



**PAL
MOD**

GERMAN
CLIMATE
MODELING
INITIATIVE

Abschlussbericht Förderkennzeichen 01LP1917C

<i>Verbundthema:</i> Einsetzen der letzten Eiszeit	<i>Förderkennzeichen:</i> 01LP1917C
<i>Vorhabenbezeichnung:</i> PalMod II-WP1-3-TP3: Einsetzen der letzten Eiszeit (Simulationen mit CESM)	
<i>Laufzeit des Vorhabens:</i> 01.05.2020 - 31.08.2023	
<i>Berichtszeitraum:</i> 01.05.2020 - 31.08.2023	

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung / Ziel des Projekts

Das Hauptziel des Vorhabens war die Untersuchung der physikalischen Prozesse, die zum Einsetzen der letzten Eiszeit vor circa 115 ka (1 ka = 1000 Jahre) im Marinen Isotopenstadium (MIS) 5 geführt haben. Für den Übergang vom letzten Interglazial in die Eiszeit sollten transiente Simulationen mit dem gekoppelten Klima-Eisschild-Modell CESM-PISM durchgeführt werden, um global wirksame Rückkoppelungsprozesse während der großräumigen Vergletscherung zu verstehen. Sensitivitätsexperimente sollten zudem die Rolle verschiedener Antriebsmechanismen (Erdorbitalparameter, Treibhausgase) für den Aufbau der Eisschilde untersuchen. Zudem sollte der Einfluss von Anfangsbedingungen im letzten Interglazial auf die Klima-Eisschild-Trajektorie analysiert werden. Die Modellergebnisse sollten anhand von Rekonstruktionen evaluiert und validiert werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

An der Universität Bremen standen für die Durchführung des Teilvorhabens WP1-3-TP3 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 mit Dr. Dragan Latinovic besetzt werden. Leider konnte Dr. Latinovic zum geplanten Projektbeginn am 01.05.2020 aufgrund des pandemiebedingten Einreiseverbots nicht nach Deutschland (aus Brasilien) einreisen, so dass die Projektarbeiten erst mit Verspätung zum 01.09.2020 beginnen konnten. Aufgrund der Verzögerungen bei der Stellenbesetzung wurde das Vorhaben bis zum 31.08.2023 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 WP1.3 „Einsetzen der letzten Eiszeit“ in PalMod II. Schwerpunkt war in diesem Teilprojekt die gekoppelte Klima-Eisschild-Modellierung mit dem Klimamodell CESM1.2 und dem Eisschildmodell PISM. CESM1.2 selbst 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 sowie 20 km für das Eisschildmodellgitter. Das Atmosphärenmodell verwendet 30 und das Ozeanmodell 60 Schichten in der Vertikalen.

Obwohl die Modellkomponenten samt interaktiver Kopplung bereits in der vorangegangenen Projektphase (PalMod I) eingerichtet worden waren, musste zunächst eine Neukalibrierung (Retuning) stattfinden. Dies lag insbesondere darin begründet, dass in PalMod II eine aktuellere Version der Atmosphärenkomponente verwendet werden sollte (CAM5.3 statt CAM4), was einen wesentlichen Einfluss auf das simulierte Klima hatte. Nach einer mehrmonatigen Einarbeitungszeit des Wissenschaftlichen Mitarbeiters Dr. Latinovic wurden deshalb zunächst ungekoppelte Klima-Zeitscheiben-Experimente mit CESM durchgeführt, wie in

