



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

### **Vorhaben (Teilprojekt) PalMod II**

### **Verbundprojekt WP2.1: Mariner Kohlenstoffkreislauf**

### **TP1,2: Marine Biogeochemie im AWI-ESM**

### **(TP1 C-Isotope, TP2 Si-Isotope+Fe)**

**Projektleiter:** Dr. Peter Köhler

**Ko-Projektleiter:** Dr. Christoph Völker

Förderkennzeichen: 01LP1919A

Laufzeit: 01.10.2019 - 31.12.2023

### **Abschlussbericht**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung  
liegt beim Autor.

### **Zuwendungsempfänger:**

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Postfach 120161

27515 Bremerhaven



## **1 Teil I - Kurze Darstellung / Zusammenfassung**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Das übergeordnete Ziel der Gesamtinitiative PalMod ist die transiente Simulation der Klimaveränderungen während des letzten glazialen Zyklus mit gekoppelten (Standard-Wissenschaft) Simulationsmodellen, die auch für zukünftige (IPCC) Klimaprognosen verwendet werden. Das Ziel von PalMod-II 2.1 (Mariner Kohlenstoffkreislauf) ist ein verbessertes Verständnis der Rolle und der Mechanismen der Rückkopplungen zwischen Klima und marinen biogeochemischen Prozessen und eine Quantifizierung der marinen Beiträge zu Änderungen in der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration während der Deglaziation, dem Beginn einer Eiszeit und schnellen Klimaschwankungen. Die konkreten Ziele dieses Teilprojektes TP1,2: Marine Biogeochemie im AWI-ESM (TP1 C-Isotope, TP2 Si-Isotope+Fe) sind die Simulation des marinen Kohlenstoffkreislaufes mit speziellem Fokus auf den Kohlenstoffisotopen <sup>13</sup>C und <sup>14</sup>C, sowie den Si-Isotopen und des marinen Eisenkreislaufes. Hierdurch wird detailliert untersucht, welchen Anteil physikalische und biologische Prozesse (d. h., Ozeanzirkulation und marine Primärproduktion) an den Signalen haben, die in geologischen Ablagerungen gemessen werden. Die erzielten Computersimulationsergebnisse werden dazu mit Daten aus Sedimentbohrkernen verglichen (Datenkompilation in WG3 von PalMod), um Rückschlüsse auf die stattgefundenen Prozesse zu ziehen.

### **1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Daten aus Eisbohrkernen haben seit den 1990-er Jahren gezeigt, dass während des letzten glazialen Maximums (LGM) die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre um 80-100 ppm unter dem vorindustriellen Wert lag (z.B. Petit et al., 1999, <https://doi.org/10.1038/20859>). Während die Datenlage immer besser wurde, ist immer noch wenig verstanden, warum der glaziale CO<sub>2</sub>-Wert so niedrig war. Lediglich einige Boxmodelle (Köhler et al., 2010, <https://doi.org/10.1029/2008PA001703>) und Erdsystemmodelle reduzierter Komplexität (Brovkin et al., 2012, <https://doi.org/10.5194/cp-8-251-2012>) konnten erfolgreich die gemessenen Werte reproduzieren. Eine besondere Rolle bei der Identifikation der dabei wirkenden Prozesse spielte dabei die Interpretation von Verteilungen der Kohlenstoff- und Si-Isotopen im Ozean. Das Vorhaben ist ein direktes Nachfolgeprojekt von 2 Teilprojekten aus Phase I in PALMOD (PALMOD-2-1-TP1 mit PI Peter Köhler und PALMOD-2-1-TP2 mit PI Christoph Völker). In Phase I konnten die wichtigsten Modellentwicklungen vorangetrieben werden und die beiden in den Teilprojekten beschäftigten Wissenschaftler konnten umfangreiche Vorkenntnisse gewinnen, die sie nun in ihrer Weiterbeschäftigung in Phase II erfolgversprechend einsetzen konnten.

### **1.3 Ablauf des Vorhabens**

Einer der beschäftigten PostDocs hat das Projekt vorzeitig zum 31.03.2022 verlassen. Wir haben die dadurch entstandene Personallücke dahingehend gefüllt, dass die

zweite im Projekt beschäftigte Postdoktorandin über eine beantragte und genehmigte kostenneutrale Verlängerung des Teilprojektes bis Ende 2023 die noch nicht erfüllten Teilaufgaben mit übernommen hat. Weiterhin hat sich das geplante Vorhaben als teils zu ambitioniert herausgestellt, weil teilweise die notwendigen Simulationen aus WG1 noch nicht zur Verfügung standen. Es wurde daher, in Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber innerhalb eines Änderungsantrages, entschieden, sich auf Simulationen zu Termination I zu fokussieren, und die geplanten Arbeiten zur glazialen Inzeption und MIS3 in Phase II nicht mehr zu bearbeiten.

#### **1.4 Wesentliche Ergebnisse**

In unseren Computersimulationen, in denen wir das im Projekt verbesserte marine biogeochemische Modell REcoM3p benutzen, konnten wir folgendes zeigen: Beim Vergleich unterschiedlicher Implementierungen zeigt sich, dass eine vereinfachte Rechenzeit sparende Darstellung des  $^{14}\text{C}$  Kreislaufes ausreichend genaue Abschätzungen enthalten, wie sich  $^{14}\text{C}$  im Ozean verändert. Ein verbesserter Eisenkreislauf führt zu glazialen Änderungen in der biologischen Kohlenstoffpumpe, die die sogenannte „silic acid leakage Hypothese“ nicht unterstützen. Alkalinitätsänderungen im glazialen Ozean sind notwendig, um den simulierten atmosphärischen  $\text{CO}_2$  Gehalt im letzten glazialen Maximum in die Nähe der Rekonstruktionen zu bringen. Diese Alkalinitätsänderungen wurden bisher in einem PALMOD-internen Modellvergleich vorgeschrieben, können zukünftig aber teilweise durch das angekoppeltes prozessbasierte Sedimentmodell hervorgerufen werden. Letzteres ist ein Baustein im simulierten Kohlenstoffkreislauf, der für transienten Simulationen über mehrere tausend Jahre unabdingbar ist. Die Bedeutungen der unterschiedlichen Kohlenstoffpumpen für glaziale Änderungen im  $\text{CO}_2$  können in ersten Ansätzen abgeschätzt werden. Eine aktivere biologische Pumpe ist demnach im letzten Glazial für eine Reduzierung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  um ca. 37 ppm verantwortlich.

