Abschlussbericht
Förderkennzeichen 01LP1915B

Verbundthema: Deglaziation und Zukunft	*Förderkennzeichen:* 01LP1915B
Vorhabenbezeichnung: PalMod II-WP1-1-TP2: Deglaziation und Zukunft (Simulationen mit CESM)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2020 - 29.02.2024	
Berichtszeitraum: 01.03.2020 - 29.02.2024	
Zuwendungsempfänger: Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen	
Ansprechperson: Dr. Matthias Prange, Tel. +49 421 21865430 (mprange@marum.de)	

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung / Ziel des Projekts

Das Hauptziel des Vorhabens war die Untersuchung der physikalischen Prozesse, die zu den besonderen Klimaschwankungen während der letzten Deglaziation nach dem Ende des letzten Hochglazials vor 21.000 Jahren geführt haben. Zu diesen Klimaschwankungen, die auf einer Zeitskala von Jahrtausenden stattfanden, zählen insbesondere das Heinrich-Stadial 1 (HS1), das Bölling-Alleröd-Interstadial (B/A), sowie das Jüngere-Dryas-Stadial. Diese Klimaoszillationen hingen zusammen mit Schwankungen in der atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation (AMOC), weshalb ein besseres Verständnis dieser Klimaschwankungen auch zu einem besseren Verständnis des zukünftigen AMOC-Verhaltens führen kann. Neben der deglazialen Klimadynamik sollte auch das Verhalten und die Rolle der Eisschilde untersucht werden. Hierzu wurde das komplexe Erdsystemmodel CESM1.2 (Community Earth System Model version 1.2) zusammen mit dem Eisschildmodell PISM verwendet. Die Kopplung der Modellsysteme zu CESM-PISM fand bereits in PalMod Phase 1 statt.

Federal Ministry of Education and Research
DLR Project Management Agency
FONA Research for sustainability

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

An der Universität Bremen / MARUM standen für die Durchführung des Teilvorhabens WP1-1-TP2 weder Mittel noch Personal zur Verfügung. Daher wurde eine volle Wissenschaftlerstelle geschaffen, die zu 100% vom BMBF finanziert wurde. Die Stelle des Wissenschaftlichen Mitarbeiters im Teilvorhaben konnte zunächst mit Dr. Sebastian Beyer besetzt werden, der später das Projekt verließ und durch Dr. Tamas Kovács ersetzt werden konnte. Unter anderem aufgrund von Verzögerungen bei der Stellenneubesetzung wurde das Vorhaben, das ursprünglich für eine Dauer von drei Jahren beantragt und bewilligt worden war, bis zum 29.02.2024 ausgabenneutral verlängert. Notwendige Dienstreisen wurden ebenfalls über die bewilligten Projektmittel finanziert. Die Bereitstellung von Hard- und Software erfolgte durch die Universität Bremen. Die aufwändigen Modellrechnungen wurden mithilfe des Höchstleistungsrechners des HLRN (Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen) durchgeführt. Während der Projektbearbeitung konnten wir auf das umfangreiche Fachwissen im Bereich der Erdsystemmodellierung am MARUM sowie in der Fachabteilung Geosystem-Modellierung des Fachbereichs Geowissenschaften (Universität Bremen) zurückgreifen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das hier dargestellte Teilvorhaben gehörte zum Verbund WP1.1 „Deglaziation und Zukunft“ in PalMod II. Schwerpunkt war in diesem Teilprojekt die Untersuchung der speziellen Klimavariabilität nach dem Letzten Glazialen Maximum (LGM) während der Deglaziation und deren Bedeutung für zukünftige Klimainstabilitäten. Die Deglaziation ist insbesondere durch Schwankungen auf der Jahrtausendskala gekennzeichnet. Hierbei treten besonders das HS1, das B/A sowie die Jüngere Dryas hervor. Die damit verbundenen Klimaschwankungen hängen mit Veränderungen bzw. Instabilitäten der AMOC zusammen. Zudem sollten die physikalischen Mechanismen, die zu solchen Instabilitäten führen können, untersucht und der potentielle Zusammenhang mit Änderungen in den Eisschilden analysiert werden. Ferner sollte die Rolle von Randbedingungen wie Treibhausgaskonzentrationen und Erdorbitalparameter auf die Klimastabilität näher untersucht werden. Hierzu wurde das Klimamodell CESM1.2 und das Eisschildmodell PISM (anfangs auch SICOPOLIS) verwendet. CESM1.2 beinhaltet

die Komponenten Atmosphäre, Ozean, Land und Meereis. Die räumliche Auflösung der Modellkomponenten beträgt dabei 2° für das Atmosphären- und Landmodellgitter, ca. 1° für das Ozean- und Meereismodellgitter. Das Atmosphärenmodell verwendet 30 und das Ozeanmodell 60 Schichten in der Vertikalen. Das Eisschildmodell wurde mit einer räumlichen Auflösung von 20 km betrieben. Eine besondere Herausforderung in diesem Projekt war es, die Parameterräume zu erkunden, in denen die AMOC besondere Instabilitäten und sogar spontane Oszillationen zeigt. Zudem mussten in Zusammenarbeit mit WP1.2 die Parameterräume untersucht werden, in denen die Eisschildkomponente (PISM) spontante Oszillationen (Heinrich-Ereignisse) reproduziert. Hierzu mussten zunächst geeignete Sensitivitätsexperimente definiert und die entscheidenden Modellparameter identifiziert werden, bevor weitergehende Analysen durchgeführt werden konnten (s.u., II.1 Eingehende Darstellung).