Abschnitt II.1 (Eingehende Darstellung) ausführlich beschrieben. Im nächsten Schritt wurden aus den Ergebnissen der Klima-Zeitscheiben-Experimente Antriebsfelder für das Eisschild-Modell PISM errechnet, um in möglichst kurzer Zeit einen ersten Einblick in die Stärken und Schwächen des Klima- und Eisschild-Modells bei der Simulation des Einsetzens der letzten Eiszeit zu erhalten und eine neue Parameterkalibrierung durchzuführen. Im Anschluss daran wurden die rechenzeitintensiven gekoppelten Eisschild-Klima-Simulationen durchgeführt. Wie weiter unten in Abschnitt II.1 (Eingehende Darstellung) aufgeführt wird, waren jedoch auch im weiteren Projektverlauf mit dem gekoppelten Modell Neukalibrierungen und ungeplante Sensitivitätsstudien nötig, da der simulierte Eismassenaufbau insgesamt geringer war als geowissenschaftliche Rekonstruktionen nahelegen. Aufgrund dieser nicht vorhersehbaren Problematik und des entsprechend zusätzlichen Zeitaufwands konnten zum Projektende nicht alle geplanten transienten Simulationen vollständig abgeschlossen werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Erst in den letzten Jahren haben Höchstleistungsrechner ein Niveau erreicht, das für die Durchführung langfristiger transienter Simulationen mit komplexen Erdsystemmodellen ausreicht. Die Einbeziehung von Eisschildmodellen erhöht die Komplexität und den Rechenaufwand erheblich. Transiente Simulationen des Einsetzens der letzten Eiszeit mit hochkomplexen gekoppelten Klima-Eisschild-Modellen existierten vor Projektbeginn nicht. Auch nach Projektende sind die in PalMod II durchgeführten Simulationen mit einem solch komplexen Modell wie CESM-PISM unseres Wissens weltweit einzigartig. Diese Modellsimulationen liefern neue Einblicke in wichtige Wechselwirkungsprozesse im Erdsystem und zeigen auf, welche Wechselwirkungen Eisschilde in der Vergangenheit im Klimasystem auslösen können.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojekts fand ein fortlaufender Austausch mit den PalMod-Projektpartnern in Hamburg (MPI-M), Bremerhaven (AWI) und Potsdam (PIK) statt. Die technische Unterstützung seitens des HLRN (Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen), auf dessen Höchstleistungsrechner das gekoppelte Modell implementiert wurde, war ebenfalls von wesentlicher Bedeutung.

6. Aufzählung der wichtigsten Projektergebnisse

Das gekoppelte Klima-Eisschild-Modell CESM-PISM ist grundsätzlich in der Lage, ein Einsetzen der letzten Eiszeit mit dem Anwachsen von Eisschilden über Nordamerika und Eurasien zu simulieren. Es konnte gezeigt werden, dass geeignete Erdbahnparameter das Einsetzen der letzten Eiszeit steuern, während Veränderungen in Treibhausgaskonzentrationen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Ungenauigkeiten in der Simulation von Oberflächentemperaturen (sog. „temperature biases“) in hohen Breiten können jedoch in einigen Regionen zu einer Unterschätzung des modellierten Eisvolumenaufbaus führen.

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 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 (s.u.), da die meisten Tagungen und Arbeitstreffen lediglich online stattfanden.

Die Arbeiten konnten erst im September 2020 beginnen, da die Wissenschaftlerstelle für das Vorhaben coronabedingt mit Dr. Latinovic erst verspätet besetzt werden konnte. Zunächst musste sich Herr Latinovic in die Modellkomponenten einarbeiten. Anschließend wurden zunächst ungekoppelte Klima-Zeitscheiben-Experimente mit CESM durchgeführt. Dabei wurden Randbedingungen (Treibhausgase, Erdorbitalparameter) entsprechend der Phase des Einsetzens der letzten Eiszeit zu verschiedenen Zeitpunkten (116 ka, 112 ka und 108 ka vor heute) verwendet. Die heutige Landeiskonfiguration wurde hierbei vorgeschrieben. Im nächsten Schritt wurden aus den Ergebnissen der Klima-Zeitscheiben-Experimente zeitlich transiente Antriebsfelder für das Eisschild-Modell PISM errechnet. Anschließend wurde eine transiente Simulation der Eisschilde für den Zeitraum 116-108 ka durchgeführt. Ziel dieser Experimente war es, in möglichst kurzer Zeit einen ersten Einblick in die Stärken und Schwächen des Klima- und

Eisschild-Modells bei der Simulation des Einsetzens der letzten Eiszeit zu erhalten, um eine neue Parameterkalibrierung durchzuführen, bevor die rechenzeitintensiven gekoppelten Eisschild-Klima-Simulation gestartet wurden. Zudem kann der Vergleich der ungekoppelten Simulationen mit den gekoppelten (s.u.) wichtige Aufschlüsse über mögliche Rückkopplungs-Mechanismen liefern (**M1.3-4**).

