
Evolving ocean basins in the Early Cretaceous
greenhouse: A climate model-proxy synthesis of
circulation, surface temperatures and carbon burial

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Sebastian Steinig

Kiel, 2019

Erster Gutacher: Prof. Dr. Martin Frank

Zweite Gutachterin: Prof. Dr. Birgit Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 02.08.2019

Abstract

Greenhouse climates with global mean temperatures significantly higher than today prevailed during large parts of the geological history. They provide direct evidence for the adaptation of the climate system to enhanced greenhouse gas forcing during the past and represent the only possibility to constrain model-derived projections of future anthropogenic warming. The Early Cretaceous (~145-100.5 Ma) provides a special opportunity to test our understanding of past greenhouse dynamics, as the long-term warmth was punctuated by severe perturbations of the global carbon cycle and episodes of transient cooling. Young and restricted ocean basins, emerging from the break-up of Gondwana, are a possible driver of both short- and long-term carbon cycle dynamics due to their enhanced organic carbon burial potential.

This thesis aims to better constrain the main drivers of the Early Cretaceous greenhouse climate and to assess how they differed from the present-day dynamics. Dedicated climate model simulations of the Early Cretaceous were integrated with paleoceanographic records of water mass mixing, surface temperatures and organic carbon burial to assess both the causes for the mean state warming, as well as to reconstruct the tectonically driven ocean circulation and carbon cycle changes.

In a first step, the individual processes that controlled the simulated global mean warming and the meridional temperature gradient (MTG) response to the increased greenhouse gas forcing and changed paleogeography were quantified. The Early Aptian (~125 Ma) surface warming was driven by higher atmospheric greenhouse gas levels (70%) and surface albedo changes (30%). The lower elevation and surface albedo of ice-free Antarctica formed the largest contribution to the up to 38% reduction of the MTG. Cloud cover changes did not influence the global mean temperature change, but their latitudinal variations were the only feedback strengthening the MTG. A comparison with a model ensemble forced under the present-day geography confirms the stabilising cloud influence as a robust response across the two time periods.

In a second step, the model results were used to test the internal consistency of the Cretaceous upper-ocean temperature record. It is demonstrated that the restricted circulation of the evolving North and South Atlantic led to a systematic overestimation of local Early Cretaceous temperatures in the TEX₈₆ proxy. Applying an adjusted calibration significantly improves the model-data fit and the overall comparison with other temperature proxies for the Early Cretaceous. The combination of both studies implies that the MTG during the Early Aptian was significantly lower than today, but can be reproduced with the current generation of climate models.

A third study simulated the Aptian to Albian progressive opening of two marine gateways between the emerging South Atlantic and Southern Ocean to assess their influence on the water mass exchange between both basins and to derive possible implications for the organic carbon burial. A

large model ensemble demonstrates the enhanced influence of boundary condition uncertainties on the simulated regional circulation. The test against geochemical data allowed to constrain the most likely depth of the proto-Drake Passage to ~ 200 m and therefore improves our understanding of the large-scale oceanographic setting of the Early Cretaceous Southern Ocean. The results show a dominant geographic control on the reconstructed circulation changes. The opening of the Falkland Plateau initially started convection and ventilation in the Weddell Sea, while the subsequent opening of the Georgia Basin Gateway enabled deep water exchange between the South Atlantic and Southern Ocean that ultimately terminated enhanced organic carbon burial in the Cape Basin. The results provide the basis for future biogeochemical modelling to quantify the influence of the regional carbon burial changes on the global carbon cycle and the transient climate evolution of the Early Cretaceous.

Zusammenfassung

Treibhausklimata mit deutlich höheren globalen Durchschnittstemperaturen als heutzutage dominierten weite Teile der geologischen Geschichte. Sie liefern direkte Hinweise auf die Anpassung des Klimasystems an erhöhte Treibhausgaskonzentrationen in der Vergangenheit und stellen die einzige Möglichkeit dar, die Spanne modellbasierter Prognosen der zukünftigen anthropogenen Erwärmung zu begrenzen. Die frühe Kreide (~145-100.5 Ma) bietet eine besondere Möglichkeit unser Verständnis vergangener Treibhausdynamiken zu testen, da die langfristige Wärme durch starke Störungen des globalen Kohlenstoffkreislaufes und Episoden vorübergehender Abkühlung unterbrochen wurde. Junge Ozeanbecken mit eingeschränkter Zirkulation, die durch den Zerfall Gondwanas entstanden, sind aufgrund ihres erhöhten Potenzials für die Ablagerung von organischem Kohlenstoff ein möglicher Antrieb für sowohl kurz- als auch langfristige Schwankungen des Kohlenstoffkreislaufes.