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Erst in den letzten Jahren haben Höchstleistungsrechner ein Niveau erreicht, das für die Durchführung Jahrtausende langer Simulationen mit komplexen Erdsystemmodellen ausreicht. Daher war zu Beginn des Projekts unklar, ob das Klimamodell CESM1.2 nichtlineares Verhalten in der AMOC-Stabilität zeigt und spontane Klimasoszillationen auf der Jahrhundert- bis Jahrtausendzeitskala simulieren kann. Ähnliches galt für die Simulation von Heinrich-Ereignissen mit dem PISM-Eisschildmodell. Dies galt daher von vornherein als eine der besonderen Herausforderungen im gesamten PalMod-Projekt. Unsere erfolgreichen Simulationen von AMOC-Oszillationen und nichtlinearem Stabilitätsverhalten (z.B. Bistabilität der AMOC) liefern daher neue Einblicke in wichtige Wechselwirkungsprozesse im Erdsystem und zeigen auf, welche Wechselwirkungen Klimavariabilität auf der Jahrtausendskala auslösen können und welche Randbedingungen hierzu nötig sind.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojektes fand ein fortlaufender Austausch mit den PalMod-Projektpartnern in Hamburg (MPI-M), Bremerhaven (AWI) und Potsdam (PIK) statt. Wesentlich war auch die technische Unterstützung durch den HLRN (Norddeutscher

Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen), auf dessen Höchstleistungsrechner das gekoppelte Modell implementiert wurde.

6. Aufzählung der wichtigsten Projektergebnisse

Stabilitätseigenschaften der AMOC unter deglazialen Randbedingungen wurden detailliert untersucht unter Verwendung des Erdsystemmodells CESM. Ein zentrales Ergebnis war das Auffinden von spontanten AMOC-Oszillationen unter spezifischen Randbedingungen sowie multiple Stabilität. Im Rahmen eines PalMod-Modellvergleichs hat sich gezeigt, dass die in PalMod verwendeten Erdsystemmodelle verschiedenes AMOC-Stabilitätsverhalten unter deglazialen Randbedingungen zeigen, und unter den komplexen Modellen (MPI-ESM, AWI-ESM, CESM) als einziges CESM Bistabilität reproduziert. Im PISM konnten optimale Parameterisierungen identifiziert werden, unter denen beschleunigte Eisvorstöße bzw. Heinrich-Ereignisse auftreten.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde hauptsächlich für die Personalausgaben verwendet. Darüber hinaus wurde ein Teil für Reisekosten aufgewendet, die für die Teilnahme an Konferenzen, den Jahrestreffen des PalMod-Projekts sowie Projekttreffen zwischen den Partnern des Verbundprojekts notwendig waren. Coronabedingt musste die Reisetätigkeit jedoch massiv eingeschränkt werden, so dass nur ein Bruchteil der bewilligten Reisemittel verwendet wurde, da die meisten Tagungen und Arbeitstreffen lediglich online stattfanden.

Eisschild-Klima-Wechselwirkungen. Aufbauend auf den in PalMod Phase 1 durchgeführten Simulationen, die auf einer Vorgängerversion des HLRN-Supercomputers gerechnet wurden, mussten zunächst neue Testläufe mit CESM1.2 durchgeführt werden, die als Basis für weitere Zeitscheiben- und Sensitivitätsexperimente in WG1 dienten. Dabei wurde insbesondere das Modell durch Implementierung der neueren Atmosphärenkomponente CAM5 (in Phase 1 wurde CAM4 verwendet) aktualisiert und signifikant verbessert. Parallel hierzu fand eine Verbesserung des Parameter-Tunings im Eisschild-Modell statt, insbesondere

mit Blick auf die Eisschild-Oberflächenmassenbilanz sowie submariner Schmelzparametrisierungen; hierzu wurden u.a. Testsimulationen mit der am PIK entwickelten Modellkomponente PICO (Potsdam Ice-Shelf Cavity model) durchgeführt. Im Anschluss daran wurde ein neues Setup für die Südhalbkugel aufgesetzt und getestet und eine Spinup-Prozedur für den antarktischen Eisschild für das LGM im gekoppelten Eisschild-Klima-Modell zur Initialisierung transienter Deglaziationsläufe entwickelt und durchgeführt. Dabei konnte ein glazialer antarktischer Eisschild simuliert werden, der in Übereinstimmung mit Rekonstruktionen fast bis zur kontinentalen Schelfkante expandiert. Teile des inneren Eisschildes erfuhren eine Höhenreduktion im Vergleich zur heutigen Konfiguration von bis zu ~300 m. Diese Höhenreduktion lässt sich durch verringerte Niederschläge über der zentralen Antarktis im kalten LGM-Klima erklären. Trotz der partiellen Höhenreduktion nimmt das antarktische Eisvolumen aufgrund der lateralen Expansion im Vergleich zu heute zu, so dass der glaziale antarktische Eisschild ein Meeresspiegeläquivalent von zusätzlichen 9 m an Wasser speichert (**D1.1-1**).