Abb. 1 veranschaulicht Abweichungen der oberflächennahen Lufttemperaturen vom gegenwärtigen Klima für das Experiment 116 ka. Es ist deutlich erkennbar, dass es besonders in hohen nördlichen Breiten zu einer starken Abkühlung gekommen ist. Diese ausgeprägte Abkühlung während der Sommermonate verhindert die Schneeschmelze und ermöglicht somit den Aufbau von Eismassen. Abb. 2 zeigt Ergebnisse einer transienten PISM-Simulation, die mit CESM-Klimafeldern angetrieben wurde, zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Es ist deutlich erkennbar, wie sich Eismassen über Nordkanada und Nordsibirien um 114 ka aufbauen. Anschließend findet in einigen Regionen ein Rückgang der Eismassen bis 108 ka statt. Es konnte somit gezeigt werden, dass das Modell prinzipiell in der Lage ist, den Auf- und Abbau von Eisschildern und das Einsetzen der letzten Eiszeit zu simulieren.

Basierend auf den Ergebnissen der ungekoppelten Experimente wurden gekoppelte transiente CESM-PISM-Läufe aufgesetzt. Als sich zeitlich verändernde Randbedingungen wurden atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen (aus Eiskerndaten) und Erdorbitalparameter dem gekoppelten System vorgeschrieben. Zunächst musste jedoch ein Klimazustand zur Initialisierung der transienten Läufe erzeugt werden. Zur Initialisierung wurde die Zeitscheibe 123 ka ausgewählt, da sowohl unsere ersten Experimente als auch Rekonstruktionen zeigen, dass ein großskaliges Zunehmen der nordhemisphärischen Vergletscherungen erst hiernach stattfand. Zunächst wurde ein ungekoppeltes CESM-Klima für 123 ka berechnet, um anschließend im asynchron gekoppelten Klima-Eisschild-Modell den Spin-up fortzusetzen und schließlich ein Quasigleichgewicht des Klima-Eisschild-Zustandes für 123 ka zu erhalten. In diesem Zustand weist der grönländische Eisschild eine ähnliche Konfiguration wie heute auf. Im anschließenden transienten gekoppelten Lauf für den Zeitraum 123-110 ka wurde, geleitet von Ergebnissen der Verbundpartner vom PIK mit dem schnellen Erdsystemmodell CLIMBER-X, die Klimakomponente (CESM) um den Faktor 10 beschleunigt.

Abb. 3 zeigt die Zeitreihen einiger wichtiger integrierter Größen, wie sie von CESM-PISM für den Zeitraum 123-110 ka errechnet wurden. Die niedrigsten Sommertemperaturen in den hohen Breiten und die maximale Ausdehnung des Meereises werden um 116 ka vor heute erreicht. Das maximale Volumen der Eisschilde wird in der Simulation bei 112 ka festgestellt, bevor die zunehmende sommerliche Sonneneinstrahlung zu einer Reduzierung des Eisvolumens führt. Bei 112 ka verteilen sich die Eismassen über den Kanadisch-Arktischen Archipel, die Baffin-Insel, die Kara-Barents-See-Region und die ostsibirischen Inseln. Im Vergleich zu Rekonstruktionen wird der Eisaufbau in der Barents-Kara-See-Region im Modell unterschätzt und fehlt sogar in den Gebieten Quebec-Labrador, Keewatin und Skandinavien. Die simulierte Zunahme des Eises von 123 ka bis 112 ka entspricht einem Meeresspiegeläquivalent von etwa 7 Metern. Dieser Wert ist deutlich geringer als die von Rekonstruktionen vorgeschlagenen 10-60 Meter für denselben Zeitraum.

