



## **BMBF Förderinitiative Paläo Modellierung (PalMod)**

### **Vorhaben (Teilprojekt) PalModII-WP2.1-SP3**

Marine Biogeochemie im MPI-ESM

**Projektleiter:** Dr. Tatiana Ilyina

Förderkennzeichen: 01LP1919B

Laufzeit: 01.09.2019 - 30.04.2023 (kostenneutralen Verlängerung von  
31.08.2022 bis 30.04.2023)

### **Abschlussbericht**

#### **Teil I: Kurzbericht**

#### **Zuwendungsempfänger:**

Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Bundesstrasse 53  
D-20146 Hamburg



gefördert aus Mitteln des BMBF

## 1 Aufgabenstellung

Das PalMod-Projekt zielt darauf ab, die Beiträge grundlegender Prozesse zur Klimadynamik und -variabilität des letzten Gletscherzyklus mit umfassenden Erdsystemmodellen (ESM) zu quantifizieren. Mehrere Studien mit Proxydaten haben gezeigt, dass der Ozean eine Hauptquelle für den Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub> während der letzten Termination (21 bis 6 ka) ist. Eine große Herausforderung in der zweiten Phase von PalMod ist daher die transiente Simulation der Biogeochemie des Ozeans und ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre während des letzten Deglazials, was bisher noch nie mit ESMs in vollem Maßstab durchgeführt wurde.

Ziel dieses Teilprojekts (PalModII-WP2.1-SP3) ist es, die grundlegenden Prozesse zu verstehen, die die ozeanische CO<sub>2</sub>-Ausgasung regulieren, und die Rückkopplung zwischen Biogeochemie des Ozeans und dem deglazialen Klima mit Hilfe des Erdsystemmodells des Max-Planck-Instituts (MPI-ESM) zu quantifizieren. Konkret besteht unsere Aufgabe darin, Anpassungen und Erweiterungen im Hamburger Ozean-Kohlenstoffkreislauf-Modell (HAMOCC) zu implementieren, die für die transienten Simulationen im interaktiven Kohlenstoffkreislauf-Modus (Meilenstein M2.1-3) notwendig sind. Diese neuen Entwicklungen in MPI-ESM wurden in die transienten Deglazialsimulationen ohne interaktiven Kohlenstoffzyklus (Deliverable D2.1-1) und mit interaktivem Kohlenstoffzyklus (Deliverable D2.1-4) integriert. Wir planen auch eine transiente Simulation für die letzte Eiszeit ohne interaktiven Kohlenstoffkreislauf durchzuführen (Deliverable D2.1-2).

## 2 Ablauf des Vorhabens

Die Modellentwicklung und -anpassung (Meilenstein M2.1-3) und die geplanten transienten Deglazialsimulationen (Deliverables D2.1-1 und D2.1-4) sind abgeschlossen. Für den interaktiven CO<sub>2</sub>-Modus berechnen wir die Veränderung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>, indem wir einen vollständig interaktiven Kohlenstoffkreislauf berechnen, während wir die Strahlungswirkung von verändertem CO<sub>2</sub> aus Beobachtungen vorgeben, um Rückkopplungen auf das Klima durch Fehler im modellierten Kohlenstoffkreislauf zu vermeiden.

Wir haben die für PalMod II geplanten wissenschaftlichen Aufgaben erfüllt. Wir haben unsere Bemühungen vertieft und uns darauf konzentriert, die Rolle der Ozeane als Kohlenstoffspeicher und -Senke während der letzten Eisschmelze zu verstehen. Dabei wurde uns klar, dass die Gewährleistung des Funktionierens des sogenannten interaktiven Kohlenstoffkreislaufs im MPI-ESM Vorrang haben muss. Dies ist auf einen erheblichen Einfluss der Darstellung der deglazialen Kohlenstoffsenken der Ozeane in ESMs auf die zukünftigen Projektionen des Klimas und der Kohlenstoffsenken zurückzuführen. Daher haben wir unseren Schwerpunkt stärker auf die Modellentwicklung und die Forschungsfragen rund um die letzte Eiszeit verlagert. Aufgrund dieser neu gedachten und gestalteten wissenschaftlichen Schwerpunkte, sowie begrenzter Ressourcen, haben wir die Simulationen für den Beginn der Eiszeit (Glacial Inception) ausgelassen. In Phase III wollen wir uns weiterhin auf die Untersuchung der Klima-Kohlenstoffkreislauf-Kopplung der letzten Vereisung und der Zukunft konzentrieren. Dies wurde in dem Antrag für Phase III dargelegt und wurde von internationalen Experten auf diesem Gebiet geprüft und bewilligt.