In der gekoppelten Klima-Eisschild-Simulation wurden ferner ozeanographische Prozesse, die durch den simulierten antarktischen Eisschild beeinflusst werden können, wie die Bildung von Antarktischen Bodenwasser, untersucht. Dabei zeigte sich, dass das gekoppelte Modell unter LGM-Bedingungen Bodenwasser mit hohem Salzgehalt produziert, was zu einer starken Schichtung des glazialen Ozeans führt. Es wird vermutet, dass diese Schichtung für die AMOC-Stabilität während der Deglaziation von großer Bedeutung sein könnte (**M1.1-3**).

In einem nächsten Schritt wurde der Parameterraum untersucht, in dem PISM beschleunigte Eisvorstöße (sog. Heinrich-Ereignisse) simuliert. Während solcher Ereignisse werden große Mengen Eis in den Ozean transportiert, wo das zusätzliche Süßwasser die Tiefenwasserbildung und somit die AMOC beeinträchtigen kann. Sie sind Bestandteil eines der wichtigsten Mechanismen für abrupte Klimaveränderungen während der letzten Deglaziation. Wir konnten ein Modellsetup erstellen, welches eine periodische Desintegration des Laurentischen Eisschilds zeigt (Abb. 1). Die wachsende Eisauflast kann ab einem kritischen Punkt nicht mehr durch die basale Reibung aufgehalten werden und der Eisfluss beschleunigt sich, welches eine positive Rückkopplung zur Folge hat („creep instability“, höhere Eistemperatur und mehr basales Wasser im Sediment führt zu höherer Eisgeschwindigkeit und Deformation, welches wiederum die Temperatur und Wasser

erhöht). Erst wenn das Eis so dünn ist, dass die kalte Atmosphäre weiteres basales Schmelzen verhindert, wird das Eis abgebremst und der Eisschild kann wieder wachsen. Es handelt sich also um interne Oszillationen, welche unabhängig von externem Klimaforcing auftreten („Binge-Purge“-Modell). Es wurden ferner Sensitivitätsexperimente mit unterschiedlichen Bedingungen für basales Gleiten, Temperaturforcings und Parametern für die Eisdynamik auf einer idealisierten Geometrie, wie auch für ein Nordhemisphären-Setup durchgeführt. Diese Experimente zeigten, dass die Oszillationen nur auftreten, wenn ein großer örtlicher Kontrast in der basalen Reibung vorhanden ist. Wir erreichten dieses, indem wir einen Sedimentmächtigkeitsdatensatz nach Laske and Masters (1997) verwendeten, um die basale Reibung lokal zu verringern. Die Oszillationen treten mit einer Frequenz von ca. 6000 bis 7000 Jahren auf, abhängig vom verwendeten Forcing (**M1.1-1**).

Basierend auf dem Parameter-Tuning für die Heinrich-Ereignisse wurde ein neuer Ansatz für den Eisschild-Spinup für voll gekoppelte Klima-Eisschild-Experimente entwickelt. Dieser verwendet neben den optimierten Modellparametern die Glacial-Index-Methode, um die Temperaturhistorie des Eises seit dem letzten Interglazial zu berücksichtigen. Die Implementierung der Glacial-Index-Methode wurde verbessert und beinhaltet nun auch die Änderungen des Ozeans.

Damit wurden weitere Sensitivitätsexperimente mit unterschiedlichen Bedingungen für basales Gleiten, Temperaturforcings und Parametern durchgeführt. Insbesondere wurden Simulationen über den gesamten letzten Eiszeitzyklus bis zur Deglaziation unter Verwendung eines aus unseren CESM-Simulationen gewonnenen Klimaantriebs durchgeführt. Dabei konnte das neu-kalibrierte Eisschild-Modell im Verlauf der Eiszeit zahlreiche Heinrich-Ereignisse simulieren (Abb. 2). Starke Heinrich-Ereignisse sind dabei mit abrupten Meeresspiegeländerungen von mehreren Zehnermetern verbunden (**M1.1-1, D1.1-2**).

Untersuchung der Stabilitätseigenschaften der deglazialen AMOC. In Zusammenarbeit mit PalMod-Partnern wurde ein Protokoll für einen Satz von Experimenten erstellt, um die Stabilität der deglazialen AMOC und ihre Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Randbedingungen (Treibhausgas-Konzentrationen, Orbitalparameter, Eisschildtopographie) zu untersuchen. Als Vorstufe zu transienten Simulationen wurden Zeitscheibenexperimente mit vorgeschriebenen Eisschilden durchgeführt. Mit CESM wurden dabei Experimente

unter (i) vollen 15,2 ka (ka = 1000 Jahre vor heute) Randbedingungen, (ii) 15,2 ka Randbedingungen, aber mit LGM (21 ka) Treibhausgaskonzentrationen und (iii) LGM-Randbedingungen, aber mit 15,2 ka Eisschilden durchgeführt. Interessanterweise zeigt das Modell AMOC-Oszillationen auf der Jahrtausendskala, wenn 15,2 ka-Eisschilde implementiert werden, was ein hochdynamisches AMOC-Verhalten für die Deglaziation erwarten lässt (Abb. 3). Diese Ergebnisse unterscheiden sich von früheren CESM-Simulationen aus PalMod Phase 1, in denen CAM4, der Vorgänger von CAM5, als atmosphärische Komponente verwendet wurde und in denen daher AMOC-Oszillationen auf der Jahrtausendskala nicht simuliert wurden.

