonnenaktivität hinweisen. Die genaue Ursache dieser präindustriellen Änderung im Kohlenstoffkreislauf ist jedoch noch unbekannt.

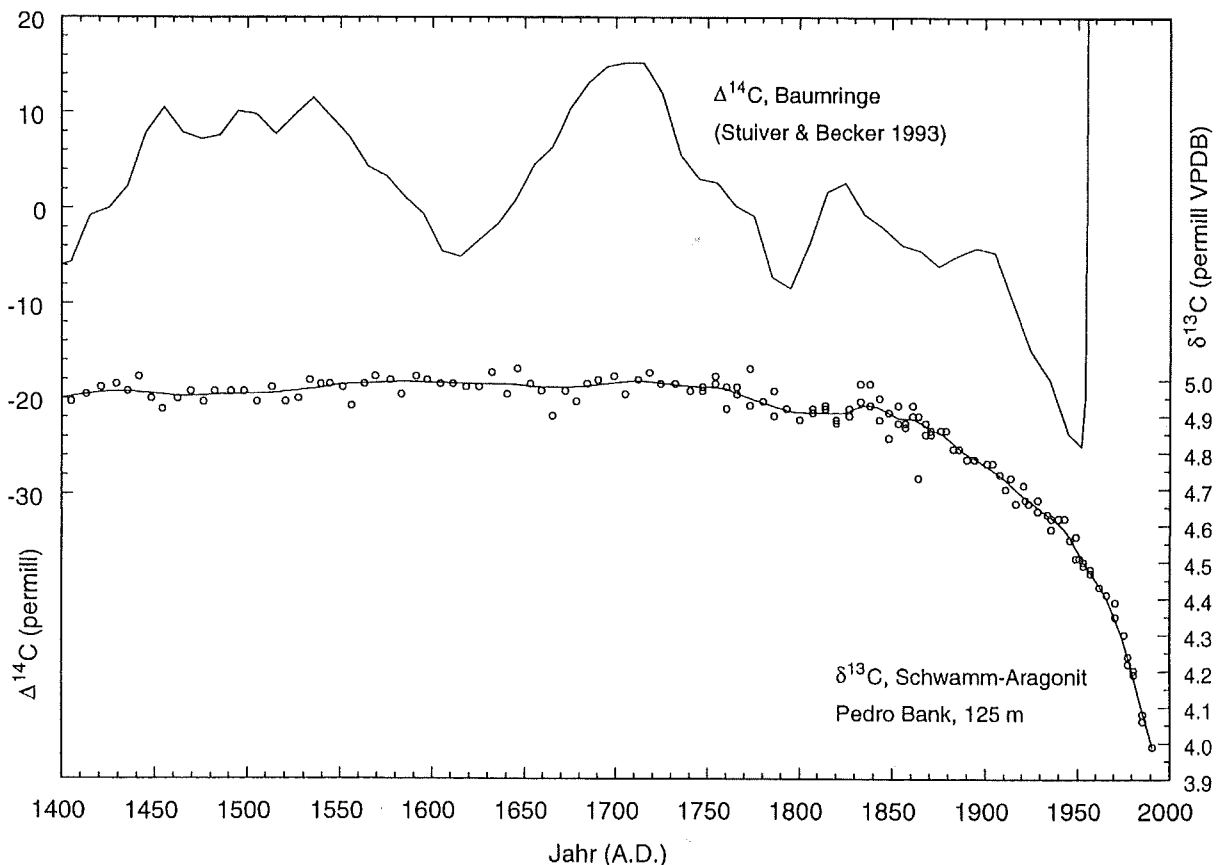


Fig. 4: Vergleich der Radiokarbonwerte von Baumringen und der stabilen Kohlenstoffisotope der Thermoklinen-Schwammprobe von Pedro Bank. Das  $\Delta^{14}\text{C}$ -Maximum um 1,700 fällt mit dem Maunder-Sonnenfleckenminimum zusammen. Der nachfolgende Abfall der Kurve ist auch in den stabilen Isotopen zu erkennen. Das  $\Delta^{14}\text{C}$ -Minimum im Jahre 1950 ist anthropogen (Suess-Effekt). Der nachfolgende, steile Anstieg wurde durch die Atombombentests verursacht. Nur die stabilen Isotope lassen den weiteren industriellen Abfall erkennen.