Trotz verschiedener Neukalibrierungen (Retuning) der Eismodellparameter konnte das Problem des geringen Eisaufbaus nicht behoben werden. Grund für den geringen Eisaufbau in einigen Regionen sind vielmehr Ungenauigkeiten in der Simulation des Oberflächentemperaturfeldes. Eine detaillierte Analyse ergab, dass die größten Abweichungen zwischen dem simulierten Eisaufbau und den Rekonstruktionen in Regionen auftreten, in denen signifikante Unterschiede zwischen den simulierten Oberflächentemperaturen des Kontrolllaufs (aktuelles Klima) und den Beobachtungen (Klimatologie) festgestellt wurden, was als "climate biases" bekannt ist. Ein Beispiel hierfür ist das östliche Kanada, wo das Modell zu hohe Sommertemperaturen simuliert, oder Sibirien, wo das Modell einen "cold bias" aufweist. Um dieses Problem weiter zu beleuchten und ggfs. zu beheben wurde eine Klimakorrektur („climate bias correction“) eingeführt. In dieser Korrektur werden simulierte Temperaturanomalien des Paläozustands gegenüber dem heutigen simulierten Klimazustand berechnet und auf ERA5-Reanalyse-Temperaturfelder addiert. Für Niederschlag wurde derselbe additive Ansatz gewählt sowie alternativ ein multiplikativer Ansatz. Es hat sich aber in weiteren Experimenten gezeigt, dass Niederschlagskorrekturen nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse haben, sondern vielmehr Temperaturkorrekturen ausschlaggebend sind. Gekoppelte beschleunigt-transiente Simulationen für das Zeitintervall 123-110 ka mit Temperaturkorrektur konnten somit einen Eisaufbau liefern, der besser mit

Rekonstruktionen übereinstimmt als die nicht-korrigierten Simulationen. Eine Darstellung der nordhemisphärischen Verteilung der Eismassen zum Zeitpunkt 112 ka vor heute, als das Eisvolumen sein vorläufiges Maximum erreichte, wird beispielhaft in Abb. 4 für eine korrigierte und eine nicht-korrigierte Simulation gezeigt. Im nicht-korrigierten Lauf (Abb. 4a) erstrecken sich die Eismassen über den Kanadisch-Arktischen Archipel, die Baffin-Insel, die Kara-Barentssee-Region und die ostsibirischen Inseln. Im Vergleich zu Rekonstruktionen zeigt das Modell eine Unterschätzung der Vereisung in der Barents-Kara-See-Region und fehlende Vergletscherung in den Gebieten Quebec-Labrador, Keewatin und Skandinavien. Im Lauf mit Bias-Korrektur (Abb. 4b) bleibt das gesamte Eisvolumen ähnlich, jedoch gibt es in bestimmten Regionen einige signifikante Unterschiede zum nicht-korrigierten Lauf. Insbesondere ist der Eisaufbau in der Region der ostsibirischen Inseln moderater. Zudem zeigt sich eine erste leichte Vergletscherung im nördlichen Quebec, was eine Verbesserung der Simulation darstellt. Im transienten Lauf mit Bias-Korrektur wurden dieselben Modellparameter wie im nicht-korrigierten Lauf verwendet. Daher wurde mit einer weiteren Neukalibrierung des Eisschild-Modells auf Basis des bias-korrigierten Klimas begonnen. Anschließend wurde ein beschleunigt-transienter, bias-korrigierter Lauf mit dem rekalierten Modell durchgeführt. Dabei wurde ein Meeresspiegelrückgang von ca. 12 Metern simuliert. Obwohl dieser Wert im Vergleich zu den in Rekonstruktionen vorgeschlagenen 10-60 Metern am unteren Rand der Abschätzungen liegt, ist er dennoch konsistent innerhalb der vorhandenen Unsicherheiten.

In weiteren beschleunigt-transienten Simulationen wurde der Einfluss von veränderten Anfangsbedingungen untersucht. Hierzu wurde der initiale grönländische Eisschild zum Zeitpunkt 123 ka leicht modifiziert, wobei ein verringertes Eisvolumen angesetzt wurde. Es hat sich gezeigt, dass dies keinen signifikanten Einfluss auf die Vereisungstrajektorie Nordamerikas und Eurasiens hat (**M1.3-2**). Ferner konnte in „individual forcing“ Experimenten nachgewiesen werden, dass geeignete Erdbahnparameter das Einsetzen der letzten Eiszeit steuern, während Veränderungen in Treibhausgaskonzentrationen nur eine untergeordnete Rolle spielen (**M1.3-3**).

Wie unter 1.3 bereits erläutert konnten aufgrund der nicht vorhersehbaren aber notwendigen wiederholten Neukalibrierungen und Sensitivitätsexperimente und des damit verbundenen zusätzlichen Zeitaufwands nicht alle geplanten transienten

Simulationen bis zum Projektende vollständig abgeschlossen werden. Dies betrifft vor allem die Deliverables **D1.3-2** und **D1.3-3** (s.u.). Die Durchführung von PalMod Phase III ist hiervon nicht betroffen.