Die Untersuchungen zu Stabilitätseigenschaften der deglazialen AMOC wurden wie folgt fortgeführt. Nach Modell-Spinups von über 3000 Jahren wurde eine Reihe von Süßwasserstörexperimenten („freshwater hosing experiments“) durchgeführt (mit einer Rate von 0,1 bzw. 0,2 Sv über 400 bzw. 700 Jahre), bei denen die AMOC durch Süßwassereintrag im sogenannten „Ruddiman-Belt“ im nördlichen Atlantik (40°N-55°N, 45°W-20°W) gestört wurde. Tabelle 1 liefert einen Überblick über die verschiedenen Modellexperimente. Abbildung 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der mittleren AMOC-Stromfunktion (Maximum bei 30° N) mit 20-jähriger Boxcar-Glättung, wobei nur die letzten 500 (1500) Jahre aller Spin-up-Experimente dargestellt sind und der Fokus auf den anschließenden gestörten („freshwater hosing“) Zeitabschnitten liegt (0,1 Sv und 0,2 Sv). Unabhängig von den AMOC-Ausgangszuständen, der Intensität des Süßwassereintrags und den Randbedingungen drei verschiedener Experimente schwächt sich die AMOC nach Süßwassereintrag abrupt und signifikant ab und endet in einem Intensitätsbereich zwischen 4,5-7 Sv. Darüber hinaus wurden im Experiment "LGM + 15,2 ka Eisschildtopographie", das ein Dansgaard-Oeschger (DO)-ähnliches oszillatorisches Verhalten zeigt, zwei unterschiedliche Süßwasserstörexperimente durchgeführt, jeweils ausgehend vom Maximal- und Minimalwert der AMOC. Unabhängig vom Anfangszustand schwächt sich die AMOC gleichermaßen ab und erreicht denselben Intensitätsbereich (4,5-7 Sv). Experiment "15,2 ka" zeigt hingegen eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegenüber 0,1 Sv-Einträgen (**M1.1-1, D1.1-2**).

Mehrere andere Experimente wurden gestartet, bei denen die Empfindlichkeit der AMOC hinsichtlich der Änderung verschiedener Parameter untersucht wurde. Zudem wurden Experimente fortgeführt, in denen die Süßwasserstörungen wieder

gestoppt wurden (Abb. 5). Nach einem abrupten "Überschießen" („overshoot“) wurde dabei eine Rückkehr zum ursprünglichen AMOC-Zustand beobachtet. Dies ist besonders für das Experiment "LGM + 15,2 ka Eisschildtopographie" interessant, das eine oszillierende AMOC zeigt, auch nach Abschalten der Süßwasserstörung.

Weitere Untersuchungen haben die Existenz eines bistabilen AMOC-Regimes offenbart unter 15,2 ka Randbedingungen und konstantem 0,1 Sv-Eintrag. Dabei zeigte sich, dass sowohl ein starker als auch ein schwacher AMOC-Zustand stabil sind. In den schwachen Zustand gelangt man, indem man zuvor LGM-Treibhausgase ansetzt und diese anschließend auf 15,2 ka-Werte erhöht. Dieses Ergebnis hat erhebliche Implikationen für das Verständnis des Ablaufs der letzten Deglaziation, da die Reihenfolge von Ereignissen (d.h. anomale Schmelzwassereinträge in den Nordatlantik *vor* Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen) ausschlaggebend für das transiente Verhalten der AMOC war (**M1.1-2**).

Ferner wurden unter LGM-Randbedingungen AMOC-Oszillationen auf einer Zeitskala von mehreren Jahrhunderten entdeckt und eingehend untersucht. Die Ergebnisse wurden in *Science Advances* publiziert (Prange et al., 2023). Diese Ergebnisse sind von hoher Relevanz, da Paläoklima-Proxy-Aufzeichnungen aus der nordatlantischen Region eine wesentlich höhere Temperaturvariabilität während des LGM im Vergleich zum aktuellen Interglazial zeigen. Da es keine offensichtlichen Veränderungen bei den externen Einflüssen gab, sind die Ursachen für die erhöhte Variabilität bislang unbekannt. Auf der Grundlage von LGM-Simulationen mit CESM und hochauflösenden Proxy-Aufzeichnungen konnten wir einen oszillatorischen Klimamodus auf der Multijahrhundertskala identifizieren, der mit moderaten Schwankungen in der AMOC einhergeht und von der großräumigen Salzverteilung abhängt. Diese sich selbst erhaltende Klimaoszillation wird durch Rückkopplungen mit dem Meereis verstärkt und führt zu einer maximalen Variabilität der Oberflächentemperatur im subpolaren Nordatlantik. Die gefundene Oszillation, die sich durch eine andere klimatische Prägung und eine andere Dynamik auszeichnet, muss von der Dansgaard-Oeschger-Variabilität unterschieden werden und tritt nur unter vollen LGM-Bedingungen auf. Das Potenzial solcher Klimaschwankungen, als Reaktion auf veränderte klimatische Einflüsse aufzutauchen oder zu verschwinden, könnte Auswirkungen auf den zukünftigen Klimawandel haben (**M1.1-3, D1.1-3**).

