ETH zürich

ETH Library

Paleoceanographic Evolution of the Antarctic Southern Ocean since the Mid-Pleistocene Transition

Doctoral Thesis

Author(s):
Hasenfratz, Adam P.

Publication date:
2017

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000181636

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Funding acknowledgement:
- Polar Twins: Southern Ocean and Subarctic North Pacific Paleoceanography ()

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 24255

PALEOCEANOGRAPHIC EVOLUTION OF THE ANTARCTIC SOUTHERN OCEAN SINCE THE MID-PLEISTOCENE TRANSITION

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

ADAM PATRIK HASENFRATZ

M. Sc. of Climate Sciences, University of Bern

born on 26.11.1984

citizen of Wohlen (BE)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gerald H. Haug	ETH Zurich / MPI for Chemistry, Mainz	Examiner
Prof. Dr. Samuel L. Jaccard	University of Bern	Co-examiner
Dr. Alfredo Martínez-García	MPI for Chemistry, Mainz	Co-examiner
Prof. Dr. David A. Hodell	University of Cambridge	Co-examiner
Prof. Dr. Christopher D. Charles	University of California (SIO), San Diego	Co-examiner

2017

Summary

The Pleistocene epoch was characterized by orbitally-forced climate oscillations between warm stages and ice ages. The concentration of atmospheric CO_2 (pCO_2) has varied in step with these so-called glacial-interglacial cycles over at least the last 800 thousand years (kyr), with consistently 80–100 parts per million per volume (ppmv) lower pCO_2 during ice ages. The Southern Ocean, a large water body that entirely encircles the Antarctic continent, exerts a dominant control on the partitioning of CO_2 between the ocean interior and the atmosphere through its leverage on the efficiency of the biological pump. In the modern Southern Ocean, nutrient- and CO_2-rich deep waters ascend to the surface ocean where iron limitation restricts the fixation of the major nutrients by phytoplankton, allowing for the evasion of deeply sequestered carbon to the atmosphere. In the Antarctic Zone of the Southern Ocean, south of the Antarctic Polar Front, the evasion of CO_2 was reduced during ice ages by increased sea-ice cover and/or by a cooling-induced increase in stratification. In the northward Subantarctic Zone, a glacial increase in dust-derived iron was suggested to have stimulated marine export production, thereby contributing to enhanced deep ocean sequestration of carbon. While these two regions of the Southern Ocean provide a coherent two-part mechanism to explain the bulk of the glacial-interglacial pCO_2 variations, the specific combination of processes modulating atmospheric pCO_2 on longer time scales are not fully understood.

The main focus of this thesis is on the mid-Pleistocene transition (MPT; $\sim$1.2 to 0.7 million years ago (Ma)), when the climate cycles shifted from 41- to $\sim$100-kyr periodicities in the absence of any substantial changes in the orbital parameters that control the amount of incoming solar radiation. Many of the proposed hypotheses are related to internal feedbacks within the climate system, and involve global cooling and an associated decline in glacial atmospheric CO_2. Whereas evidence suggests that the ice ages prior to the transition were characterized by atmospheric CO_2 concentrations 30–40 ppmv higher than today, the mechanisms accounting for the CO_2 drawdown remain elusive. Using a variety of proxies from marine ODP Site 1094, situated in the Atlantic Sector of the Southern Ocean (53.2 °S, 5.1 °E, 2807 m), this thesis assessed if changes in the Antarctic Zone might have contributed to the presumed pCO_2 decline across the MPT, and investigated the coupling between deglacial mechanisms and oceanic CO_2 evasion during the past 1.5 Million years (Myr). The chronology of ODP 1094 is based on a newly acquired stratigraphy derived from oxygen isotope ($\delta^{18}O$) variations recorded by bottom-dwelling foraminifera.

One of the main goals of the thesis was to find evidence for potential changes in the stratification across the ice ages of the MPT by reconstructing the vertical density gradient of the Antarctic Ocean. The combination of paired Mg/Ca and $\delta^{18}O$ measurements on surface- and bottom-dwelling foraminifera allows estimation of the temperature and $\delta^{18}O$ of the surface and deep waters throughout the past 1.5 Myr, both of which exert primary control on the density gradient (seawater $\delta^{18}O$ is closely related to salinity). The temperature gradient was determined by Mg/Ca paleothermometry applied to planktonic *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral) and benthic *Melonis pompilioides*. The occurrence of manganese-rich coatings had a significant effect on their bulk Mg/Ca ratios, thereby biasing seawater temperature reconstructions. We have corrected for the Mg in the Mn coating by determining the coat-

ing Mg/Mn ratio that was assumed to be relatively stable throughout the past 1.5 Myr. Importantly, the samples covering the glacial maxima are largely unaffected by contamination from Mn-rich coatings, and have a negligible influence on the reconstructed vertical gradients. To convert the *M. pompilioides* Mg/Ca values to deep water temperature, we have compiled a novel core top data set based on new and published data that allowed the establishment of a Mg/Ca-temperature calibration of improved quality.