## Diskussion

Unsere Daten bestätigen, dass die natürlichen Klimaschwankungen der jüngsten historischen Vergangenheit (Mittelalter bis heute) zu messbaren Veränderungen im globalen Kohlenstoffkreislauf führten. Ein Vergleich zwischen Eiskerndaten ( $p\text{CO}_2$  und  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ) und unseren marinen Werten wurde hier nur mit einem sehr einfachen Kohlenstoffmodell durchgeführt. Die gewonnenen Daten können aber auch viel komplexeren Modellen als Rahmenbedingung dienen. Hierbei ließen sich vor allem die Fragen nach Änderungen der globalen Meeresoberflächentemperaturen und nach der Reaktion der Biosphäre genauer untersuchen. Beispielsweise ist noch ungeklärt, ob erhöhte Produktivität der Ozeane oder ein Anwachsen der terrestrischen Biomasse zu den beobachteten Änderungen in Atmosphären- und Ozean- $\text{CO}_2$  führte. Klimamodelle zeigen, dass die Abnahme des Atmosphären- $\text{CO}_2$  in der "Kleinen Eiszeit" nicht die Ursache, sondern die Folge der Klimaänderungen gewesen sein muss (Etheridge et al., 1996).

Die "Kleine Eiszeit" wird wegen ihrer zeitlichen Korrelation mit Sonnenflecken-Minima zumeist als Ausdruck verminderter Sonnenaktivität gedeutet (Crowley & Kim, 1996). Die Korrelation mit  $^{14}\text{C}$ -Daten weist in die gleiche Richtung (Stuiver & Quay, 1980, Druffel, 1982). Sonnenaktivität ist ein Faktor, der in den Klimamodellierungen eine umstrittene Rolle spielt (Kelly & Wigley, 1992). Ein Großteil der in den Schwammskeletten überlieferten Temperaturschwankungen (Fig. 2), sofern diese sich als signifikant herausstellen, steht im Zusammenhang mit der "Kleinen Eiszeit". Damit könnten sich Schwankungen der Sonnenaktivität als Hauptfaktor der Klimavariationen der letzten Jahrhunderte herausstellen (Crowley & Kim, 1996). Kelly & Wigley

(1992) konnten mit einer Rekonstruktion der Sonnenaktivitätsschwankungen der letzten 100 Jahre die in diesem Zeitraum beobachteten globalen Temperaturschwankungen ebenso gut erklären, wie durch den anthropogenen Treibhauseffekt. Allerdings mussten sie dabei teils unrealistisch hohe Verstärkungsfaktoren annehmen.

Die Sauerstoffisotope deuten teilweise darauf hin, dass bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts, also noch vor Beginn nennenswerter anthropogener Einflussnahme, ein Trend zur Erwärmung begann. Andererseits war die "Störung" des Kohlenstoffkreislaufes am Ende des 18. Jahrhunderts bereits vorüber. Die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts stellt ein Plateau der  $\delta^{13}\text{C}$ -Kurve dar (Fig. 3). Der folgende, sich immer mehr versteilende Abfall ist eindeutig anthropogen verursacht.