Um den Mechanismus hinter der simulierten AMOC-Variabilität quantitativ zu erklären, haben wir schließlich eine überwachte ML (Machine Learning) Methode zur „Kausalentdeckung“ eingesetzt. Diese Methode analysiert Zeitreihen von Variablen, die stellvertretend für physikalische Prozesse stehen, die möglicherweise die AMOC-Schwingung antreiben, und identifiziert kausale Verbindungen zwischen ihnen. Der hier verwendete PCMCI-Kausalerkennungsrahmen basiert auf einer Kombination aus dem PC-Algorithmus, um kausale Beziehungen zwischen Akteuren und ihren Zeitverzögerungen mithilfe von partiellen Korrelationen zu finden, und dem Momentary Conditional Independence Test, um die Stärke der kausalen Verbindungen zu quantifizieren (**M1.1-2**).

Aufgrund von personalbedingten Verzögerungen (siehe III.6) konnten bis Projektende noch nicht alle geplanten Simulationen vollständig abgeschlossen werden. Dies betrifft vor allem Meilenstein **M1.1-4** (Deglacial mechanisms using insolation as a single forcing) sowie Deliverable **D1.1-4** (Stability analysis of future climate changes with interactive ice sheet). Die Durchführung von PalMod Phase 3 ist hiervon nicht betroffen.

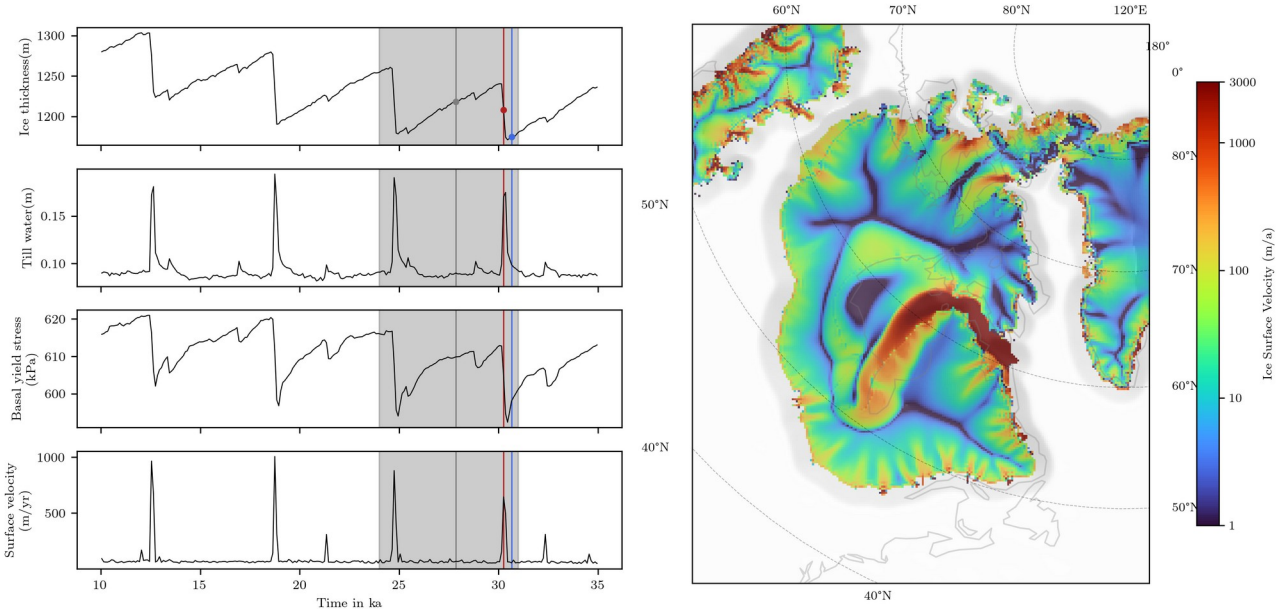

Abbildung 1. Beschleunigte Eisvorstöße (Heinrich-Ereignisse) während der letzten Eiszeit. (links) Zeitreihe der charakterisierenden Variablen für den internen Feedbackmechanismus (jeweils über den gegründeten Bereich des Laurentischen Eisschildes gemittelt): Eisdicke, Wasserschichtmächtigkeit im basalen Till, basale Spannung und Oberflächengeschwindigkeit. Die verschiedenen Phasen (buildup, surge, stabilization) sind farblich gekennzeichnet (grau, rot, blau). (rechts) Eisoberflächengeschwindigkeit während der Surge Phase.