### **3 Wesentlichen Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Wir erzielten bedeutende Fortschritte bei der Verbesserung der Darstellung der Biogeochemie des Ozeans, bei der technischen Entwicklung von transienten Läufen und beim Sammeln von Erfahrungen mit dem Vergleich von Modellen und Daten, was uns auf die in Phase III geplanten transienten Simulationen mit dem interaktiven Kohlenstoffkreislauf vorbereitet hat. Unsere wichtigsten Erfolge sind die folgenden.

#### **Quantifizierung der Auswirkungen der Zirkulation und des Absinkens mariner Partikel auf die glaziale Biogeochemie des Ozeans**

Wir haben zwei Zirkulationszustände für das letzte glaziale Maximum (LGM, 21ka), die durch Modellabstimmung erreicht wurden, und zwei Schemata für das Absinken mariner Partikel verglichen. Wir fanden heraus, dass eine flache und schwache LGM-AMOC und das "M4AGO"-Sinkschema (das prognostisch die Sinkgeschwindigkeit von Meeresaggregaten berechnet) die Kohlenstoffspeicherung im Inneren des Ozeans maximieren und die Übereinstimmung zwischen Modell und Daten im glazialen Atlantik verbessern (Liu et al., in Vorbereitung).

#### **Deglaziale Variationen der ozeanischen CO<sub>2</sub>-Ausgasung und Biogeochemie in transienten Simulationen mit MPI-ESM**

Unsere erste transiente deglaziale Simulation mit prognostischem CO<sub>2</sub> zeigt, dass die deglaziale CO<sub>2</sub>-Ausgasung hauptsächlich durch die Erwärmung der Meeresoberfläche angetrieben wird. Der Vergleich zwischen transienten deglazialen Simulationen mit unterschiedlichem HAMOCC-Tuning zeigt die Unzulänglichkeit der Validierung von Ozean-Kohlenstoffkreislaufmodellen mit heutigen Beobachtungen (typischer CMIP6-Ansatz) und weist auf kritische Aspekte für die zukünftige Modell-Tuning und -anpassung hin.

#### **Modell-Daten-Vergleich des ozeanischen <sup>13</sup>C-Suess-Effekts im heutigen Ozean**

Wir untersuchten die Möglichkeit, das Modell zur Erklärung der Unsicherheiten in beobachtungsbasierten Datenprodukten zur Schätzung des  $\delta^{13}\text{C}$ -Suess-Effekts im globalen Ozean einzusetzen. In dieser Studie haben wir zwei bedeutende Quellen für methodische Unsicherheiten in diesem Datenprodukt aufgedeckt (Liu et al., 2021).

#### **Zusammenarbeit mit anderen Institutionen**

Wir haben eng mit den PalMod-Partnern zusammengearbeitet. Wir kommunizierten regelmäßig mit den PalMod-Kollegen (WG1, WP2.2) am MPI-M über das Setup und das Tuning des MPI-ESM-Modells. Wir koordinierten und beteiligten uns an dem Projekt zum Vergleich von Ozean-Biogeochemie-Modellen (OBGC-MIP) zwischen den WG2-Partnern, und diese Zusammenarbeit wird in Phase III fortgesetzt. Wir unterstützten bei der Entwicklung der Berechnung der deglazialen Verwitterungsflüsse durch CC1. Außerdem haben wir CC1 bei der Entwicklung der parallelen Berechnung von biogeochemischen Tracern im Ozean in MPI-ESM unterstützt, was die transienten Simulationen in Phase III beschleunigen wird.

Wir haben auch aktiv mit der internationalen Paläogemeinschaft zusammengearbeitet. Unsere Simulationen trugen zum ersten PMIP-Kohlenstoff-Multimodellvergleich bei. Der Postdoc dieses Teilprojekts ist Mitorganisator der nächsten PMIP-Kohlenstoff-Aktivität, die für April 2024 geplant ist.



## **BMBF Förderinitiative Paläo Modellierung (PalMod)**

### **Vorhaben (Teilprojekt) PalModII-WP2.1-SP3**

Marine Biogeochemie im MPI-ESM

**Projektleiter:** Dr. Tatiana Ilyina

Förderkennzeichen: 01LP1919B

Laufzeit: 01.09.2019 - 30.04.2023 (kostenneutralen Verlängerung von  
31.08.2022 bis 30.04.2023)

### **Abschlussbericht**

### **Teil II: Eingehende Darstellung**

#### **Zuwendungsempfänger:**

Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Bundesstrasse 53  
D-20146 Hamburg



gefördert aus Mitteln des BMBF

## **1 Verwendung der Zuwendung**

Die Zuwendung wurde verwendet, um für einen PostDoc wissenschaftliche Arbeiten über den Projektzeitraum zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass mit der Zuwendung Personalkosten, sowie Sachmittel für Konferenzreisen und Workshops bezahlt wurden.

