
ZE: Alfred-Wegener-Institut (AWI), Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Prof. Dr. G. Lohmann, Dr. G. Knorr	Förderkennzeichen: 01LP1916B
---	--

Vorhabenbezeichnung:
PalMod-1-2-TP2 Das Marine Isotopenstadium 3 - TP2 Analyse des Marinen
Isotopenstadiums 3 mit AWI-ESM

Laufzeit des Vorhabens:
01.01.2020 – 13.12.2023

I. Kurze Darstellung zu

I.1. Aufgabenstellung

Das Ziel der Arbeiten in diesem Teilprojekt ist das Verständnis abrupter Klimavariabilität während des Marinen Isotopenstadiums 3 (MIS3) und des Hochglazialen (LGM) Eisaufbaus zu verbessern.

Mit Hilfe von gekoppelten Eisschild-Klima Modellexperimenten werden dazu transiente Simulationen für das Zeitfenster von ~40,000 Jahre vor heute bis zum LGM (21,000 Jahre vor heute) durchgeführt. Diese Zeitspanne ist durch abrupte Klimaumschwünge auf Zeitskalen von tausenden von Jahren gekennzeichnet (Dansgaard-Oeschger (DO) Zyklen), deren Wechselwirkung mit der Eisschild-Entwicklung unter variierenden Orbitalkonfigurationen und Treibhausgaskonzentrationen Gegenstand der Untersuchungen ist. Die Anwendung der komplexen Erdsystemmodelle, die in der ersten Phase von PalMod entwickelt wurden, sind dabei ein geeignetes Instrument um ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse/Mechanismen und Antriebsfaktoren zu entschlüsseln. Das Teilprojekt am AWI ist für die Durchführung und Analyse von Simulationen mit AWI-ESM zuständig.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Sektion „Dynamik des Paläoklimas“ am AWI existiert seit 2005 und hat langjährige Erfahrungen mit Klimamodellen und deren Interpretation im Lichte der Erdgeschichte. Das verwendete Erdsystemmodell ist das AWI-ESM. Diese Modellplattform eignet sich für die Anwendung bei Hintergrundklimata, bei denen sich unter anderem die Ozeanströmungen und Vegetationsmuster vom modernen Zustand unterscheiden. Darüber hinaus erweitern wir das Modell ständig um weitere dynamische Darstellungen von Komponenten des gekoppelten Erde-Klima-Systems, wie z.B. die Eisschilde, Wasserisotope und den Radiokohlenstoffkreislauf. Einige Kopplungsaspekte wurden bisher nur vereinfacht behandelt. Jedoch konnte die PalMod Finanzierung dazu beitragen dass geeignete Lösungen, die eine Simulation von Glazialzyklen ermöglichen, entwickelt wurden.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Vorhabens basierte auf den inhaltlichen und technischen Vorarbeiten in PalMod-I, welche die Grundentwicklung des gekoppelten AWI-ESM + PISM-Modell (Ozean-Atmosphäre-