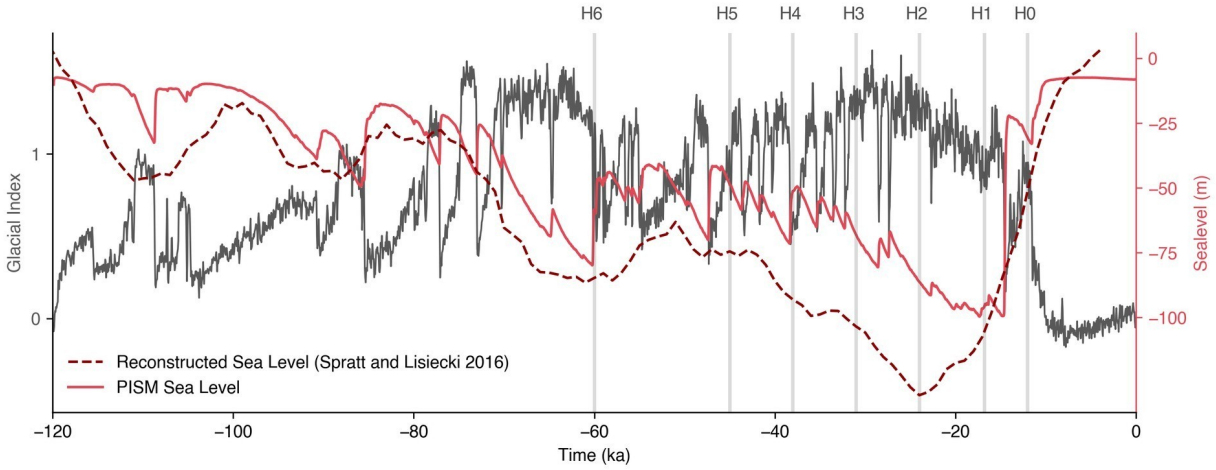

Abbildung 2. Simulation des letzten Eiszeitzyklus einschließlich Deglaziation mit dem verbessertem PISM-Setup. Die durchgezogene rote Kurve zeigt den simulierten globalen Meeresspiegel. Verschiedene abrupte Änderungen teils verbunden mit Heinrich-Ereignissen sind zu erkennen. Die gestrichelte dunkelrote Kurve zeigt einen rekonstruierten Meeresspiegelverlauf (die zeitliche Auflösung erlaubt keine Identifizierung von Heinrich-Ereignissen). Die schwarze Kurve zeigt das Glacial-Index-Klimaforcing.

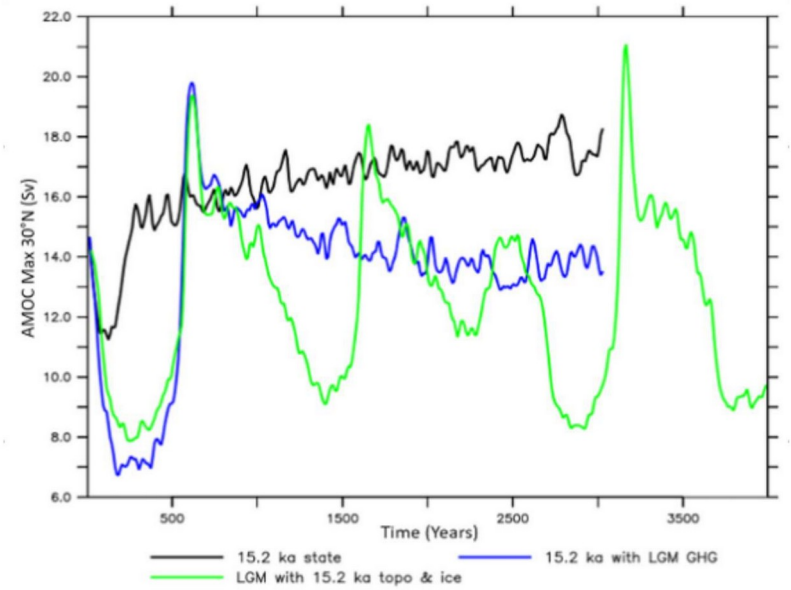

Abbildung 3. Zeitliche Entwicklung der mittleren Eulerschen AMOC-Stromfunktion (Maximum bei 30° N) mit 20-jähriger Boxcar-Glättung in drei CESM-Sensitivitätsexperimenten, die alle 15,2 ka Eisschildkonfigurationen, aber unterschiedliche Treibhausgaskonzentrationen und Orbitalantriebe beinhalten.