Der enorme anthropogene Einfluss auf den globalen Kohlenstoffkreislauf zeigt sich sehr augenfällig bei Betrachtung der tiefmarinen  $\delta^{13}\text{C}$ -Kurve, beim Vergleich zwischen dem präindustriellen Verlauf mit über Jahrhunderte nahezu konstanten Werten und dem extremen Abfall seit ca. 1850. Dies sagt natürlich nichts über die möglichen Klimafolgen des  $\text{CO}_2$ -Anstieges aus. Die hier erstellten Datenreihen können jedoch als Rahmenwerte für Modelle dienen, die sich mit dem Verbleib großer Teile des anthropogenen  $\text{CO}_2$  ("missing sink") und vor allem mit der Geschwindigkeit der Aufnahme in die Ozeane befassen (Heimann & Maier-Reimer 1996). Langfristig (in geologischen Zeiträumen) gesehen stellt die anthropogene Störung nur ein "kurzes Flackern" im globalen Kohlenstoffhaushalt dar. 70 - 80 % des industriellen  $\text{CO}_2$  werden innerhalb der nächsten Jahrhunderte im Ozean gelöst und damit der Atmosphäre entzogen werden (Archer et al. 1997). Die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch die Ozeane findet jetzt schon statt. Die

Modelle, die das berechnen, haben aber noch immer Fehlerspannen von  $\pm 40\%$  (Heimann & Maier-Reimer, 1996). Zu ihrer Weiterentwicklung, muss vor allem die Datenbasis verbessert werden. Die hier vorgestellten Daten können dazu beitragen.

### Literatur

- Archer, D., Kheshgi, H. & Maier-Reimer, E. (1997): Multiple timescales for neutralization of fossil fuel CO<sub>2</sub>. *Geophys. Res. Lett.* **24**, 405 – 408.
- Böhm, F., Joachimski, M. M., Lehnert, H., Morgenroth, G., Kretschmer, W., Vacelet, J. & Dullo, W.-C. (1996): Carbon isotope records from extant Caribbean and South Pacific sponges: Evolution of  $\delta^{13}\text{C}$  in surface water DIC. *Earth Planet. Sci Lett.* **139**, 291 – 303.
- Broecker, W. S., Maier-Reimer, E. (1992): The influence of air and sea exchange on the carbon isotope distribution in the sea. *Global Biogeochem. Cycles* **6**, 315 - 320.
- Crowley, T. J., Kim, K. Y. (1996): Comparison of proxy records of climate change and solar forcing. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 359 – 362.
- Druffel, E. M. (1982): Banded Corals: Changes in Oceanic Carbon - 14 During the Little Ice Age. *Science*, **218**, 13 – 19.
- Druffel, E. M. & Benavides, L. M. (1986): Input of excess CO<sub>2</sub> to the surface ocean based on  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in a banded Jamaican sclerosponge. *Nature* **321**, 58 – 61.
- Etheridge, D. M., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R. J., Barnola, J. M. & Morgan, V. I. (1996): Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journ. Geophys. Res., D*, **101**, 4.115 – 4.128.
- Heimann, M., Maier-Reimer, E. (1996): On the relations between the oceanic uptake of CO<sub>2</sub> and its carbon isotopes. *Global Biogeochem. Cycles* **10**, 89 – 110.
- Keigwin, L. D. (1996): The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargasso Sea. *Science* **274**, 1.504 – 1.508.
- Kelly, P. M. & Wigley, M. L. (1992): Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate. *Nature* **360**, 328 – 330.
- Reitner, J. (1992): "Coralline Spongien". Der Versuch einer phylogenetisch-taxonomischen Analyse. *Berliner Geowiss. Abh.*, Reihe E, 1, 352 S.
- Stuiver, M., Becker, B. (1993): High-precision decadal calibration of the radiocarbon timescale, AD 1,950 – 6,000 BC. *Radiocarbon* **35**, 35 - 65.
- Stuiver, M., Quay, P. D. (1980): Changes in Atmospheric 14-Carbon attributed to a variable sun. *Science* **207**, 11 – 19.
- Walker, J. C. G. (1991): Numerical Adventures with Geochemical Cycles. - 192 S., New York (Oxford University Press).