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Arbeiten dieses Vorhabens waren eng mit den zahlreichen anderen PalMod-Arbeiten und -Teilprojekten verzahnt. An erster Stelle ist die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes WP2.1 (Mariner Kohlenstoffkreislauf) zu nennen, in dem die Randbedingungen und Szenarien, die simuliert werden sollten, festgelegt wurden. Diese Kooperation führte zu einem Modellvergleich der simulierten  $\text{CO}_2$  Änderungen während des LGMs innerhalb PalMods. Hinzu kommt die AWI-interne Kooperation mit PalMod-Projekten aus WG1, bei denen die Kopplung zwischen Landeis und Klima im Vordergrund steht. Durch die Verwendung des Sedimentmodells MEDUSA gab es eine intensive externe Kooperation mit dessen Entwickler, Dr. Guy Munhoven, Universität Liège, Belgien. Weiterhin nutzen chinesische Kollegen eine Version des Modells (in einem veralteten Setup, das wir selbst hier nicht mehr benutzen) und führen weitergehende Analysen zum glazialen Kohlenstoffkreislauf durch, zu denen wir beitragen.

## 2 Teil II - Eingehende Darstellung

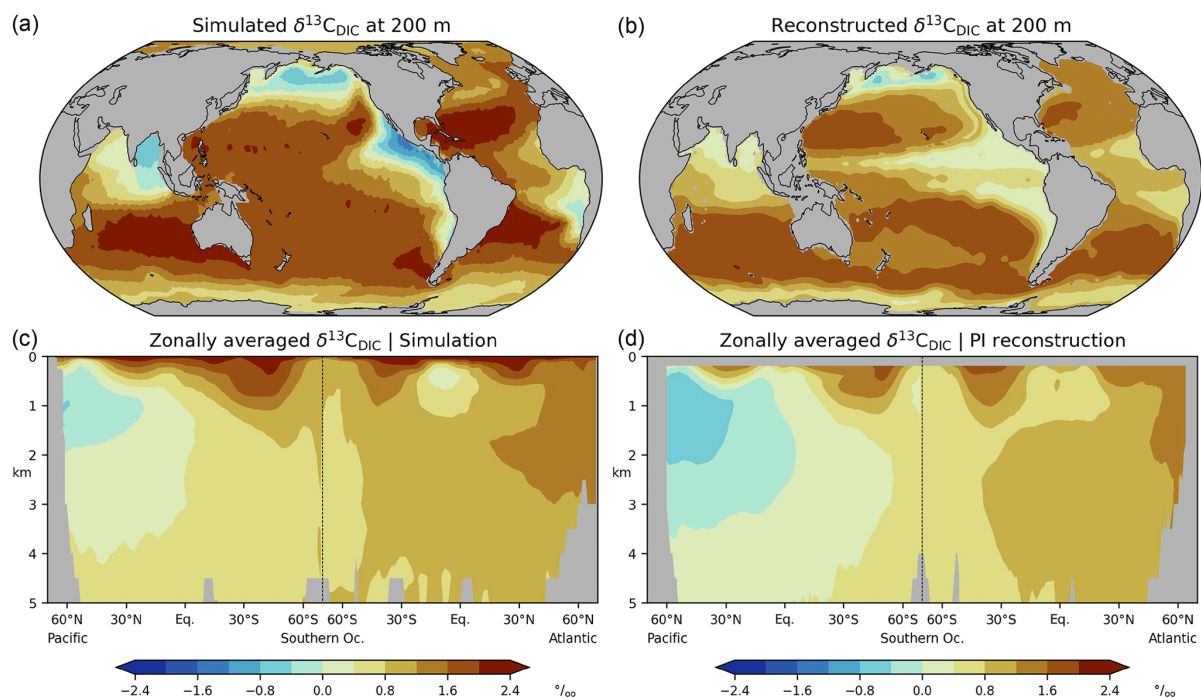
### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis

Die Zuwendung wurde verwendet, um für zwei PostDocs wissenschaftliche Arbeiten über den Projektzeitraum zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass mit der Zuwendung Personalkosten, sowie Sachmittel für Konferenzreise, Workshops, und Publikationskosten bezahlt wurden.

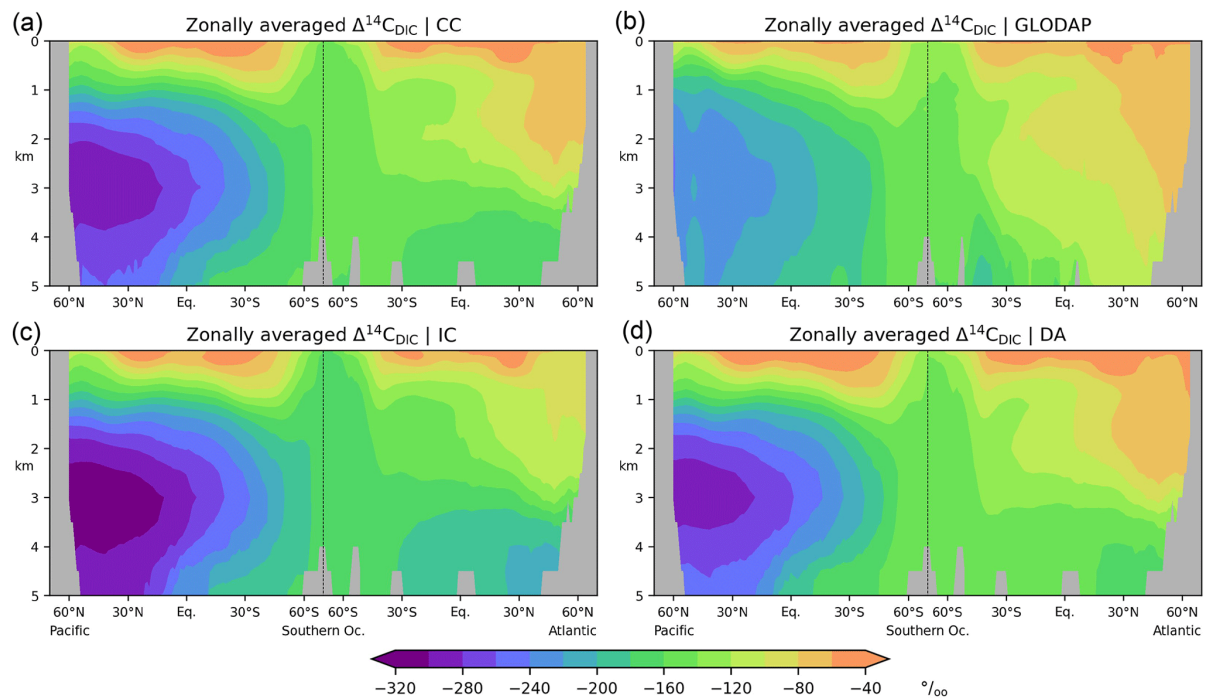
*Im Folgenden sind Artikel, die im Rahmen dieses Projektes veröffentlicht wurden, mit einem **fett** markierten Zitat versehen (vollständige Referenzen in Abschnitt 2.6). Zusätzliche Zitate sind durch die angehängte DOI vollständig nachvollziehbar, aber nicht in einer Referenzliste zusammengefasst.*