Zusammenfassung der Meilensteine & Deliverables:

- **M1.3-2** (Analysis of the effect of ice-sheet initialization on glacial inception; re-tuning of model parameters): Erreicht wie oben dargestellt.
- **M1.3-3** (Investigation of the individual roles of greenhouse gas and orbital forcing): Erreicht wie oben dargestellt.
- **M1.3-4** (Analysis of climate and carbon cycle feedbacks, with WG2): Erreicht bzgl. der Klima-Feedbacks (nicht erreicht bzgl. der Kohlenstoffkreislauf-Feedbacks aufgrund technischer Probleme wie im Abschlussbericht zu PalMod-II-WP2.1-TP5 detailliert dargestellt).
- **D1.3-2** (Accelerated ice sheet-solid earth-climate simulations towards MIS 5.2): Teilweise erreicht, da bisherige Simulationen bei 110 ka (d.h. nach dem ersten Vereisungsmaximum) enden.
- **D1.3-3** (Non-accelerated simulations of the last glacial inception with GCM-based ice sheet-solid earth-climate models): Nicht erreicht, da bisherige Simulationen mit einem moderaten Beschleunigungsfaktor von 10 durchgeführt wurden. Experimente der Verbundpartner vom PIK haben mit Hilfe von CLIMBER-X (einem Erdsystemmodell mittlerer Komplexität) allerdings gezeigt, dass die Ergebnisse durch diese moderate Beschleunigung bzgl. des Eisaufbaus und der Klimaentwicklung nur geringfügig beeinflusst werden, so dass D1.3-3 für das Erreichen der übergeordneten wissenschaftlichen Projektziele nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- **D1.3-4** (Model-data evaluation): Erreicht, insbesondere mit Blick auf Eisschild- und Meeresspiegelrekonstruktionen.

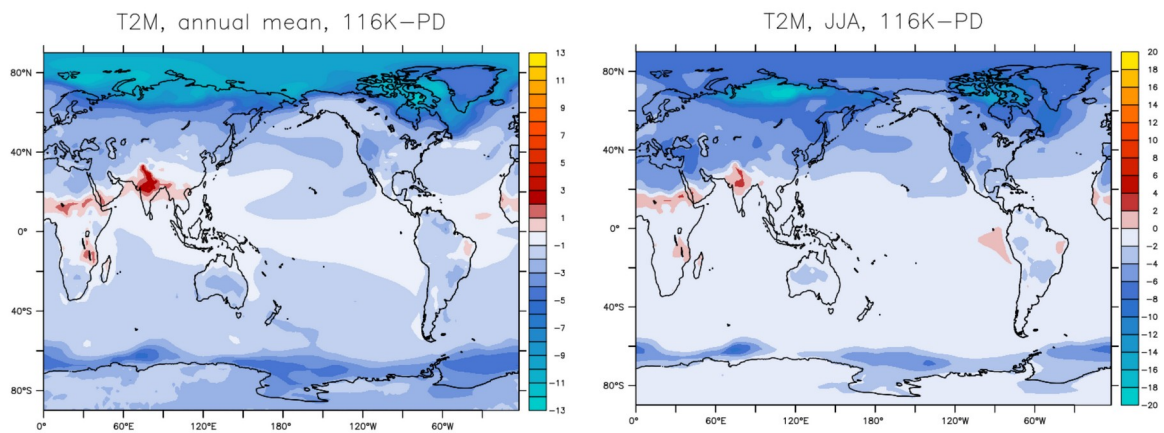


Abbildung 1. Oberflächennahe Temperaturanomalien (in °C) für die 116-ka-Zeitscheibe relativ zum heutigen mit CESM simulierten Klima für Jahresmittelklimatologien (links) und nordhemisphärische Sommerklimatologien (rechts).