Focusing on the glacial maxima, we have reconstructed a contraction of the thermal gradient and a glacial expansion of the salinity gradient at around MIS 16 ($\sim$650 ka). This mode switch makes the glacial density gradient to be primarily dominated by salinity that tends to vertically stabilize the water column in the polar oceans. The intensification of Antarctic Ocean stratification occurred late in the MPT when the glacial pCO_2 level was already at its minimum. Instead, the presumed reduction in glacial pCO_2 across the MPT might have been primarily caused by a gradual increase in dust-borne iron deposition to the Subantarctic Ocean starting at $\sim$1.2 Ma, which was suggested to have increased the sequestration of carbon into the deep ocean. Concurrently, glacial sedimentary carbonate from ODP 1094 started to decrease, possibly indicating a long-term shoaling of the lysocline as a response to increased glacial carbon sequestration.

The reconstructed increase in glacial stratification coincided with an increase in ice volume and the emergence of the dominant high-amplitude $\sim$100 kyr glacial cycles. We speculate that the decrease in overturning at the end of the transition might have further enhanced the efficiency of carbon sequestration by focusing the accumulation of regenerated carbon in the abyss. The reduced evasion of CO_2 through the Antarctic surface ocean might have been crucial to drive increased build-up of ice on the northern hemisphere, which could have allowed the ice sheets to survive periods of obliquity-paced summer insolation maxima on a more regular basis than at the beginning and during the MPT. Hence, while the gradual increase in Subantarctic iron fertilization starting early in the MPT, and the weakening of the thermohaline circulation at $\sim$900 ka might have helped to cross a threshold that allowed the development of the 100-kyr climate signal, we propose that the intensified Antarctic Ocean stratification at the end of the transition was crucial in "locking in" the switch to a colder climate with more prolonged and severe ice ages.

While the Subantarctic mechanisms likely had a higher leverage on the carbon cycle during glacial maxima, we found confirming evidence that the deglacial mechanisms in the Antarctic Zone are crucial for controlling the interglacial pCO_2 level. This is best illustrated by the high correlation between deglacial export production (primarily related to open ocean overturning), deglacial deep ocean oxygenation (primarily related to coastal ventilation) and interglacial pCO_2 level. The robust coupling between the deglacial Antarctic mechanisms and the evasion of CO_2 from the deep ocean is supported by the changes observed during the lukewarm interglacials. During MIS 13 and 17, when peak pCO_2 concentrations were lowest within the past 800 kyr, deglacial Antarctic export production and deep ocean oxygenation were very low, indicating that Antarctic overturning and ventilation both ceased dramatically. The lower oxygen levels in the deep Southern Ocean coincide with reduced deglacial carbonate peaks, suggesting that proportionally less CO_2 has escaped from the deep ocean. Assuming a primary dependence of deglacial Antarctic overturning on the interglacial pCO_2 level, the deglacial export production peaks were used to predict the interglacial pCO_2 concentrations of the past 1.5 Myr.

The results of this thesis contribute to our understanding of the Southern Ocean's role in regulating atmospheric pCO_2 since the mid-Pleistocene transition. Using a variety of proxies, the 1.5 Myr-spanning records complement previously published data from the same core site, providing a holistic picture of the Pleistocene climate variability in the Antarctic Southern Ocean.

Zusammenfassung

Das Spätpleistozän war gekennzeichnet durch grosse Klimaschwankungen zwischen Warm- und Eiszeiten. Diese gingen einher mit erheblichen Variationen des atmosphärischen Kohlendioxids (CO_2), wobei die Eiszeiten durchweg 80 bis 100 ppm tiefere Konzentrationen aufwiesen. Der Südozean, welcher den antarktischen Kontinent vollumfänglich umgibt, hat über die Effizienz seiner biologischen Pumpe einen massgeblichen Einfluss auf den globalen Austausch von CO_2 zwischen dem Ozeaninneren und der Atmosphäre. Er stellt einen der wenigen Meeresregionen dar, in denen nährstoff- und CO_2-reiches Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt. Das ehemals in der Tiefsee gespeicherte CO_2 entweicht heutzutage in die Atmosphäre, da es dem Phytoplankton im oberflächennahen Wasser nicht möglich ist alle Nährstoffe zu verwerten, bevor das Wasser wieder absinkt (u.a. wegen dem fehlendem Mikronährstoff Eisen). Es wird vermutet, dass dieses CO_2-Leck im Südozean während den Eiszeiten deutlich kleiner war. In der antarktischen Region des Südozeans, südlich der Polarfront, kann dies auf eine grössere Meereisfläche und/oder einen verringerten Austausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser zurückgeführt werden. In der nördlich davon gelegenen subantarktischen Region des Südozeans wurde die CO_2-Konzentration (pCO_2) durch die sogenannte Eisendüngung verringert. Eine erhöhte Staubzufuhr an die Meeresoberfläche begünstigte die biologische Produktivität aufgrund des im Staub vorhandenen Eisens, was dazu beitrug Kohlenstoff in der Tiefsee zu lagern. Obwohl die beiden Regionen des Südozeans eine kohärente Erklärung für die pCO_2-Differenz zwischen Warm- und Eiszeiten liefern können, sind die Prozesse, die das atmosphärische pCO_2 auf etwas längeren Zeitskalen beeinflussen, noch nicht vollumfänglich bekannt.