## **2 Erzieltes Ergebnis**

Während der PalMod-Phase II haben wir bedeutende Fortschritte bei der Verbesserung der Darstellung der ozeanischen Biogeochemie, bei den technischen Entwicklungen für instationäre Läufe mit dem Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts (MPI-ESM) und beim Sammeln von Erfahrungen beim Modell-Daten-Vergleich gemacht. Damit haben wir die ersten instationären deglazialen Simulationen ohne und mit interaktivem CO<sub>2</sub> durchgeführt, die uns auf die in Phase III geplanten instationären deglazialen und zukünftigen Simulationen mit dem interaktiven Kohlenstoffzyklus vorbereitet haben. Die Hauptergebnisse sind die folgenden.

### **2.1 Quantifizierung der Auswirkungen der Zirkulation und des Absinkens mariner Partikel auf die Biogeochemie der Glazialmeere**

Die Ozeanzirkulation und die biologische Kohlenstoffpumpe spielen eine wesentliche Rolle bei den glazial-interglazialen Veränderungen der Kohlenstoffspeicherung im Ozean. Wir quantifizieren den Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Biogeochemie des glazialen Ozeans im MPI-ESM mit idealisierten Experimenten. Eine flachere und schwächere glaziale AMOC (Atlantische meridionale Umwälzzirkulation) als die heutige, die durch die Abstimmung der vertikalen Hintergrunddiffusivität erreicht wird, ist notwendig, um im tiefen Atlantik einen größeren Anteil an atmendem Kohlenstoff zu binden und die Hauptmerkmale der <sup>13</sup>C-, <sup>14</sup>C- und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> Proxydaten zu erfassen. Eine prognostische Berechnung der Sinkgeschwindigkeit mariner Aggregate ("M4AGO"-Sinkschema) erhöht die Effizienz des Exports organischer Stoffe in hohen Breitengraden. Das flache AMOC- und M4AGO-Sinkschema maximiert die Kohlenstoffspeicherung im glazialen Atlantik. Das M4AGO-Schema verbessert jedoch weder die Kohlenstoffspeicherung noch die Übereinstimmung zwischen Modell und Daten im Pazifik und im Indischen Ozean, da die Remineralisierung der organischen Substanz verringert wird. Wir arbeiten an einem Manuskript (Liu et al., in Vorbereitung) auf der Grundlage der oben genannten Ergebnisse und planen, es im November 2023 einzureichen.

### **2.2 Deglaziale Variationen der ozeanischen CO<sub>2</sub>-Ausgasung und Biogeochemie in transienten Simulationen mit MPI-ESM**

Wir führten Simulationen der transienten Deglazialisierung (21-6 ka) mit MPI-ESM mit vorgeschriebenem CO<sub>2</sub>-Setup und prognostischem CO<sub>2</sub>-Setup (d.h. vorgeschriebenes CO<sub>2</sub> für die Strahlung und interaktives CO<sub>2</sub> für den Kohlenstoffkreislauf) durch (Abb. 1). Das Modell nutzt die technische Entwicklung während der ersten beiden Phasen von PalMod zur automatischen Anpassung der Topographie, der Flussführung, der Land-Meer-Maske und der Verteilung der ozeanischen Tracer als Reaktion auf den

Schmelzwasserabfluss (Meccia & Mikolajewicz, 2018; Riddick et al., 2018; Extier et al., 2021). Die Simulationen werden durch Rekonstruktionen des Eisschildes (Glac1D; Tarasov et al., 2012), orbitale Parameter (Berger & Loutre, 1991), atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen (Köhler et al., 2017) und  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis (Schmitt et al., 2012) sowie Staubablagerungen (Albani et al., 2016) angetrieben.

Unsere erste transiente deglaziale Simulation mit prognostischem  $\text{CO}_2$  zeigt, dass die deglaziale  $\text{CO}_2$ -Ausgasung hauptsächlich durch die Erwärmung der Meeresoberfläche angetrieben wird (+24 ppmv), während Variationen der Oberflächenalkalinität und des DIC einen kleinen Beitrag leisten (+4,8 ppmv).