Eisschild) beinhaltete. Darauf aufbauend wurde neben Modelloptimierungen und Erweiterungen ein Schwerpunkt des Vorhabens auf die Simulation der Hochglazialen Vereisung der letzten Eiszeit gesetzt. Ausgangspunkt der Simulationen war 38 ka. Ab diesem Zeitpunkt ist MIS3 durch vorrückende Eisschilde auf der Nordhalbkugel und einen Rückgang des Meeresspiegels in der Größenordnung von mehreren zehn Metern gekennzeichnet. In einer ersten Arbeitsphase dienten verschiedene Eisschild-Initialbedingungen als Startpunkt für unsere transienten Klimasimulationen, die anschließend durch unterschiedliche AMOC-Zustände komplettiert wurden. Ferner wurden Sensitivitätsstudien mit konstantem Modellantrieb (Treibhausgase und Eisschilde) untersucht um insbesondere die Rolle der Orbitalkonfiguration für abrupte Klimaschwankungen (DO-Zyklen) zu untersuchen. Die Untersuchungen liefern somit einen weiteren Baustein um den letzten Glazialen Zyklus in seiner Gesamtheit abzubilden.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Neben den Eiszeitzyklen während der letzten ca. 800.000 Jahre (Periode der Zyklen ca. 10^5 Jahre) variiert das Erdklima auch stark auf kurzen Zeitskalen von tausenden von Jahren in Form von Dansgaard-Oeschger (D-O)-Ereignissen (NGRIP mebers, 2004). Diese D-O Variabilität ist durch wiederholte Oszillationen zwischen kalten stadialen und warmen interstadialen Bedingungen in der gesamten nordatlantischen Region und Heinrich-Ereignissen (HE; massive Armadas von Eisbergen, die sich über den Nordatlantik erstrecken, Bond et al. 1995), die mit ausgedehnten Kälteperioden, den so genannten Heinrich-Stadialen (HS), verbunden sind, gekennzeichnet. Die Amplitude der D-O-Variabilität scheint dabei vom Klimahintergrund abzuhängen (z.B. McManus et al., 1999; Barker et al. 2011), wobei die höchsten Amplituden während Zwischenstadien wie dem marinen Isotopenstadium (MIS) 3 (~60-29 tausend Jahre vor heute) erreicht werden und das Verhalten während interglazialer (z. B. Holozän) und vollglazialer Perioden (z. B. das letzte Hochglazial) wesentlich gedämpfter ist. Dieser Zusammenhang wurde mit der Abhängigkeit der D-O Variabilität vom Klimahintergrund (d.h. Eisvolumen und Treibhausgaskonzentrationen), sowie abrupten Wechseln zwischen verschiedenen AMOC-Zuständen (Stommel, 1961; Ganopolski & Rahmstorf, 2001; Zhang et al 2014; Zhang et al. 2017) als auch AMOC-Oszillationen (Vetoretti & Peltier, 2016) in Verbindung gebracht. Die grundsätzliche Frage jedoch, ob Änderungen in der Orbitalkonfiguration abrupte Klimasprünge während MIS3 direkt auslösen können, z. B. durch die Modulation der Stärke der AMOC ist bisher unzureichend erforscht. Gleiches gilt für die Phase des besonders starken Eiswachstums am Ende von MIS3 bis zum LGM. In dieser Zeit wurden der atmosphärische CO₂ Gehalt (Bereiter et al. 2012; Lüthi et al. 2008) und die boreale Sommersonneneinstrahlung (Milankovitch, 1941; Berger, 1978) geringer und das Volumen des Kontinentaleises nahm um etwa bis zu 50 Meter zu, was einem Rückgang des Meeresspiegels (SLE) in etwa der gleichen Größenordnung entsprach (z.B. Bintanja et al. 2005; Grant et al., 2012; Medina-Elizalde, 2013).

Die Ursachen und die zugrundeliegenden Mechanismen und Prozesse (insbesondere Rückkopplungsmechanismen zwischen verschiedenen Erdsystem-Komponenten) sind bisher noch nicht

umfassend in gekoppelten Modellstudien mit komplexen Erdsystemmodellen untersucht worden. Ein solches Verständnis und die Reproduzierbarkeit vergangener Klimaumschwünge sind jedoch fundamentale Bausteine für ein besseres Verständnis des Zusammenspiels der Klimadynamik über ein breiteres Spektrum eiszeitlicher Klimavariationen auf verschiedenen Zeitskalen.

Der Bericht enthält relevante Arbeiten der vom AWI in PALMOD zugesagten beigestellten fachlichen Leistungen der institutionellen Grundfinanzierung im Berichtszeitraum. Diese sind in Grün gefärbt.