In PALMOD Phase II wurde das biogeochemische Modell REcoM mit dem Ozeanzirkulationsmodell FESOM2 gekoppelt und das bisherige Transportmodell MITgcm - wie geplant - nicht weiterverwendet. FESOM2-REcoM (Gürses et al., 2023) ist nun Bestandteil des Erdsystemmodells AWI-ESM2. Mit Hilfe der sogenannten Erdsystem-Modellierungs-Tools („ESM-Tools“, <https://github.com/esm-tools>) kann das Modell auf verschiedenen Großrechnern wie z. B. am AWI in Bremerhaven und am DKRZ in Hamburg installiert und betrieben werden. Ein wesentlicher Schritt war hierbei der Einbau der Möglichkeit, auch das Sedimentmodell MEDUSA gekoppelt an die anderen Komponenten des Erdsystemmodells mit den ESM-Tools zu betreiben (s.u. für die Details).

Die Implementierung von  $^{13}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  in das biogeochemische Modell REcoM wurde abgeschlossen und in einer Veröffentlichung dokumentiert (Butzin et al., 2024). Für  $^{13}\text{C}$ , siehe Abbildung 1.



**Abbildung 1:** (aus Butzin et al., 2024) Vorindustrielles  $\delta^{13}\text{C}$  in DIC. (a, c) Simulationen aus dieser Studie. (b, d) Rekonstruktionen.



**Abbildung 2:** (aus Butzin et al., 2024) Vorindustrielles  $\Delta^{14}\text{C}$  in DIC. **(a)** Simulation CC (vollständige Betrachtung des  $^{14}\text{C}$  Zyklus), **(b)** Rekonstruktion, **(c)** Simulation IC (Vernachlässigung des organischen Kohlenstoffkreislaufs für  $^{14}\text{C}$ ), **(d)** Simulation DA ( $^{14}\text{C}$  Abschätzung basierend auf Ozeanzirkulation und radioaktiven Zerfall).

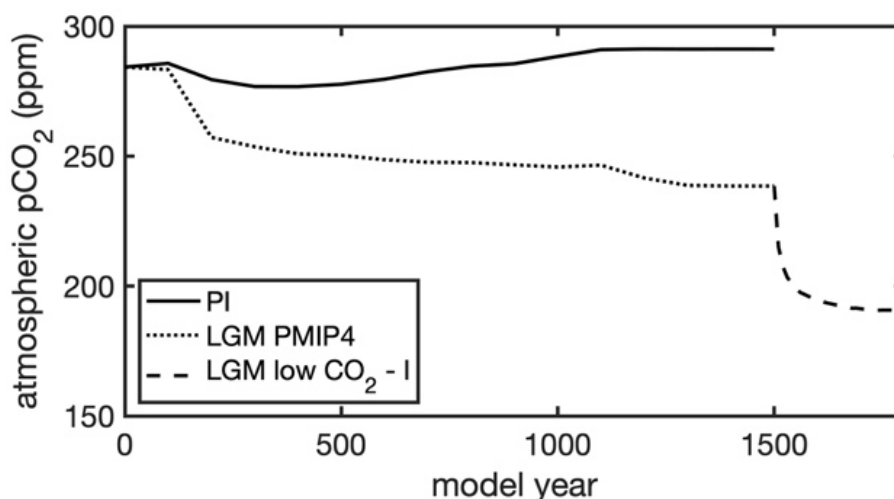
Die finale Modellversion REcoM3p, die zukünftig im Rahmen von Paläosimulationen verwendet werden wird, nutzt die biogene Kohlenstoff-Fraktionierung des Planktons gemäß Young et al. (2013, <https://doi.org/10.1002/gbc.20045>). Darüber hinaus beinhaltet REcoM3p zwei unterschiedlich komplexe und damit unterschiedlich rechenintensive Formulierungen des marinen organischen  $^{14}\text{C}$ -Kreislaufs. In unserer Veröffentlichung konnten wir zeigen, dass für die  $^{14}\text{C}$ -Datierung von anorganischem marinem Kohlenstoff beide Ansätze hinreichend genau sind (Abbildung 2).

Hingegen wurde die Strategie fallengelassen, REcoM darüber hinaus durch einen größeren Zeitschritt beim Transport aller planktonischer Tracer zu beschleunigen, denn die numerischen Probleme erwiesen sich als nicht behebbar. Stattdessen konnte REcoM3p mit Hilfe des DKRZ durch eine verbesserte Parallelisierung des Quellcodes um ungefähr das Doppelte beschleunigt werden (Himstedt 2023, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-756>). Außerdem sind mit REcoM3p prognostische Simulationen des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts für alle drei Kohlenstoffisotope möglich. Dies wird exemplarisch für  $^{12}\text{CO}_2$  in Ye et al. (2023) diskutiert und ist für einige Experimente in Abbildung 3 dargestellt.