Der Hauptfokus dieser Dissertation war die mittelpleistozäne Wende ($\sim$1.2 bis 0.7 Millionen Jahre vor heute (Ma)), als die Periodizität der Klimazyklen von 41'000 auf 100'000 Jahre wechselte. Dies geschah ohne erkennbare Veränderungen der orbitalen Parameter, die die Menge der Sonneneinstrahlung steuern. Viele der aufgestellten Hypothesen stehen im Zusammenhang mit internen Rückkoppelungseffekten im Klimasystem, und umfassen eine globale Abkühlung und einen damit verbundenen Rückgang der pCO_2-Konzentration in den Eiszeiten. Obwohl empirische Daten tatsächlich vermuten lassen, dass die eiszeitliche pCO_2-Konzentration vor der Wende um 30–40 ppm tiefer war als in den letzten Eiszeiten, sind die Prozesse, die zur Senkung des pCO_2 geführt haben, noch weitgehend unerforscht. Diese Dissertation untersuchte, ob Veränderungen im antarktischen Ozean zur mutmasslichen Reduktion der atmosphärischen pCO_2-Konzentration beigetragen haben könnten, und erforschte desweiteren die Kopplung zwischen den deglazialen Mechanismen und der Entweichung von CO_2 aus dem Ozeaninneren. Als geologisches Archiv wurde ein mariner Kern aus dem atlantischen Sektor des Südozeans herangezogen (ODP 1094; 53.2 °S, 5.1 °E, 2807 m), der als Grundlage für die Ermittlung von geochemischen Proxydaten diente. Das Altersmodell des Sedimentkerns basiert auf einer in dieser Dissertation präsentierten Sauerstoffisotopen ($\delta^{18}O$)-Stratigraphie, die an in der Tiefsee lebenden Foraminiferen ermittelt wurde.

Die Veränderung der vertikalen Schichtung des antarktischen Ozeans durch die Eiszeiten der letzten 1.5 Myr könnte einen massgeblichen Einfluss auf das atmosphärische pCO_2 gehabt haben. Diese Stratifizierung wurde durch die Rekonstruktion des vertikalen Dichtegradienten ermittelt. Die kombinierte

Messung von Mg/Ca und δ^{18}O an Kalkgehäusen von im Oberflächen- und Tiefenwasser lebenden Foraminiferen erlaubt die Ermittlung des Temperatur- und δ^{18}O-Gradienten der letzten 1.5 Myr, die beide einen dominanten Einfluss auf den Dichtegradienten haben (das δ^{18}O des Meerwassers ist eng verknüpft mit der Salinität). Der Temperaturgradient wurde mittels der Mg/Ca-Paläothermometrie-Methode ermittelt, welche auf der Beobachtung basiert, dass der Einbau von Magnesium in die Gehäuse der Foraminiferen überwiegend temperaturgesteuert erfolgt. Das Auftreten von magnesiumhaltigen, manganreichen Verkrustungen an den untersuchten Foraminiferen führte jedoch zu signifikanten Temperaturverzerrungen. Anhand der Ermittlung des Mg/Mn Verhältnisses in diesen Verkrustungen, welche relativ konstant war über die letzten 1.5 Myr, konnte diese Kontamination korrigiert werden. Die Proben, die die Eiszeiten abdecken, sind im Allgemeinen nicht in nennenswerter Weise verkrustet, und haben deshalb nur einen geringfügigen Einfluss auf die rekonstruierten Gradienten. Für die Umwandlung der Mg/Ca-Werte der im Tiefenwasser lebenden *Melonis pompilioides* in Temperaturwerte wurde eine neue Kalibration von hoher Qualität, die sich sowohl auf neue als auch auf bereits publizierte Daten stützt, erarbeitet.