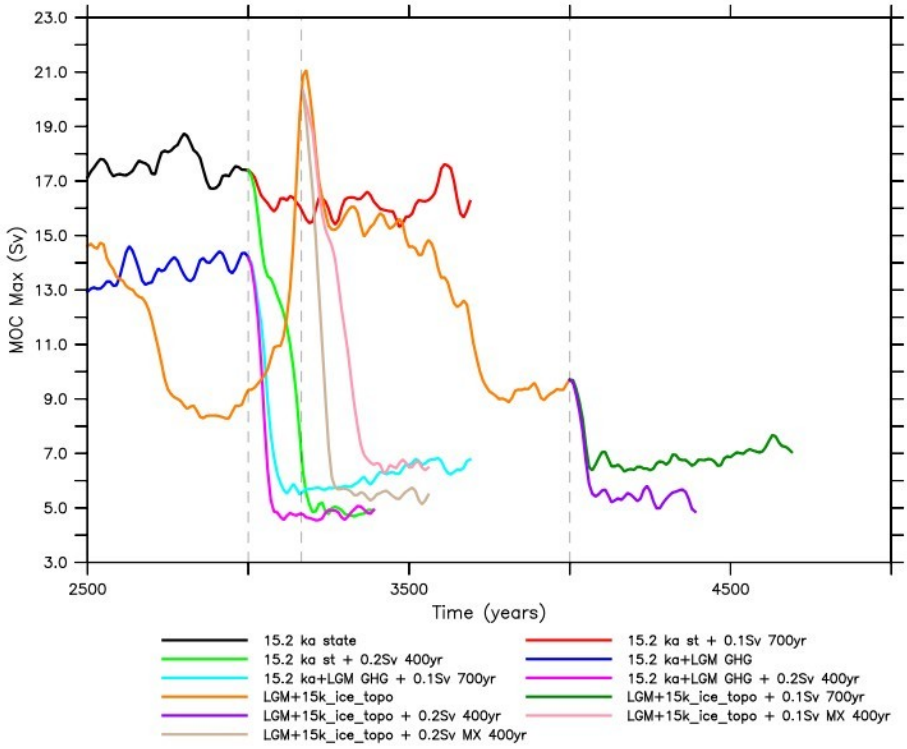

Abbildung 4. Zeitliche Entwicklung der mittleren AMOC-Stromfunktion (Maximum bei 30° N) mit 20-jähriger Boxcar-Glättung, Spin-up-Experimente ("15.2 ka state", "15.2 ka with LGM GHG" und "LGM with 15.2 ka ice sheet topography") fortgesetzt mit verschiedenen Süßwasserstörungen (0.1 Sv und 0.2 Sv) mit Süßwassereintrag im nördlichen Atlantik (40°N-55°N, 45°W-20°W).

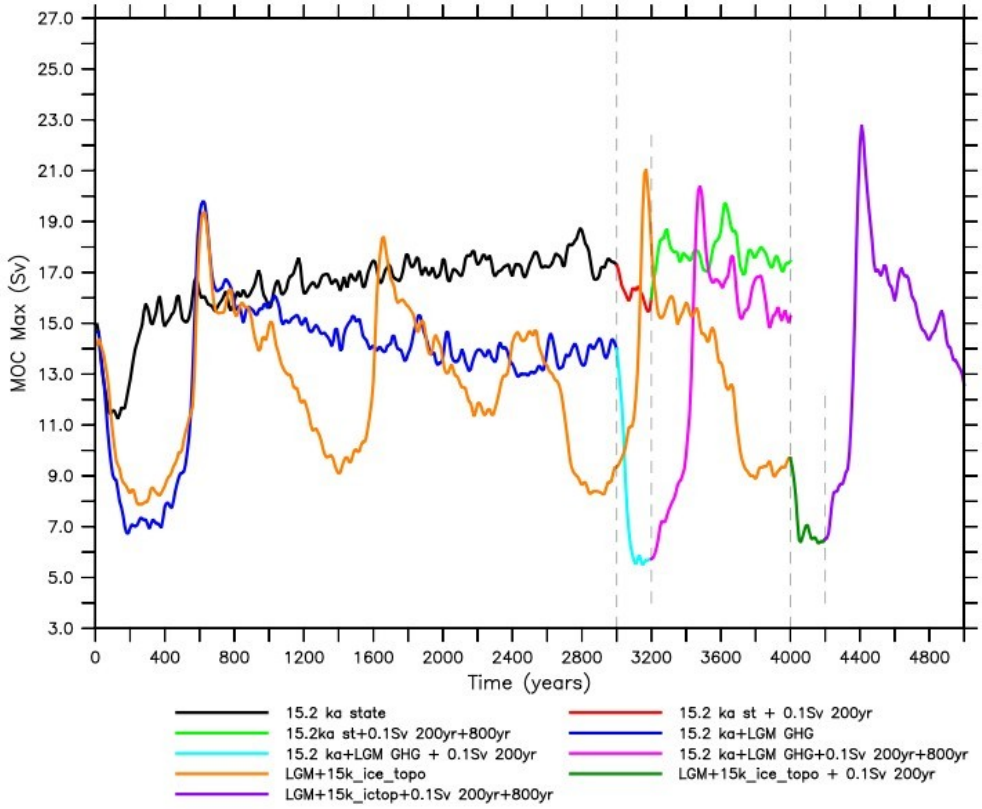

Abbildung 5. Wie Abbildung 4 aber mit AMOC-Erholungsphase nach Abschalten der Süßwassereinträge.