Parallel zu diesen Entwicklungen wurden marine  $^{14}\text{C}$ -Langzeitsimulationen mit dem weniger komplexen Modell LSG durchgeführt. Wie bereits im Abschlußbericht des Vorgängerprojekts aus Phase I in PALMOD berichtet, gingen diese Ergebnisse in die Konstruktion der aktuellen  $^{14}\text{C}$ -Kalibrierungskurven IntCal20 und Marine20 ein, zu denen in PALMOD Phase II noch etliche Artikel veröffentlicht wurden (Heaton et al. 2020, 2023a, 2023b). LSG- $^{14}\text{C}$ -Resultate wurden ebenfalls von Gottschalk et al. (2020), Beisel et al. (2023) und Raddatz et al. (2023) herangezogen, um

Ventilationsalter der Wassermassen des Atlantischen bzw. Indischen Ozeans am Ende der letzten Eiszeit zu untersuchen und in **Köhler et al. (2022)** mit Simulationen eines einfachen Boxmodells verglichen, um ein besseres Verständnis für die  $^{14}\text{C}$  Produktionsraten während der letzten 55000 Jahre zu erlangen. Außerdem fanden sie Eingang in zwei eingeladene Übersichtsartikel (**Lohmann et al., 2020; Heaton et al., 2021**). Das LSG-Modell betrachtet einen sehr vereinfachten marinen anorganischen  $^{14}\text{C}$ -Kreislauf, dessen reduzierte Formulierung noch über den einfacheren der beiden Ansätze von REcoM3p hinausgeht. Allerdings konnten wir zeigen, dass auch diese Methode für die marine  $^{14}\text{C}$ -Datierung noch ausreichend genau ist (**Butzin et al. 2024**). Eine zum LSG-Modell analoge  $^{14}\text{C}$ -Implementierung in FESOM2 (ohne REcoM) wurde in zwei Veröffentlichungen beschrieben (**Lohmann et al., 2020; Butzin et al., 2024**), auf der EGU General Assembly 2021 präsentiert, sowie in **Ruben et al. (2023)** für die Abschätzung der zeitlichen Entwicklung von  $^{14}\text{C}$  im gelösten inorganischen Kohlenstoff im Oberflächenwasser eines Fjords auf Spitzbergen seit dem Jahr 1850 CE genutzt.

Es wurden des Weiteren eine Reihe verschiedener Zeitscheibenexperimente für das letzte glaziale Maximum (LGM) und den vorindustriellen Klimazustand (PI) mit AWI-ESM-REcoM durchgeführt. Die Notwendigkeit für das mehrfache Durchführen dieser Experimente ergab sich zum einen daraus, dass der physikalische Zustand des Modells sich im Laufe der Fortschritte im WP1 am AWI noch mehrfach veränderte, und zum anderen aus Veränderungen im biogeochemischen Modell, etwa in der Darstellung von Eisenquellen. Diese Zeitscheibenexperimente dienen als Ausgangspunkt für die Modellierung des transienten Übergangs aus dem letzten Glazial in die Erwärmung, wobei es vor allem darauf ankommt, dass der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in beiden Klimazuständen recht genau wiedergegeben wird. Dies ist uns für den vorindustriellen Zustand gelungen (Abbildung 3).



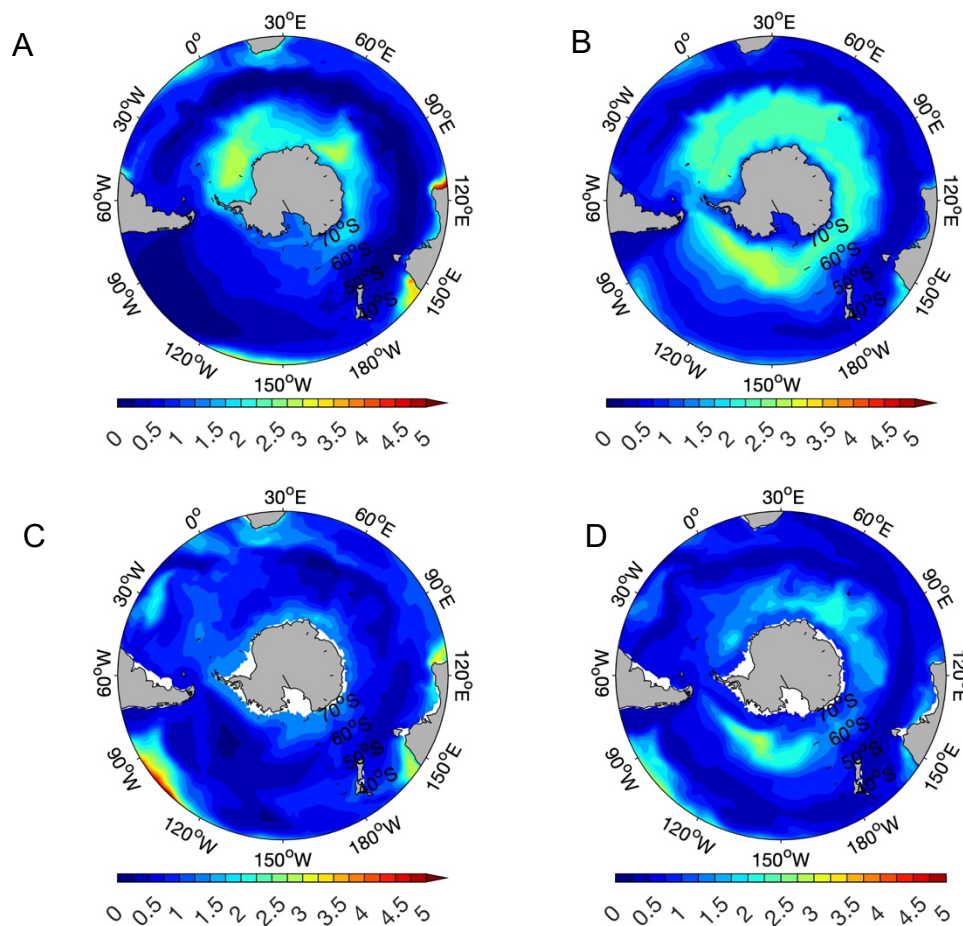
**Abbildung 3:** Prognostischer atmosphärischer  $\text{CO}_2$ -Gehalt in den verschiedenen Experimenten. PI: Kontrolllauf mit vorindustriellem Klima; LGM PMIP4: Glaziale Simulation mit Klima gemäß dem PMIP4-Protokol; LGM low  $\text{CO}_2$ -I: Glaziale Simulation, in denen  $\text{CO}_2$  durch Manipulation der Alkalinität den rekonstruierten Werten angenähert wird.