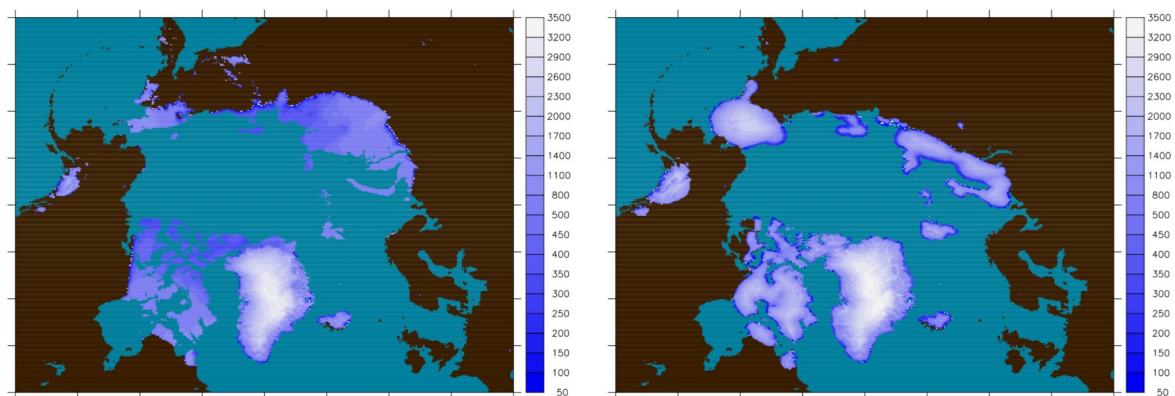


Abbildung 2. Mit PISM simulierte Eisdicken (in m) für die Zeitpunkte 114 ka (links) und 108 ka (rechts) aus transients mit CESM-Ergebnissen angetriebener Simulation.

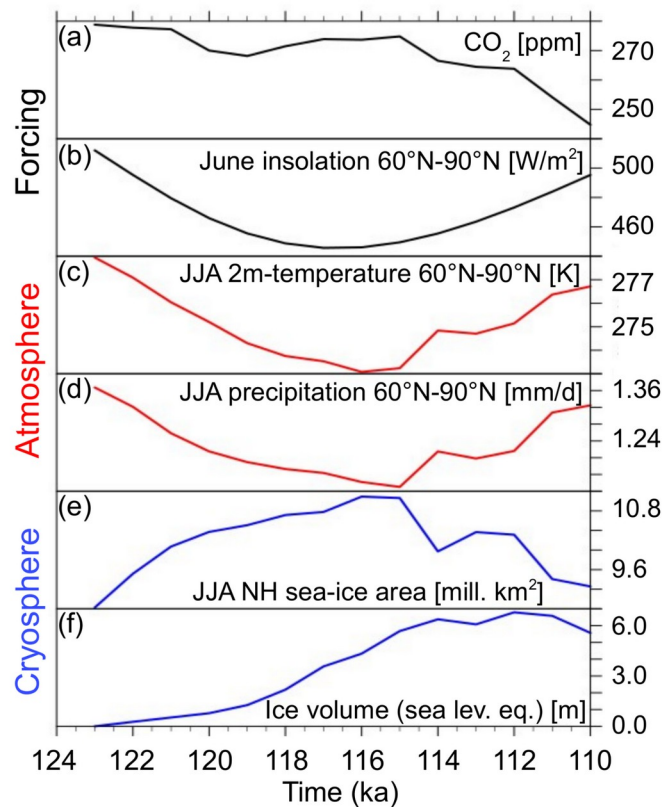


Abbildung 3. (a) Treibhausgas- und (b) Insolationsantrieb der transienten CESM-PISM-Simulation. (c) Mittlere sommerliche (Juni-August) 2m Temperatur und (d) Niederschlag in hohen Breiten nördlich von 60°N. (e) Nordhemisphärische sommerliche Meereisfläche und (f) Landeisvolumen als Meeresspiegeläquivalent. Werte wurden alle 1000 Jahre berechnet.