II. Eingehende Darstellung

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

In PalMod-II-WP-1-2-TP2 konnten gemäß den Projektzielen transiente gekoppelte Klima- Eisschild-Simulationen für das Isotopenstadium MIS3 durchgeführt werden. Die Grundzüge des Klimamodells und die Kopplung an die Eisschilde wurde in [Sidorenko et al. \(2019\)](#), [Lohmann et al. \(2020\)](#), [Gierz et al. \(2020\)](#), [Ackermann et al. \(2020\)](#), [Niu et al. \(2021\)](#) dargestellt. Die Oberflächenmassenbilanz der Eisschilde im gekoppelten Klima- Eisschild-Setup wird mit einem von [Krebs-Kanzow et al. \(2021\)](#) entwickelten Tages- Energiebilanzmodell (dEBM) berechnet, das zur Modellvergleichsstudie von [Fettweis et al. \(2020\)](#) beigetragen hat, an der auch das MPI-M beteiligt war. Alle Komponenten sind Teil eines modularen gekoppelten Modellkonzepts ([Barbi et al., 2021](#)). Ergänzt wurden diese Bemühungen z.B. durch die Entwicklung von langfristigen Zukunftsszenarien ([Ackermann et al., 2020](#)) und einer neuartigen Eisschildrekonstruktion ([Gowan et al. 2021](#)). Außerdem wurde ein Seenmodul (LakeCC) in das PISM-Eisschildmodell implementiert und weiterentwickelt, um den Einfluss von Gletscherseen auf die Eisschilddynamik zu berücksichtigen ([Hinck et al., 2020, 2022](#)).

Neben den technischen Erweiterungen und Verfeinerungen waren die Arbeitsschwerpunkte insbesondere auf die Entwicklung der hochglazialen Eisschilde unter Berücksichtigung des Einflusses verschiedener AMOC-Zustände und die Rolle der Orbitalkonfiguration gerichtet. Die transienten gekoppelten Simulationen wurden mit einem Beschleunigungsfaktor von 20 durchgeführt, d.h. pro Klimamodelljahr werden zwanzig Eisschildmodelljahre durchlaufen. Um Schocks im Klimasystem zu vermeiden und dem Klimamodell Zeit zu geben, sich an Veränderungen der Gletschermaske und der Topographie anzupassen, wird AWI-ESM mit einer Chunk-Länge von 5 Jahren ausgeführt. Daher wird PISM mit einer Chunk-Länge von 100 Jahren betrieben. Die Kopplung umfasst monatliche atmosphärische und ozeanische Bedingungen für den Eisschildantrieb sowie die Süßwasserfreisetzung durch das Abschmelzen des Eisschildes und die Aktualisierung der Topographie und der Gletschermaske der Atmosphärenkomponente ECHAM. Für die Simulation der Oberflächenmassenbilanz wird das Tagesenergiebilanzmodell (dEBM) von [Krebs-Kanzow et al. \(2021\)](#) verwendet. Als sich zeitlich verändernde Randbedingungen wurden in den transienten Simulationen

atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen (Köhler et al., 2017) und Erdorbitalparameter (Berger, 1978) dem gekoppelten System vorgeschrieben (Abb. 1).

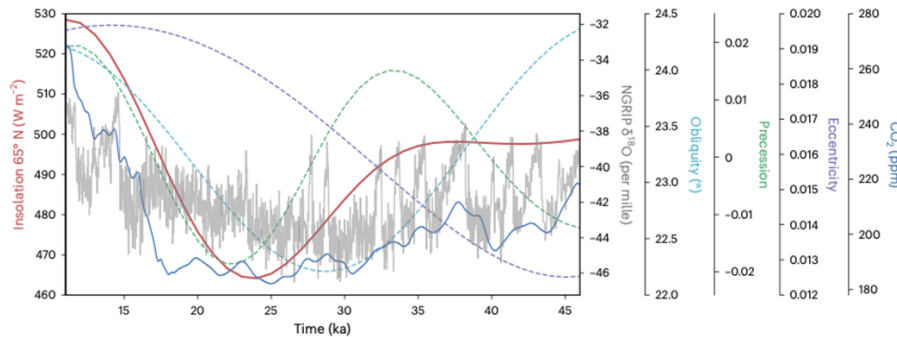


Abbildung 1: Orbitalparameter und CO_2 -Werte als Randbedingungen für die Experimente: Sonneneinstrahlung bei $65^\circ N$ zur Juni-Sonnenwende (rot), CO_2 (dunkelblau), Schiefe (hellblau), Präzessionsparameter (grün), Exzentrizität (lila) und Grönland-Eisbohrkernaufzeichnungen (grau) (Berger, 1978; Köhler et al. 2017; NGRIP_members, 2004).