Die Wiedergabe des glazialen CO<sub>2</sub>-Gehaltes wird durch Klimabedingungen, wie sie standardmässig in Modellen vorgeschrieben werden (Kageyama et al., 2017, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4035-2017>), jedoch nicht erreicht. Erst durch eine zusätzliche angenommene Änderung in der Alkalinität des Ozeans – die den kombinierten Effekt des Verwitterungseintrags von Land, der Karbonatsenke in Schelfgebieten durch Korallenwachstum und der Ozean-Sediment-Interaktion widerspiegelt – lässt sich in unserem Modell ein atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Gehalt von ca. 190 ppm erreichen, wie er im letzten Glazial in den Eisbohrkernen vorgefunden wurde.

Indem wir zwei zusätzliche Zeitscheibenexperimente für PI und LGM mit dem AWI-ESM durchführten, in denen die Biologie im Ozean abgeschaltet wurde, konnten wir zeigen, dass ein wesentlicher Teil der Erniedrigung des atmosphärischen CO<sub>2</sub> während des LGMs (-37 ppm) durch eine Veränderung der sogenannten biologischen Kohlenstoffpumpe verursacht wird (**Ye et al., in preparation**). Diese wiederum wird wesentlich beeinflusst durch eine Veränderung des Eiseneintrags in den Ozean im LGM. Neben Staubdeposition berücksichtigt das AWI-ESM eine Reihe weiterer Eiseneinträge in den Ozean, die sich zwischen Glazial und Interglazial ändern können: Erhöhte Staubdeposition während des LGM bringt 67% mehr Eisen in den Ozean, was zu einer deutlich höheren biologischen Produktivität im Südlichen Ozean führt. Durch den höheren kontinentalen Flusseintrag enthält die LGM Simulation auch eine hierdurch erhöhte ozeanische Eisenkonzentration. Der Sedimenteintrag im LGM ist durch die Absenkung des Meeresspiegels jedoch um 62% reduziert. Allerdings hat dieser Effekt auf den Eisenzyklus, wie auch der von hydrothermalen Quellen, weniger Bedeutung für die biologische Produktivität als die Staubdeposition, da Staub direkt Eisen im Oberflächenwasser für die Aufnahme durch Phytoplankton zur Verfügung stellt. Die in WP1 am AWI modellierte Änderung des Eisbergtransportes (Ackermann et al., 2024, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-3279-2024>) wurde für das LGM erst zum Ende von PalMod Phase II fertig, so dass der Effekt eines veränderten Eiseneintrags durch Eisberge in unseren Simulationen noch nicht berücksichtigt wurde. Wir erwarten jedoch, dass dieser Effekt gegenüber den Veränderungen der Staubdeposition im Südozean klein ist.

In der Summe verändert sich die globale Exportproduktion im LGM kaum gegenüber dem PI, jedoch steigt der Anteil der Produktion im Südozean, was zu einem höheren Anteil der Regeneration von Kohlenstoff im antarktischen Bodenwasser, und damit zu einer erhöhten Kohlenstoffspeicherung führt. Außerdem sinkt durch die Abnahme der Eisenlimitierung das molekulare Verhältnis von Si:N in Kieselalgen (Diatomeen) im Südozean, was zu einer Veränderung des Silikatexportes in niedrigere Breiten führt (Abbildung 4B,D). Entgegen den Erwartungen aus der "silicic acid leakage hypothesis" (Brzezinski et al., 2002, <https://doi.org/10.1029/2001GL014349>, Matsumoto et al., 2002, <https://doi.org/10.1029/2001GB001442>) führt die dadurch bewirkte erniedrigte Aufnahme von gelöstem Silikat relativ zu Nitrat jedoch in unseren Simulationen nicht zu einem verstärkten Export von Si mit antarktischen Zwischenwasser in niedrigere Breiten, und dadurch zu einer erhöhten Diatomeenproduktivität dort. Stattdessen wird mit der durch den Eiseneintrag erhöhten Diatomeenproduktion im Südozean mehr biogenes Silikat in den tiefen Südozean, und mit der Ausbreitung von antarktischen Bodenwasser vor allem in den tiefen Pazifik exportiert. Dieses Ergebnis stimmt überein

mit der Hypothese einer größeren Speicherung von Si im tiefen Ozean während des letzten Glazials, wie sie etwa anhand von Si-Isotopen in Tiefseeschwämmen von Dumont et al. (2020, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15101-6>) formuliert wurde.