Diese Arbeit zielt darauf ab die primären Antriebe des Treibhausklimas der frühen Kreide besser einzugrenzen und zu beurteilen, inwiefern sie sich von den heutigen Dynamiken unterscheiden. Klimamodellsimulationen der frühen Kreidezeit wurden mit paläozeanographischen Rekonstruktionen der Wassermassenmischung, Oberflächentemperaturen und organischer Kohlenstoffablagerung zusammengeführt, um sowohl die Ursachen für die mittlere Erwärmung als auch die tektonisch bedingten Veränderungen der Ozeanzirkulation und des Kohlenstoffkreislaufes zu rekonstruieren.

In einem ersten Schritt wurden die einzelnen Prozesse quantifiziert, die die simulierte mittlere globale Erwärmung und die Änderungen des meridionalen Temperaturgradienten (MTG) in Folge des erhöhten Treibhauseffektes und der veränderten Paläogeographie kontrollierten. Die Oberflächenerwärmung im frühen Apt (~125 Ma) wurde durch die erhöhten Treibhausgaskonzentrationen (70%) und Änderungen der Oberflächenalbedo (30%) angetrieben. Die reduzierte Höhe und Oberflächenalbedo der eisfreien Antarktis trugen den Großteil zur bis zu 38-prozentigen Abnahme des MTG bei. Änderungen der Wolkenbedeckung hatten keinen Einfluss auf die Änderung der globalen Mitteltemperatur, aber ihre latitudinalen Veränderungen bildeten den einzigen Prozess, der den MTG verstärkte. Der Vergleich mit einem Modellensemble, angetrieben unter der heutigen Geographie, bestätigt, dass der stabilisierende Wolkeneinfluss eine robuste Modellantwort für beide Zeitperioden darstellt.

In einem zweiten Schritt wurden die Modellergebnisse genutzt, um die interne Konsistenz der rekonstruierten Kreidetemperaturen des oberen Ozeans zu testen. Es wird gezeigt, dass die limitierte Zirkulation im gerade entstehenden Nord- und Südatlantik dazu geführt hat, dass die lokalen Temperaturen der frühen Kreide im TEX₈₆-Proxy überschätzt werden. Das Verwenden einer angepas-

ten Kalibration führte dazu, dass sowohl die Übereinstimmung von Modell und Daten als auch die allgemeine Übereinstimmung mit anderen Proxies für die frühe Kreide zunahm. Die Kombination beider Studien impliziert, dass der MTG im frühen Apt zwar deutlich geringer war als heutzutage, er jedoch mit der aktuellen Generation von Klimamodellen reproduzierbar ist.

Eine dritte Studie simulierte die schrittweise Öffnung zweier Meeresverbindungen zwischen dem Südatlantik und dem Südozean im Zeitraum vom Abt bis zum Alb, um ihren Einfluss auf den Wassermassenaustausch zwischen beiden Becken zu rekonstruieren und um mögliche Auswirkungen auf die organische Kohlenstoffablagerung abzuleiten. Ein großes Modellensemble verdeutlicht den verstärkten Einfluss von Unsicherheiten in den verfügbaren Randbedingungen auf die simulierte regionale Zirkulation. Ein Abgleich mit geochemischen Daten ermöglichte eine Eingrenzung der wahrscheinlichsten Tiefe der frühen Drake-Passage auf ~ 200 m und verbessert damit unser Verständnis der großräumigen ozeanographischen Begebenheiten des Südozeans während der frühen Kreide. Die Ergebnisse unterstützen die Annahme einer besonders wichtigen Rolle der Paläogeographie bei den rekonstruierten Zirkulationsänderungen. Die Öffnung des Falkland Plateaus ermöglichte das Einsetzen von Konvektion und Belüftung im Weddell-Meer, während die darauffolgende Öffnung einer Tiefenwasserverbindung den Wassermassenaustausch zwischen dem Südatlantik und Südozean ermöglichte und schließlich zum Ende der erhöhten Kohlenstoffablagerungen führte. Die Ergebnisse liefern die Grundlagen für zukünftige biogeochemische Modellierungen um den Einfluss der regionalen Änderungen der Kohlenstoffablagerungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf und damit den zeitlichen Verlauf der Klimaentwicklung der frühen Kreide zu quantifizieren.