Um in unseren Transienten MIS3 Simulationen (Tran_Glac1d, Tran_Paleomist und Tran_PISMindex) bestehende Unsicherheiten in den Initialen Eisschildrekonstruktionen zu berücksichtigen verwendeten wir für die Initialisierung drei verschiedene Eisschildkonfigurationen für 38 ka BP (Abb. 2). Zwei Konfigurationen sind aus geologischen Rekonstruktionen (Glac1D, Tarasov et al., 2012 und PaleoMist, Gowan et al., 2021). Als weitere Alternative diente eine Gletscherindexsimulation mit dem Eisschild Modell PISM.

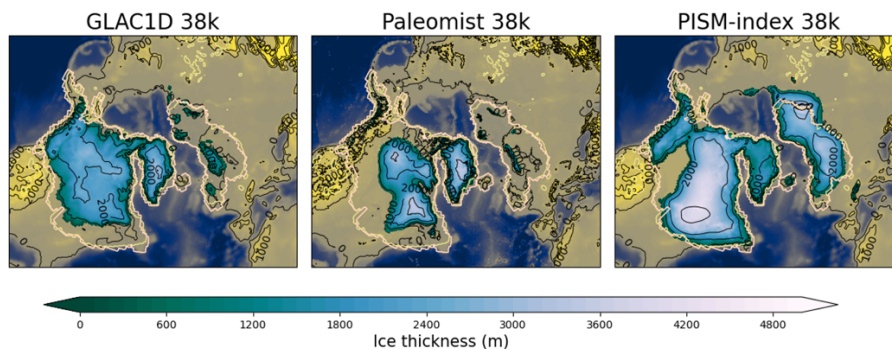


Abbildung 2: Eisschilddicke (m) für 38 ka BP aus GLAC1D, PaleoMist und einer Gletscherindex-Simulation (PISM-Index), welche den den Experimenten Tran_Glac1d, Tran_Paleomist, und Tran_PISMindex als Anfangsbedingung dienen.

Trotz der substantiellen Unterschiede in den Anfangsbedingungen stimmen die Ausdehnungen des simulierten LGM Eisschildes über Nord Amerika, sowohl mit den LGM Rekonstruktionen aus Glac1D, als auch PaleoMist gut überein. Dies zeigt, dass sich unabhängig von der Ausgangskonfiguration (Abb. 2) das Eisschild tendenziell zur einer ähnlichen Eisschildkonfiguration entwickelt (Abb. 3).

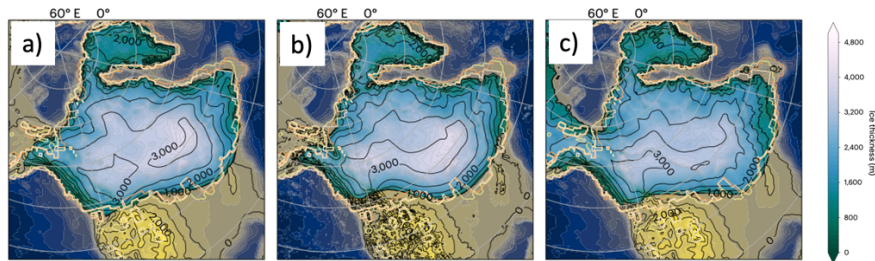


Abbildung 3: Simulierte Eisschichtmächtigkeiten (m) in den Experimenten Tran_Glac1d (a), Tran_Paleomist (b) und Tran_PISMindex (c), wenn Eisvolumina in etwa äquivalent zu Meeresspiegeländerungen von 100 m sind.