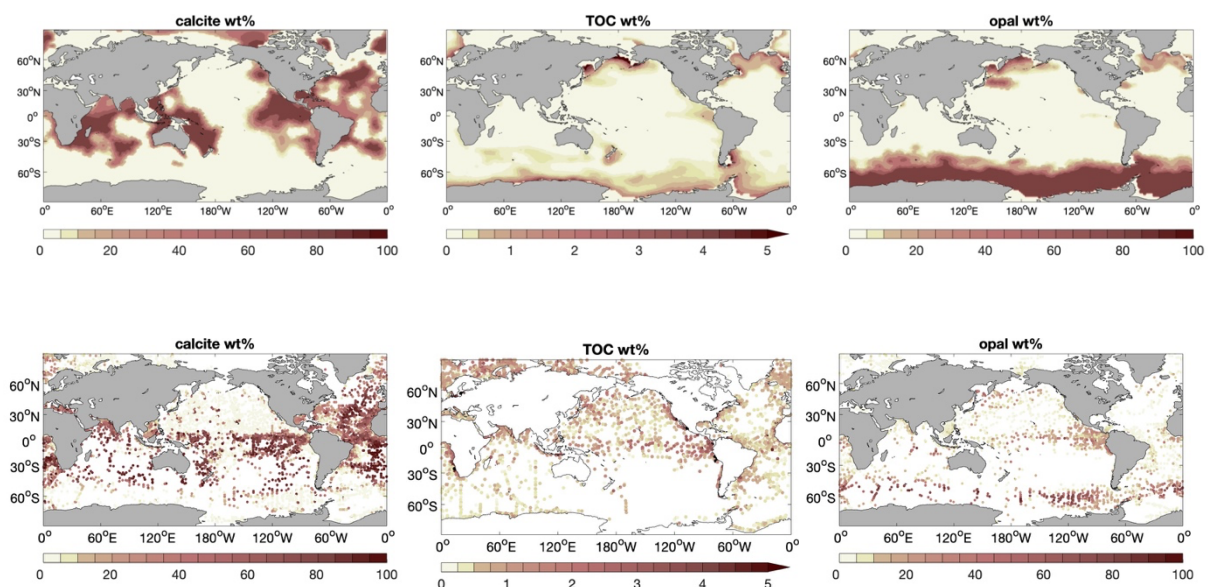
**Abbildung 4:** Simuliertes Si:N Verhältnis im Oberflächenwasser (A, C) und in Diatomeen (B, D) während des PI (A, B) und während des LGM (C, D).

Diese Ergebnisse sollen in eine geplante Publikation (Ye et al, in preparation) eingehen. Im nächsten Schritt soll dann in den transienten Experimenten zur Deglaziation untersucht werden, ob sich das Szenario der sogenannten „silicic acid ventilation hypothesis“ (Hendry et al., 2014, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.01.019>) oder der „abyssal silicon hypothesis“ (Dumont et al., 2020, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15101-6>) bestätigen lässt. Die beiden Hypothesen unterscheiden sich vor allem in dem Zeitpunkt während der Deglaziation, in dem ein Puls von Si-Auftrieb zu einem Anstieg der Diatomeenproduktion führt.

Ergebnisse dieser Simulationen sind auch in einen Modellvergleich innerhalb von PalMod Phase II eingegangen, in dem untersucht wird, wie sich die unterschiedliche Ozeanzirkulation in den am Projekt beteiligten Erdsystemmodellen auf die Kohlenstoffspeicherung im Ozean und damit den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt auswirkt, und welches die Mechanismen sind, die darin zur Absenkung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes führen. Hier zeigen sich noch sehr große

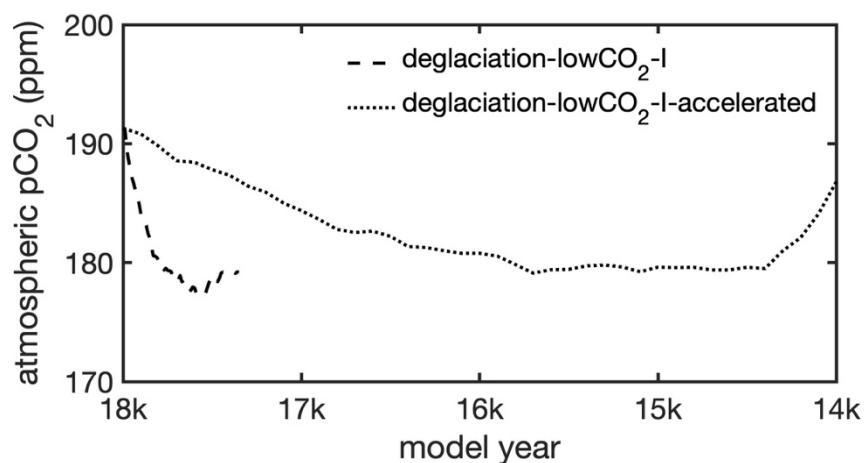
Unterschiede zwischen den Modellen, die vor allem auf die unterschiedliche Ozeanzirkulation im simulierten Glazial zurückzuführen sind. Als Konsequenz zeigt sich, dass zwar Modelle eine erhöhte Speicherung von regeneriertem Kohlenstoff im tiefen Ozean produzieren, jedoch ist die Erhöhung im MPI-ESM vor allem im tiefen Atlantik lokalisiert, während sie im AWI-ESM im tiefen Pazifik stattfindet. Die Ergebnisse des Vergleichs wurden auf der Jahrestagung der EGU im April 2024 vorgestellt; eine Publikation ist in Vorbereitung (**Liu et al., in preparation**).

Im Verlauf des Projektes wurde die Ankopplung des Sedimentmodells MEDUSA (Munhoven, 2021; <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3603-2021>) an FESMO2.1-REcoM3p erreicht und die Möglichkeit geschaffen, das gekoppelte Modell über die ESM-Tools laufen zu lassen. Hiermit wurden zunächst Simulationen mit einem gekoppelten Modell aus REcoM3p (Ozean) und MEDUSA (Sediment, Abbildung 5) für den vorindustriellen Klimazustand durchgeführt. Im Unterschied zu vielen anderen Sedimentmodellen in ESMs beschreibt unser Modell auch anoxische Abbauprozesse von organischem Material durch Nitrat- und Sulfatreduktion. Ziel der Studie sind Vergleiche und Konsistenzuntersuchungen zu Beobachtungen und der vorher benutzen einfachen Sedimentbox in REcoM3p. Die Vergleiche zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Verteilung von organischem Kohlenstoff und Kalziumkarbonat im gegenwärtigen Klimazustand realistisch zu beschreiben, und transiente Modellläufe, in der der atmosphärische Kohlenstoffgehalt massiv gestört wird, sinnvolle Konsequenzen für die Speicherungen im Sediment enthalten. Da eine solche Störung auch im letzten Glazial stattfand, ist dieser Störungstest eine wichtige Vorbedingung für die Simulation des Übergangs zwischen Glazial und Interglazial. Die Implementierung und die Vergleiche wurden in einem Modellbeschreibungspaper dokumentiert (**Ye et al., 2023**),



**Abbildung 5:** (aus **Ye et al., 2023**) Kalk, gesamter organischer Kohlenstoff (TOC) und Opal (in prozentualen Gewichtsanteilen, wt%) im Oberflächensediment in FESMO2.1-REcoM3p-MEDUSA2 (oben) und in Hayes et al. (2021, <https://doi.org/10.1029/2020GB006769>) (unten).