Wir haben zwei Simulationen mit der gleichen Physik verglichen, um die deglaziale Ozean-Biogeochemie in MPI-ESM einzuschränken. Diese beiden Läufe unterscheiden sich in der Abstimmung der biogeochemischen Komponente des Ozeans (HAMOCC) und mit/ohne Sedimentmodul (model\_B1 und model\_B2 in Abb. 1). Wir möchten insbesondere der Frage nachgehen: Beeinflusst die Modellabstimmung, die in der Regel anhand heutiger Beobachtungen validiert wird, wie bei CMIP6-Modellen, den ozeanischen Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf während der letzten Deglazialisierung? Beide Modellversionen wurden mit den heutigen biogeochemischen Beobachtungen des Ozeans abgeglichen. Dennoch zeigen die beiden Modelle erhebliche Unterschiede bei einer Reihe von Variablen während der letzten Deglazialisierung. In Modell\_B2 zeigte die instationäre Simulation eine größere NPP (Nettoprimärproduktion), vor allem in den Auftriebsgebieten des Südlichen Ozeans und der östlichen Tropen Pacific (nicht gezeigt), in der vorindustriellen Zeit als der stationärer Kontrolllauf. Modell\_B1 simuliert einen zu großen deglazialen Anstieg der Oberflächenalkalinität aufgrund eines Ungleichgewichts zwischen Eintrag und Sedimentation, was zu einer ozeanischen Aufnahme von  $\text{CO}_2$  führt. Modell\_B2 zeigt eine geringfügig höhere Oberflächenalkalinität in der vorindustriellen Zeit als die Kontrollsimulation, was auf die erhöhte Alkalinität und das Fehlen von Mechanismen zur Beseitigung der überschüssigen Alkalinität zurückzuführen ist. Die obigen Ergebnisse zeigen, dass es unzureichend ist, Modelle des ozeanischen Kohlenstoffkreislaufs nur anhand heutiger Beobachtungen zu validieren. Darüber hinaus zeigt der Vergleich zwischen zwei instationären Simulationen kritische Aspekte für zukünftige Modellabstimmungen und -anpassungen auf.

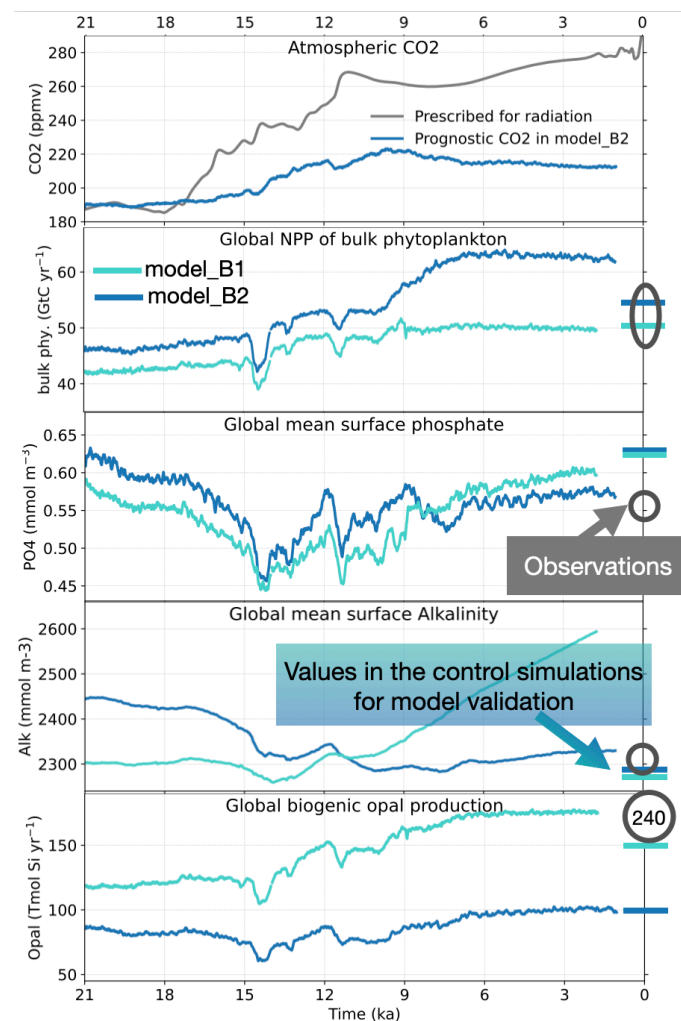


Abbildung 1: Zeitreihen aus instationären Deglaciationssimulationen mit MPI-ESM. Die türkisfarbenen und blauen durchgezogenen Linien zeigen unterschiedliche HAMOCC-Abstimmungen mit (in Modell\_B1) und ohne (in Modell\_B2) ein Sedimentmodul. Die horizontalen durchgezogenen Linien am rechten Ende der Tafeln zeigen Werte aus den vorindustriellen Kontrollsimulationen, die gegen die heutigen Beobachtungen abgestimmt wurden (dargestellt durch graue Kreise).