Eine der Hauptresultate dieser Dissertation ist der Nachweis einer Kontraktion des Temperaturgradienten und einer Ausdehnung des Salinitätsgradienten um ca. 650 ka (MIS 16). Dies führte dazu, dass der vertikale Dichtegradient hauptsächlich von der Salinität dominiert wurde, welche die Wassersäule in den Polarmeeren stabilisiert. Jedoch geschah diese Intensivierung der antarktischen Stratifikation zu einem Zeitpunkt als die glaziale pCO$_2$-Konzentration das Minimum des Spätpleistozäns schon erreicht hatte. Stattdessen kann der Rückgang des eiszeitlichen pCO$_2$ über die mittelpleistozäne Wende hauptsächlich auf eine sukzessive Verstärkung der Eisendüngung im subantarktischen Meer zurückgeführt werden, die seit $\sim$1.2 Ma wesentlich dazu beigetragen hat, die Sequestration von Kohlenstoff in der Tiefsee zu erhöhen. Übereinstimmend lässt sich in den Sedimenten von ODP 1094 eine Verringerung der relativen Kalziumkarbonatmenge, die eventuell auf einen langfristigen Anstieg der Lysokline im Südozean hinweist, feststellen.

Die rekonstruierte Verstärkung der eiszeitlichen Stratifizierung am Ende der mittelpleistozänen Wende stimmt zeitlich überein mit der Zunahme des globalen Eisvolumens und der Entstehung des dominanten, hochamplituden $\sim$100'000-Jahreszyklus. Wir vermuten, dass der reduzierte Austausch zwischen der Meeresoberfläche und dem Ozeaninneren dazu beigetragen haben könnte, die Effizienz der Kohlenstoffspeicherung in der Tiefsee weiter zu erhöhen. Die verringerte Entweichung von CO$_2$ aus dem antarktischen Ozean könnte ausschlaggebend gewesen sein für den Aufbau von Eis auf der nördlichen Hemisphäre, und könnte den Inlandeisschilden erleichtert haben, Perioden von obliquitätsgesteuerten Sommerinsolationsmaxima zu überstehen. Es kann sein, dass das Heranwachsen des 100'000-Jahres-Klimasignals durch die Eisendüngung des subantarktischen Meeres, welche um $\sim$1.2 Ma begonnen hat sich zu intensivieren, und durch die Abschwächung der thermohalinen Zirkulation um $\sim$900 ka begünstigt wurde. Jedoch deuten unsere Daten darauf hin, dass die verstärkte Stratifizierung des Antarktischen Meeres entscheidend dazu beigetragen hat, die mittelpleistozäne Wende hin zu kühlerem Klima mit längeren Eiszeiten abzuschliessen.

In einem weiteren Teil der Dissertation haben wir Belege gefunden, die auf eine entscheidende Rolle der deglazialen Mechanismen des Antarktischen Ozeans in der Steuerung des interglazialen pCO$_2$-Niveaus hindeuten. Dies wird am besten veranschaulicht durch die starke Korrelation zwischen deglazialer Exportproduktion (hauptsächlich im Zusammenhang stehend mit dem Auftrieb in den oberen Ozeanschichten), deglazialer Sauerstoffkonzentration der Tiefsee (hauptsächlich im Zusammenhang stehend mit der Tiefenwasserbildung im Südozean nahe des antarktischen Kontinents) und interglazialem pCO$_2$-Niveau. Diese stabile Kopplung zwischen den deglazialen antarktischen Mechanismen und dem Entweichen von CO$_2$ aus der Tiefsee wird unterstützt durch Beobachtungen von Veränderungen, die sich in den "lauwarmen" Warmzeiten im Mittelpleistozän abgespielt haben.

Während MIS 13 und 17, als die interglazialen pCO_2-Konzentrationen am tiefsten waren über die letzten 800'000 Jahre, waren die deglaziale Exportproduktion und die Sauerstoffkonzentration der Tiefsee sehr niedrig, was darauf hindeutet, dass der Austausch zwischen der Meeresoberfläche und dem Ozeaninneren stark verringert war. Das geringe Sauerstoffniveau im tiefen Südozean stimmt mit verminderten Karbonatmengen im Sediment überein. Dies ist eventuell ein Hinweis darauf, dass während der deglazialen Phasen, unmittelbar vor den "lauwarmen" Warmzeiten, weniger CO_2 aus dem Ozean entwichen ist. Ausgehend von der Annahme, dass das interglaziale pCO_2-Niveau hauptsächlich vom Austausch zwischen antarktischem Oberflächen- und Tiefenwasser beeinflusst wird, wurden die deglazialen Exportproduktionsspitzen verwendet um die interglaziale pCO_2-Konzentration der letzten 1.5 Myr zu schätzen.

Die Resultate dieser Dissertation tragen dazu bei, das Verständnis der Rolle des Südozeans in der Regulierung der atmosphärischen pCO_2-Konzentration zu verbessern. Die 1.5 Myr-überspannenden Klimakurven unterschiedlichster Art ergänzen früher publizierte Daten vom selben Kern, und verschaffen ein umfassenderes Bild der pleistozänen Klimavariabilität im antarktischen Teil des Südozeans.