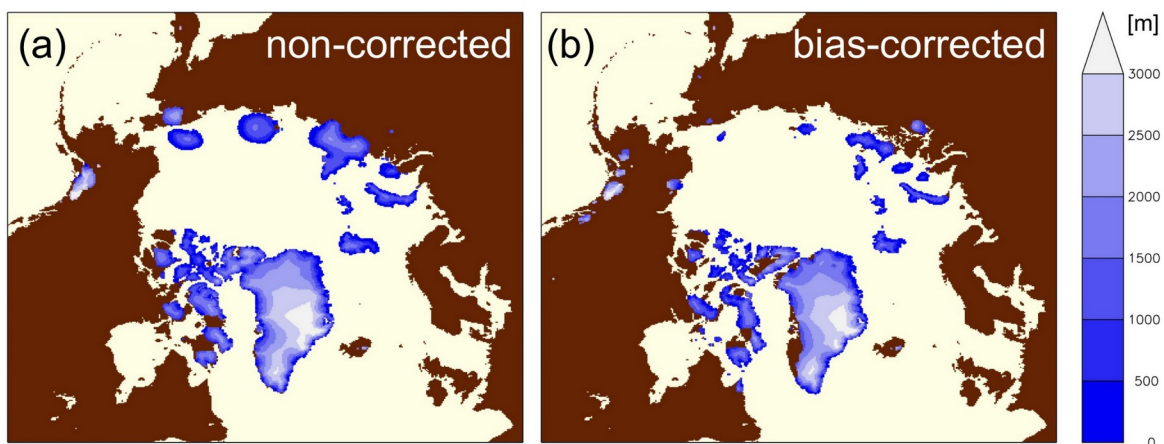


Abbildung 4. Simulierte Eisverteilung in der Nordhemisphäre aus beschleunigten transienten Klima-Eisschild-Simulationen mit CESM-PISM für das Zeitintervall 123-110 ka. Gezeigt sind die Eishöhen für 112 ka aus dem Lauf (a) ohne Klimakorrekturen und (b) mit Klimakorrekturen („temperature bias correction“).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben wurden ausschließlich für Personal und Reisen zu Projekttreffen aufgewendet. Der größte Teil der Kosten entfiel auf Personalausgaben. Darüber hinaus wurde ein geringerer Teil für Reisekosten aufgewendet, die für die Teilnahme an den Jahrestreffen des PalMod-Projekts (Travemünde; 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 geleisteten Arbeiten waren in vollem Umfang erforderlich und orientierten sich stets an den Zielen des Forschungsvorhabens. Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse wären ohne die Förderung des BMBF nicht erreichbar gewesen. Die Projektmittel wurden ausschließlich für die im Projektantrag geplanten bzw. in den Einzelberichten genannten Arbeiten eingesetzt. Es waren keine zusätzlichen Mittel für das Projekt notwendig.

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

Die berichteten Ergebnisse wurden und werden in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht und damit interessierten Wissenschaftlern weltweit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse des Projekts tragen zum weiteren Verständnis der globalen Klimavariabilität und der wichtigen Rolle von Eisschilden im System Erde im Rahmen des Klimawandels bei. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden zudem einen wesentlichen Teil der Grundlage für die Phase III des PalMod-Projekts.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Lange transiente gekoppelte Simulationen des Einsetzens der letzten Eiszeit mit einem hochkomplexen Modell wie CESM-PISM sind unseres Wissens bislang einzigartig. Uns sind diesbezüglich keine vergleichbaren Arbeiten außerhalb von PalMod bekannt.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Geplante PalMod-Veröffentlichungen in begutachteten Fachzeitschriften:

Latinovic, D., M. Prange, et al.: Role of temperature and precipitation biases in climate-ice sheet simulations (CESM-PISM) of the last glacial inception (Arbeitstitel).

Publikationen mit Projektbezug:

Crow, B. R., L. Tarasov, **M. Schulz**, and **M. Prange**, 2024: Uncertainties originating from GCM downscaling and bias correction with application to the MIS-11c Greenland Ice Sheet. *Climate of the Past*, 20, 281-296, doi:10.5194/cp-20-281-2024.

Obrecht, I., D. De Vleeschouwer, L. Wörmer, M. Kucera, D. Varma, **M. Prange**, T. Laepple, J. Wendt, S. D. Nandini-Weiss, H. Schulz, and K.-U. Hinrichs, 2022: Last Interglacial decadal sea surface temperature variability in the eastern Mediterranean. *Nature Geoscience*, 15, 812-818, doi:10.1038/s41561-022-01016-y.

Mas e Braga, M., J. Bernales, **M. Prange**, A. P. Stroeven, and I. Rogozhina, 2021: Sensitivity of the Antarctic ice sheets to the warming of marine isotope substage 11c. *The Cryosphere*, 15, 459-478, doi:10.5194/tc-15-459-2021.

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

- PalMod-General-Assembly 2022 (16.-17.05.2022, Travemünde)
- PalMod-General-Assembly 2021 (27.-28.05.2021)