## 2.3 Entwicklungen für prognostisches atmosphärisches $^{13}\text{CO}_2$ und $^{14}\text{CO}_2$

Wir haben ein  $^{14}\text{C}$ -Modul in HAMOCC implementiert, das der im OMIP-Protokoll empfohlenen abiotischen Implementierung folgt (Orr et al., 2017). Der  $^{13}\text{CO}_2$ -Fluss zwischen Luft und Ozean und der  $^{14}\text{CO}_2$ -Fluss wurden an die atmosphärische Komponente (ECHAM) gekoppelt. WP2.3 implementierte prognostische  $^{13}\text{C}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Variablen in der Landvegetationskomponente (JSBACH) und ECHAM sowie die entsprechenden Luft-Land-Flüsse. Ein Testlauf für den vorindustriellen Zeitraum zeigt, dass die Implementierung der prognostischen atmosphärischen Kohlenstoffisotope erfolgreich ist. Aufgrund des starken Einflusses der terrestrischen Biosphäre sind in der Nordhemisphäre große saisonale Schwankungen des atmosphärischen  $\delta^{13}\text{C}$  zu beobachten (Abb. 2a, b). An den Stationen Point Barrow ( $71^\circ\text{N}$ ), La Jolla ( $32^\circ\text{N}$ ) und Samoa ( $14^\circ\text{S}$ ) zeigt das simulierte  $\delta^{13}\text{C}$  eine mittlere jährliche Schwankungsbreite von 0,9, 0,6 bzw. 0,1 permil (Abb. 2c), was den Feldmessungen gut entspricht.

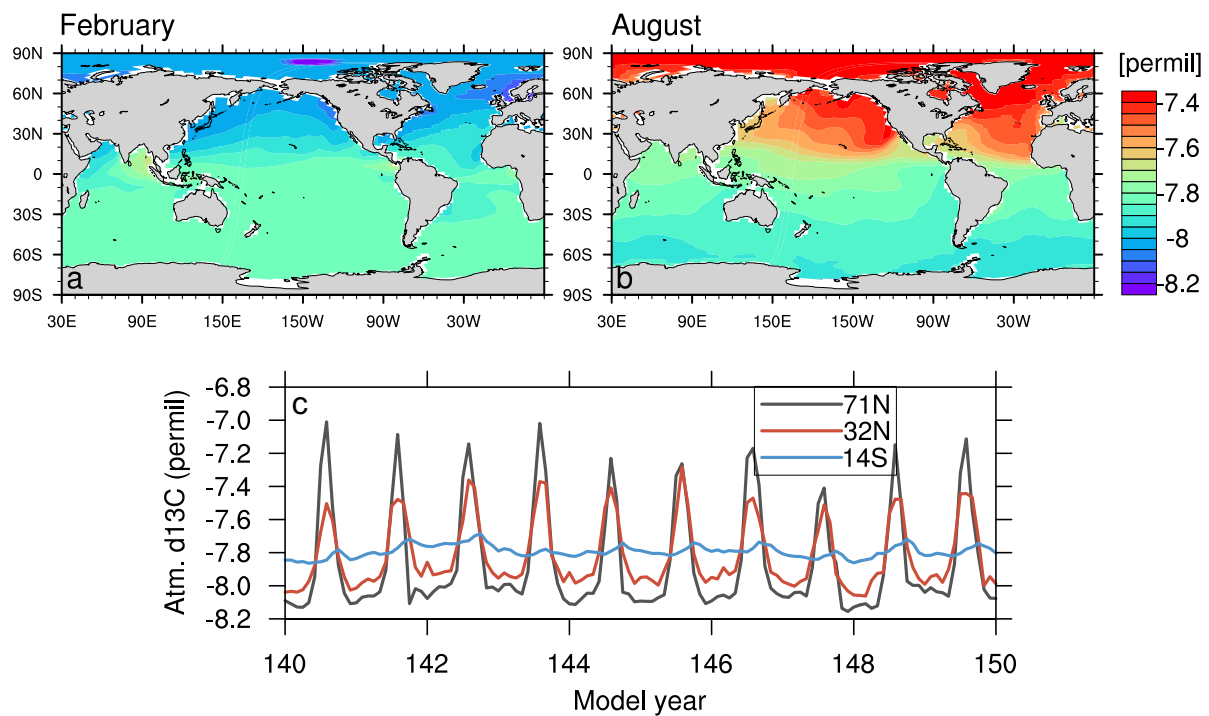


Abbildung 2: Atmosphärisches  $\delta^{13}\text{C}$  (in permil) im prognostischen Kohlenstoffzyklus-Setup des MPI-ESM für die räumliche Verteilung im Februar (a) und August (b) und den saisonalen Zyklus an den Stationen Point Barrow (71°N), La Jolla (32°N) und Samoa (14°S) (c). Die Messungen in (c) stammen vom Scripps CO<sub>2</sub> Program [https://scrippsco2.ucsd.edu/graphics\\_gallery/isotopic\\_data/global\\_stations\\_isotopic\\_c13\\_trends.html](https://scrippsco2.ucsd.edu/graphics_gallery/isotopic_data/global_stations_isotopic_c13_trends.html).