Experiment	Orbital-Parameter	Treibhaus-Gase	Eisschild-Topographie	Dauer Spin-up (Jahre)	+ 0.1 Sv Störung	+ 0.2 Sv Störung
15.2 ka	15.2 ka	15.2 ka	15.2 ka	3000	700	400
15.2 ka mit LGM Treibhausgasen	15.2 ka	21 ka	15.2 ka	3000	700	400
LGM mit 15 ka Eisschild	21 ka	21 ka	15.2 ka	4000	700	400

Tabelle 1. Überblick über CESM-Experimente.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben wurden ausschließlich für Personal und Reisen (Projekttreffen, Konferenzen) aufgewendet. Der größte Teil der Kosten entfiel auf Personalausgaben. Ein geringerer Teil wurde für Reisekosten aufgewendet, die für die Teilnahme an den Jahrestreffen des PalMod-Projekts (2020 und 2021 nur Online-Treffen wegen Corona) sowie den regelmäßigen Projekttreffen zwischen den Partnern des Verbundprojekts notwendig waren. Detaillierte Angaben sind dem zahlenmäßigen Nachweis durch die Verwaltung der Universität Bremen zu entnehmen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren in vollem Umfang notwendig und stets an den Zielen des Forschungsvorhabens orientiert. Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse wären ohne die Förderung durch das BMBF nicht erreichbar gewesen. Die Projektmittel wurden ausschließlich für die im Projektantrag vorgesehenen bzw. in den Einzelberichten genannten Arbeiten verwendet. Zusätzliche Projektmittel wurden nicht benötigt.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse wurden und werden in internationalen Fachzeitschriften publiziert und somit interessierten Wissenschaftlern weltweit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse des Projektes tragen zum weiteren Verständnis der globalen Klimavariabilität und der wichtigen Rolle der Eisschilde im Erdsystem im Rahmen des Klimawandels bei. Darüber hinaus bilden die gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Grundlage für die Phase 3 des PalMod-Projekts.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Simulation von tieffrequenten AMOC-Oszillationen in komplexen Erdsystemmodellen ist mittlerweile von höchstem Interesse in der wissenschaftlichen Paläoklima-Community. Daher wurde von einer internationalen Gruppe ein Protokoll zur Simulationen von DO-Ereignissen im MIS 3 erarbeitet und

publiziert unter Beteiligung des MARUM PalMod-Teams (Malmierca-Vallet et al., 2023).

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Malmierca-Vallet, I., L. C. Sime, and the D-O community members (incl. **U. Merkel**, **M. Prange**), 2023: Dansgaard-Oeschger events in climate models: review and baseline Marine Isotope Stage 3 (MIS3) protocol. Climate of the Past, 19, 915-942, doi:10.5194/cp-19-915-2023.

Prange, M., L. Jonkers, **U. Merkel**, **M. Schulz**, and P. Bakker, 2023: A multicentennial mode of North Atlantic climate variability throughout the Last Glacial Maximum. Science Advances, 9, eadh1106, doi:10.1126/sciadv.adh1106.

Publikationen mit Projektbezug:

Ronge, T. A., **M. Prange**, G. Mollenhauer, M. Ellinghausen, G. Kuhn, and R. Tiedemann, 2020: Radiocarbon evidence for the contribution of the Southern Indian Ocean to the evolution of atmospheric CO_2 over the last 32,000 years. Paleoceanography and Paleoclimatology, 35, e2019PA003733, doi:10.1029/2019PA003733.

Chiessi, C. M., S. Mulitza, N. K. Taniguchi, **M. Prange**, M. C. Campos, C. Häggi, E. Schefuß, T. M. L. Pinho, T. Frederichs, R. C. Portilho-Ramos, S. H. M. Sousa, S. Crivellari, F. W. Cruz, 2021: Mid- to late Holocene contraction of the Intertropical Convergence Zone over northeastern South America. Paleoceanography and Paleoclimatology, 36, e2020PA003936, doi:10.1029/2020PA003936.

Maksic, J., M. H. Shimizu, M. T. Kayano, C. M. Chiessi, **M. Prange**, and G. Sampaio, 2022: Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on South American atmosphere dynamics and precipitation. Atmosphere, 13, 1778, doi:10.3390/atmos13111778.

Geplante Veröffentlichungen in begutachteten Fachzeitschriften:

Kovács, T., E. Galytska, **M. Prange**, and **M. Schulz**: Causal drivers of North Atlantic glacial climate variability. In Arbeit für Earth System Dynamics.

Kovács, T., **M. Prange**, Y. Chen, A. Ganopolski, T. Ilyina, C. Jalihal, M.-L. Kapsch, G. Knorr, P. Köhler, B. Liu, G. Lohmann, **U. Merkel**, U. Mikolajewicz, W. Park, C. Schannwell, X. Shi, P. Song, Z. Song, Y. Sun, C. Völker, M. Werner, M. Willeit, and Y. Ye: Atlantic meridional overturning during the Last Glacial Maximum: comparison of simulations for the PalMod project. In Arbeit für Climate of the Past.

Latinovic, D., T. Kovács, T., U. Merkel, and **M. Prange:** Stability of the Atlantic meridional overturning circulation during the last deglaciation. In Arbeit für Climate of the Past.

Die erzielten Ergebnisse wurden ferner im Rahmen von Vorträgen bzw. Posterpräsentationen auf folgenden Tagungen vorgestellt:

- PalMod-General-Assembly 2023 (27.-28.09.2023, Bremerhaven)
- EGU General Assembly 2023 (23.-28.04.2023, Wien)
- Eingeladener Vortrag beim 27. Annual CESM Workshop (15.06.2022, online)
- PalMod-General-Assembly 2022 (16.-17.05.2022, Travemünde)
- PalMod-General-Assembly 2021 (27.-28.05.2021, online)