Schließlich wurden, ausgehend von einem Zeitscheibenexperiment für das LGM, auch erste transiente Simulationen für Termination 1, d.h. den Übergang in die jetzige Warmzeit, durchgeführt. Diese Läufe benutzen das physikalische Setup, das in WP1 am AWI für Läufe des Erdsystemmodells ohne Kohlenstoffkreislauf entwickelt wurde. Neben der Veränderung der Einstrahlungsparameter und der Treibhausgase (die hierfür vorgeschrieben werden) spielen vor allem die vorgeschriebene Entwicklung der Eisschilde und die daraus resultierenden Schmelzwasserflüsse eine wichtige Rolle für die simulierte Klimaentwicklung (Krebs-Kanzow et al., 2024, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-19780>). Unsere Simulationen werden, so wie in jener Studie, teils mit, teils ohne Beschleunigung der Randbedingungen durchgeführt (Lorenz and Lohmann, 2004, <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0469-y>). Im Lauf mit Beschleunigung mit einem Faktor 10 zeigt sich ein Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre zwischen 15000 und 14000 Jahren vor heute, während Simulationen ohne Beschleunigung zwischen 18000 und 17000 Jahren vor heute die niedrigste CO<sub>2</sub> Konzentration erreicht (Abbildung 6). Diese Ergebnisse beruhen nicht auf den neusten LGM Zuständen und sind daher als Tests der Technik für transiente Simulationen zu verstehen. In einem Nachfolgeprojekt in PalMod Phase III werden diese transienten Simulationen mit verbesserten Ausgangszuständen wiederholt und final ausgewertet werden.



**Abbildung 6:** Atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration (ppm) während transienter Simulationen (Termination 1). Beschleunigte (accelerated) und unbeschleunigte Simulationen. Die X-Achse zeigt das Alter entsprechend der vorgeschriebenen Randbedingungen in kyr vor heute (z.B.: 18k = 18,000 Jahre vor heute).

Weiterhin unterstützen wir Arbeiten von Kollegen, die mit REcoMp, noch in dem Setup in MITgcm, das wir selbst innerhalb PalMods am AWI nicht mehr verwenden, Zeitscheiben-Simulationen durchgeführt haben, in denen einzelne Antriebsterme jeweils idealisiert verändert wurden. Dies erlaubt es, die Rolle einzelner Prozesse auf die glaziale CO<sub>2</sub>-Minderung zu separieren. Der erste Teil dieser Arbeit wurde in **Du et al. (2022)** publiziert. Details der Veränderungen der biologischen Pumpe und Nährstoffverteilung (vor allem im Bezug auf die Silicic Acid Leakage Hypothesis, Arellano-Torres et al., 2011, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.02.002>) werden derzeit für eine weitere Publikation analysiert (**Du et al., in preparation**).

## 2.2 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil der bewilligten Gelder wurde als Personalkosten für die PostDocs Dr. Martin Butzin und Dr. Ying Ye verwendet. Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung des AWI.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren für eines der langfristigen Ziele von PalMod - die erfolgreiche transiente Simulation der schwankenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration während des letzten glazialen Zyklus' mit Erdsystemmodellen – unbedingt notwendig. Mit Hilfe eines Sedimentmoduls und der in diesem Projekt implementierten Isotope wird es in PALMOD Phase III möglich sein, die Bedeutung der unterschiedlichen marinen Kohlenstoffpumpen für Veränderungen im atmosphärischen CO<sub>2</sub> im Detail zu analysieren und mittels Vergleich mit Daten, deren Bedeutungen unter sich verändernden Randbedingungen zu quantifizieren.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die geleisteten Arbeiten innerhalb des Teilprojekten waren notwendige Vorarbeiten für das mittlerweile gestartete Nachfolgeprojekt PalMod III. Das Vorhaben PalMod II WP 2.1 TP1,2 im Rahmen der PalMod Förderinitiative ist in der Grundlagenforschung angesiedelt. Der wirtschaftliche Nutzen, der aus den erzielten Ergebnissen erwächst, ist naturgemäß nur mittel- bis langfristiger Natur. Kurzfristig hat das Vorhaben aber die Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Austausch mit den anderen PalMod Projektteilnehmern intensiviert. Durch die Einbindung von jungen Wissenschaftlern wurde die Qualität in der Ausbildung gesichert. Die Ergebnisse des Vorhabens tragen insgesamt zu einem komplexeren Verständnis des „Systems Erde“ und damit zu verbesserten Prognosen zukünftiger globaler Entwicklungen bei.

## 2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Außer den Arbeiten der Verbundprojektpartner sind uns keine Arbeiten bekannt, in denen innerhalb eines State-of-the-Art Erdsystemmodells der marine Kohlenstoffkreislauf während des letzten Glazials simuliert wurden.

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht (in fett markiert sind die PIs und die PostDocs des Projekt):

Beisel, E., Frank, N., Robinson, L. F., Lausecker, M., Friedrich, R., Therre, S., Schröder-Ritzau, A., **Butzin, M.** (2023). Climate induced thermocline aging and ventilation in the eastern Atlantic over the last 32,000 years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38, e2023PA004662. <https://doi.org/10.1029/2023PA004662>.