## 2.4 Modell-Daten-Vergleich des ozeanischen $^{13}\text{C}$ -Suess-Effekts im heutigen Ozean

Unter Verwendung von MPI-ESM mit einem neuen  $^{13}\text{C}$ -Modul in seiner biogeochemischen Ozean-Komponente haben wir die Quellen der Unsicherheit in einer beobachtungsbasierten Schätzung des globalen ozeanischen  $^{13}\text{C}$ -Suess-Effekts untersucht. Wir haben eine Reihe von methodischen Annahmen in diesem beobachtungsbasierten Datenprodukt identifiziert, die zu einer deutlichen Unterschätzung des ozeanischen  $^{13}\text{C}$ -Suess-Effekts führen (Liu et al., 2021). Diese Studie unterstreicht, dass wir bei beobachtungsbasierten Datenprodukten nicht nur versuchen sollten, die Daten mithilfe des Modells zu reproduzieren, sondern auch untersuchen sollten, ob das Modell zur Interpretation von Unsicherheiten in Beobachtungsprodukten verwendet werden kann.

## 2.5 Zusammenarbeit mit anderen Institutionen

### *Zusammenarbeit im Rahmen des PalMod-Projekts*

Wir haben eng mit den PalMod-Partnern zusammengearbeitet. Wir haben regelmäßig mit den PalMod-Kollegen (WG1, WP2.2, WP2.3) am MPI-M über die Entwicklung, den Aufbau und die Abstimmung des MPI-ESM-Modells kommuniziert (siehe zum Beispiel Abschnitt 2.3). Wir unterstützten die Entwicklung der Berechnung der deglazialen Verwitterungsflüsse, die von CC1 durchgeführt wurde. Wir haben auch CC1 bei der



Entwicklung der parallelen Berechnung der biogeochemischen Tracer im Ozean in MPI-ESM unterstützt, was die instationären Simulationen in Phase III beschleunigen wird.

Ein Höhepunkt der Zusammenarbeit innerhalb der PalMod WG2 (Marine Biogeochemie) ist das Ozean-Biogeochemie-Modellvergleichs-Projekt (OBGC-MIP). In der aktuellen Phase liegt unser Schwerpunkt auf der Quantifizierung der Mechanismen des LGM-CO<sub>2</sub>-Absenkens und der Bewertung der Robustheit der Ergebnisse durch Multi-Modell- und Modell-Daten-Vergleiche. Die vorläufige Analyse unserer koordinierten Simulationen zeigt, dass alle PalMod-Modelle eine konsistente CO<sub>2</sub>-Absenkung auf ~190 ppmv aufweisen, wenn die LGM-Alkalinität um 5-10% erhöht wird (Abb. 3). Wir werden diese Zusammenarbeit in Phase III fortsetzen und auf transiente deglaziale und zukünftige Simulationen ausweiten.

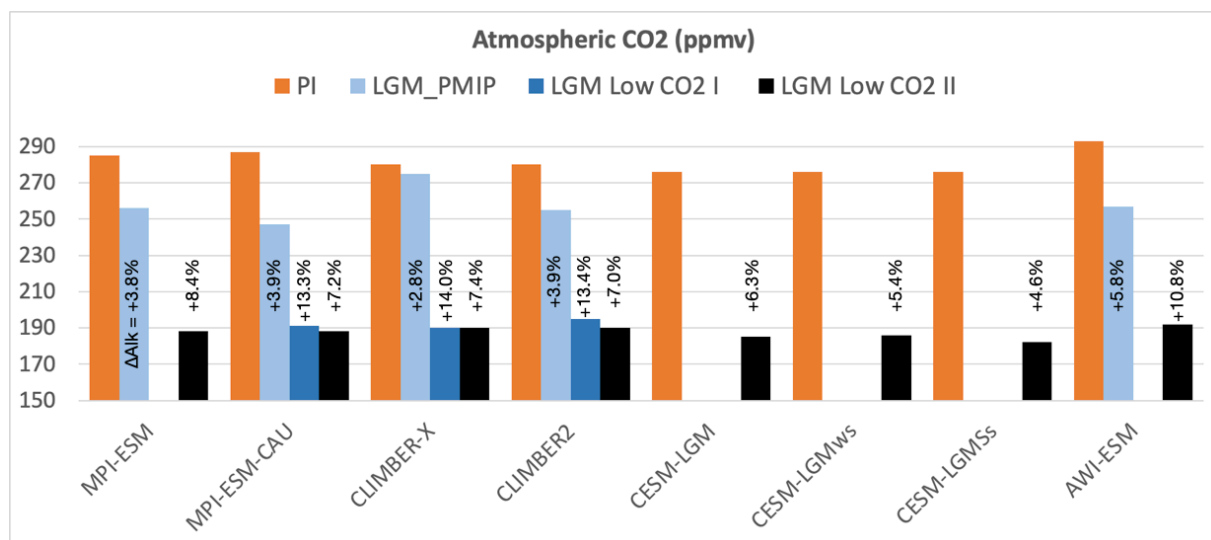


Abbildung 3: Prognostiziertes atmosphärisches CO<sub>2</sub> in PalMod-Modellen für PI, LGM-Simulationen.