- Butzin, M., Y. Ye, C. Völker, Ö. Gürses, J. Hauck, P. Köhler** (2024). Carbon isotopes in the marine biogeochemistry model FESOM2.1-REcoM3, *Geoscientific Model Development*, 17, 1709–1727, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-1709-2024>.
- Du, J., **Ye, Y.**, Zhang, X., **Völker, C.**, Tian, J., (2022). Southern Control of Interhemispheric Synergy on Glacial Marine Carbon Sequestration. *Geophysical Research Letters* 49, e2022GL099048. <https://doi.org/10.1029/2022GL099048>.
- Gottschalk, J., E. Michel, L. M. Thöle, A. S. Studer, A. P. Hasenfratz, N., Schmid, **M. Butzin**, A. Mazaud, A. Martínez-García, S. Szidat, S. L. Jaccard (2020). Glacial heterogeneity in Southern Ocean carbon storage abated by fast South Indian deglacial carbon release, *Nature Communications*, 11, 6192, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20034-1>.
- Gürses, Ö., Oziel, L., Karakuş, O., Sidorenko, D., **Völker, C.**, **Ye, Y.**, Zeising, M., **Butzin, M.**, and Hauck, J. (2023). Ocean biogeochemistry in the coupled ocean–sea ice–biogeochemistry model FESOM2.1–REcoM3, *Geoscientific Model Development*, 16, 4883–4936, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4883-2023>.
- Heaton, T. J., **P. Köhler, M. Butzin**, E. Bard, R. W. Reimer, W. E. N. Austin, C. Bronk Ramsey, P. M. Grootes, K. A. Hughen, B. Kromer, P. J. Reimer, J. Adkins, A. Burke, M. S. Cook, J. Olsen, L. C. Skinner (2020). Marine20 — the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP), *Radiocarbon*, 62, 779–820, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68>.
- Heaton, T. J., E. Bard, C. Bronk Ramsey, **M. Butzin, P. Köhler**, R. Muscheler, P. J. Reimer, L. Wacker (2021). Radiocarbon: a key tracer for studying the Earth’s dynamo, climate system and carbon cycle and Sun, *Science*, 374, eabd7096, <https://doi.org/10.1126/science.abd7096>.
- Heaton, T. J., E. Bard, C. Bronk Ramsey, **M. Butzin**, C. Hatté, K. A. Hughen, **P. Köhler**, P. J. Reimer (2023a). A response to community questions on the Marine20 radiocarbon age calibration curve: marine reservoir ages and the calibration of <sup>14</sup>C samples from the oceans, *Radiocarbon*, 65, 247–273, <https://doi.org/10.1017/RDC.2022.66>.
- Heaton, T.J., **M. Butzin**, E. Bard, C. Bronk Ramsey, K.A. Hughen, **P. Köhler**, P.J. Reimer (2023b). Marine Radiocarbon Calibration in Polar Regions: A Simple Approximate Approach using Marine20, *Radiocarbon*, 65, 848–875, <https://doi.org/10.1017/RDC.2023.42>.
- Köhler, P.**, F. Adolphi, **M. Butzin**, R. Muscheler (2022). Toward reconciling radiocarbon production rates with carbon cycle changes of the last 55,000 years, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 37, e2021PA004314, <https://doi.org/10.1029/2021PA004314>.
- Lohmann, G., **M. Butzin**, N. Eissner, X. Shi, C. Stepanek (2020), Abrupt Climate and Weather Changes Across Time Scales, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35, e2019PA003782, <https://doi.org/10.1029/2019PA003782>.
- Raddatz, J., Beisel, E., **Butzin, M.**, Schröder-Ritzrau, A., Betzler, C., Friedrich, R., Frank, N. (2023). Variable ventilation ages in the equatorial Indian Ocean thermocline

during the LGM, Scientific Reports 13, 11355, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38388-z>.

Ruben, M., Hefter, J., Schubotz, F., Geibert, W., **Butzin, M.**, Gentz, T., Grotheer, H., Forwick, M., Szczuciński, W., Mollenhauer, G., (2023). Fossil organic carbon utilization in marine Arctic fjord sediments by subsurface micro-organisms, Nature Geoscience 16, 625–630, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01198-z>.

**Ye, Y.**, Munhoven, G., **Köhler, P.**, **Butzin, M.**, Hauck, J., Gürses, Ö., and **Völker, C.**, (2023). FESOM2.1-REcoM3-MEDUSA2: an ocean-sea ice-biogeochemistry model coupled to a sediment model, Geoscientific Model Development Discussions. <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-181>, in review.

Aus dem Projekt hat sich des weiteren eine Masterarbeit ergeben, die von einem der PIs des Projektes betreut wurde:

Yaw Frimpong Sarpong: Using natural radiocarbon to constrain modeled water mass ages in the deep Pacific for preindustrial and last glacial maximum time slices. Master Thesis, März 2020, Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik), Universität Bremen.

Weitere, geplante Veröffentlichungen, die in PALMOD Phase III fertiggestellt, und dann unter der neuen Fördernummer veröffentlicht werden:

Du, J., **Ye, Y.**, Zhang, X., **Völker, C.**, Tian, J.,: Glacial biological pump and the Silicic Acid Leakage Hypothesis. In preparation.

Liu, B., Ilyina, T., Brovkin, V., Willeit, M., **Ye, Y.**, **Völker, C.**, **Köhler, P.**, Heinemann, M., Kurahashi-Nakamura, T., Paul, A., Schulz, M., Merkel, U., and Lhardy, F.: Constraining glacial ocean carbon cycle – A multi-model study. In preparation.

**Ye, Y.**, **Köhler, P.**, **Butzin, M.**, **Völker, C.**: No Silicic Acid Leakage During the Last Glacial Maximum: A model study. In preparation

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

- IntCal Working Group Meeting, Zürich, Switzerland, 10 September 2022
- 24rd International Radiocarbon Conference, Zürich, Switzerland, 11-16 September 2022
- EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021: **Butzin, M.**, D. Sidorenko, P., Köhler (2021), A multi-resolution ocean simulation of the anthropogenic radiocarbon transient, EGU21-3118, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3118>, 2021.

- EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023: **Butzin, M., Köhler, P., Völker, C., Ye, Y.**, and Lohmann, G.: How accurate are marine  $\Delta^{14}\text{CDIC}$  modelling approaches?, , EGU23-1481, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1481>, 2023.
- EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024: Liu, B., Ilyina, T., Brovkin, V., Willeit, M., **Ye, Y., Völker, C., Köhler, P.**, Heinemann, M., Kurahashi-Nakamura, T., Paul, A., Schulz, M., Merkel, U., and Lhardy, F.: Constraining glacial ocean carbon cycle – A multi-model study, , EGU24-17501, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-17501>, 2024.