### ***Zusammenarbeit mit Einrichtungen außerhalb des PalMod***

Wir haben auch aktiv mit der internationalen Paläogemeinschaft zusammengearbeitet. Unsere Simulationen trugen zum ersten PMIP-Kohlenstoff-Multimodellvergleich bei. Der Postdoc dieses Teilprojekts ist Mitorganisator der nächsten PMIP-Kohlenstoff-Aktivität, die für April 2024 geplant ist.

### **3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der größte Teil der bewilligten Gelder wurde in Form von Personalkosten für die PostDoc Dr. Bo Liu (36 Monate, E14) verwendet. Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung des MPI-M.

## **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Unseres Wissens gibt es bisher nur wenige Studien zu instationären Simulationen mit umfassenden Erdsystemmodellen. Eine instationäre Deglazierungssimulation würde es ermöglichen, die direkte Verbindung zwischen dem sich ändernden Klima und dem ozeanischen Kohlenstoffkreislauf, die Lead-Lag-Beziehungen und die Kaskadeneffekte im Erdsystem zu untersuchen. MPI-ESM ist das erste Modell, das automatische Änderungen der Bathymetrie und der Land-Meer-Maske als Reaktion auf deglazialen Kontinentalabfluss und Schmelzwasserabfluss ermöglicht.

## **5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

Wir haben die technische Entwicklung der biogeochemischen Ozeankomponente von MPI-ESM abgeschlossen und die ersten instationären Deglazierungssimulationen mit einem interaktiven Kohlenstoffkreislauf durchgeführt. Wir planen, diese Entwicklung mit der Paläoklimaforschungsgemeinschaft zu teilen. Diese Errungenschaft ermöglicht es uns auch, Deglazial- und Zukunftssimulationen durchzuführen, um die Klima-Kohlenstoff-Rückkopplung in der dritten Phase von PalMod zu untersuchen. Insgesamt tragen die Projektergebnisse zu einem umfassenderen Verständnis des Erdsystems bei und ermöglichen somit robustere Vorhersagen für das zukünftige Klima und die Kohlenstoffsinken.

## **6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Ein wachsender Teil der Forschung konzentriert sich auf die vorübergehende Simulation der Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit (Snoll et al., 2023) und deren Wechselwirkung mit dem Kohlenstoffkreislauf. Unter Verwendung eines Erdsystemmodells mittlerer Komplexität haben Bouttes et al. (2023) eine interaktive Berechnung der Bathymetrie, der Topographie und des Schmelzwasserverlaufs als Reaktion auf vorgegebene Eisschildrekonstruktionen durchgeführt. Sie haben die ersten instationären deglazialen Simulationen für das Klimasystem durchgeführt und werden in zukünftigen Arbeiten den Kohlenstoffkreislauf einbeziehen. Kobayashi, Abe-Ouchi und Kollegen (Posterpräsentation auf der INQUA, Juli 2023, Rom) nutzten die Ergebnisse des allgemeinen atmosphärisch-ozeanischen Zirkulationsmodells MIROC4, um ein Offline-Modell des Kohlenstoffkreislaufs im Ozean anzutreiben, um die Mechanismen vorübergehender Veränderungen in der deglazialen CO<sub>2</sub>-Ausgasung zu untersuchen.

Beide oben genannten Gruppen sowie andere Paläomodellierungsgruppen werden an dem für April 2024 geplanten PMIP-Kohlenstoff-Workshop teilnehmen, der von dem Postdoc dieses Teilprojekts mitorganisiert wird. Wir werden mit der internationalen Gemeinschaft in Kontakt bleiben und mit ihr mögliche Multi-Modell-Vergleichsprojekte diskutieren.

## 7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

**Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in der folgenden Publikation veröffentlicht:**

Liu, B., Six, K. D., and Ilyina, T.: Incorporating the stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  in the ocean biogeochemical component of the Max Planck Institute Earth System Model, *Biogeosciences*, 18, 4389–4429, <https://doi.org/10.5194/bg-18-4389-2021>, 2021.

Liu, B., Maerz, J., and Ilyina, T.: Impact of ocean circulation and marine biological pump on glacial marine biogeochemistry in MPI-ESM, in preparation.

In-kind contribution:

Lhardy F., N. Bouttes, D. M. Roche, A. Abe-Ouchi, Z. Chase, K. A. Crichton, T. Ilyina, R. Ivanovic, M. Jochum, M. Kageyama, H. Kobayashi, B. Liu, L. Menviel, J. Muglia, R. Nuterman, A. Oka, G. Vettoretti, A. Yamamoto: A first intercomparison of the simulated LGM carbon results within PMIP-carbon: role of the ocean boundary conditions. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36, e2021PA004302, <https://doi.org/10.1029/2021PA004302>, 2021.

Willeit, M., Ilyina, T., Liu, B., Heinze, C., Perrette, M., Heinemann, M., Dalmonech, D., Brovkin, V., Munhoven, G., Börker, J., Hartmann, J., Romero-Mujalli, G., and Ganopolski, A.: The Earth system model CLIMBER-X v1.0 – Part 2: The global carbon cycle, *Geosci. Model Dev.*, 16, 3501–3534, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-3501-2023>, 2023.

**Des Weiteren wurden die Ergebnisse dieses Projekts auf folgenden Tagungen, Konferenzen und Seminaren in Vorträgen oder als Poster präsentiert:**

QUIGS IFG virtual meeting, November 10-12, 2020, online oral presentation.

ICP14, August 29-September 2, 2022, Bergen, poster presentation.

EGU2023, April 23-28, 2023, Vienna, oral presentation.

INQUA2023, July 14-20, 2023, Rome, poster presentation.

PMIP-wings seminar, October 26, 2023, online oral presentation.

## Referenzen

Albani, S., Mahowald, N. M., Murphy, L. N., Raiswell, R., Moore, J. K., Anderson, R. F., McGee, D., Bradtmiller, L. I., Delmonte, B., Hesse, P. P., et al. (2016) Paleodust variability since the Last Glacial Maximum and implications for iron inputs to the ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3944–3954, doi:10.1002/2016GL067911.

Berger, A. and Loutre, M.: Insolation values for the climate of the last 10 million years, *Quaternary Sci. Rev.*, 10, 297–317, [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90033-Q](https://doi.org/10.1016/0277-3791(91)90033-Q), 1991.

Bouttes, N., Lhardy, F., Quiquet, A., Paillard, D., Goosse, H., and Roche, D. M.: Deglacial climate changes as forced by different ice sheet reconstructions, *Clim. Past*, 19, 1027–1042, <https://doi.org/10.5194/cp-19-1027-2023>, 2023.

Extier, T., Six, K. D., Liu, B., Paulsen, H. and Ilyina, T. (2021) Oceanic CO<sub>2</sub> outgassing triggered by terrestrial organic carbon fluxes during deglacial flooding. *Climate of the Past*. DOI 10.5194/cp-2021-112.

Kapsch, M.-L., Mikolajewicz, U., Ziemann, F., & Schannwell, C. (2022). Ocean response in transient simulations of the last deglaciation dominated by underlying ice-sheet reconstruction and method of meltwater distribution. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096767. DOI 10.1029/2021GL096767.

Köhler, P., Nehrbass-Ahles, C., Schmitt, J., Stocker, T. F., and Fischer, H. (2017) A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O and their radiative forcing, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 363–387, <https://doi.org/10.5194/essd-9-363-2017>.

Meccia, V. L. and Mikolajewicz, U. (2018) Interactive ocean bathymetry and coastlines for simulating the last deglaciation with the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM-v1.2). *Geoscientific Model Development*, 11 (11). pp. 4677-4692. DOI 10.5194/gmd-11-4677-2018.

Riddick, T., Brovkin, V., Hagemann, S. and Mikolajewicz, U. (2018) Dynamic hydrological discharge modeling for coupled climate model simulations of the last glacial cycle: the MPI-DynamicHD model version 3.0. *Geoscientific Model Development*, 11. pp. 4291-4316. DOI 10.5194/gmd-11-4291-2018.

Schmitt, J., Schneider, R., Elsig, J., Leuenberger, D., Laurantou, A., Chappellaz, J., et al. (2012) Carbon isotope constraints on the deglacial CO<sub>2</sub> rise from ice cores. *Science*, 336(6082), 711– 714. <https://doi.org/10.1126/science.1217161>.

Snoll, B., Ivanovic, R., Gregoire, L., Sherriff-Tadano, S., Menviel, L., Obase, T., Abe-Ouchi, A., Bouttes, N., He, C., He, F., Kapsch, M., Mikolajewicz, U., Muglia, J., and Valdes, P.: A multi-model assessment of the early last deglaciation (PMIP4 LDv1): The meltwater paradox reigns supreme, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1802>, 2023.

Tarasov, L., Dyke, A. S., Neal, R. M., and Peltier, W.: A data-calibrated distribution of deglacial chronologies for the North American ice complex from glaciological modeling, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 315–316, 30–40, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.010>, 2012.