Der Schlüssel sind hierbei atmosphärische Feuchtetransporte im Sommer über dem nordamerikanischen Kontinent (Abb. 4). Diese Transporte tendieren durch ihre jeweiligen Niederschlagszentren dazu, die anfänglichen Unterschiede in der Entwicklung der LGM- Eisschilde zu eliminieren.

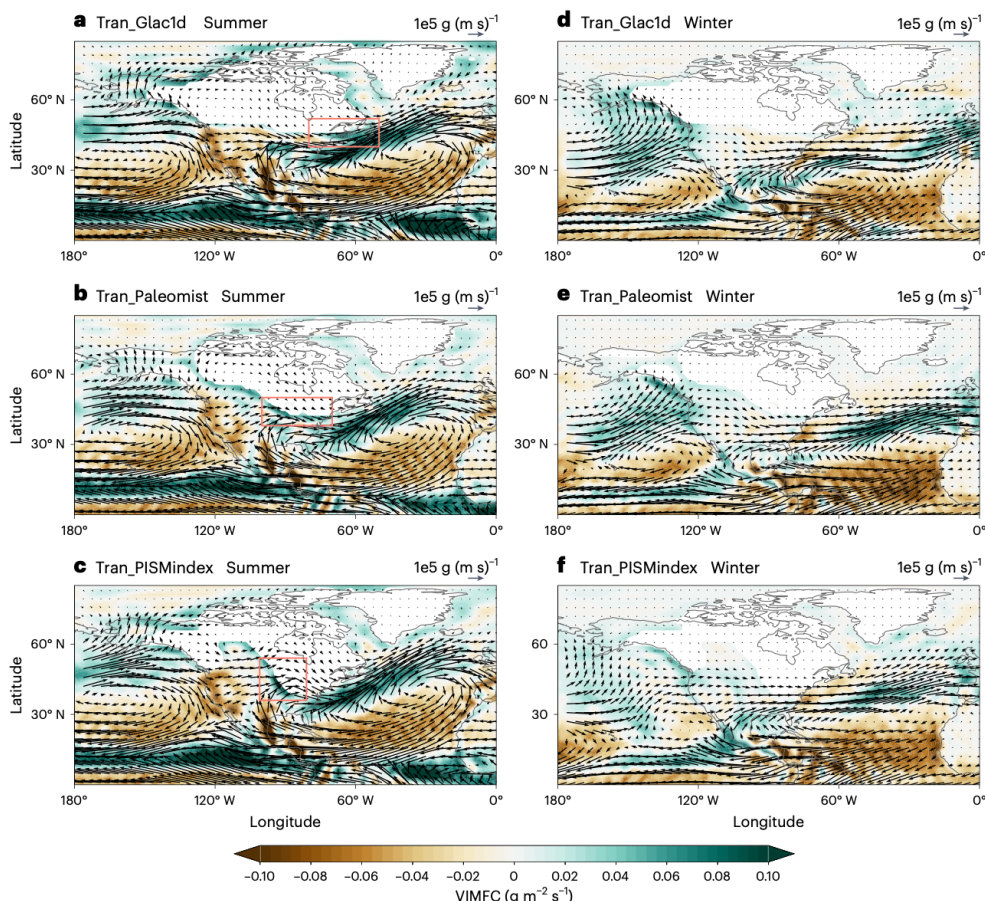


Abbildung 4: Feuchtetröme im Sommer und Winter. Vertikal integrierter Feuchtetransport (Vektoren) und die integrierte Konvergenz der Feuchtetröme ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), wenn Eisvolumina in etwa 70 m SLE betragen. Sommer ist dargestellt für die Experimente Tran_Glac1d (a), Tran_Paleomist (b) und Tran_PISMindex (c). d-f, wie a-c, aber im Winter. Rosafarbene Kästchen zeigen Gebiete mit starkem Feuchtigkeitstransport auf den Eisschilden an.

Ferner wurden Analysen der Oberflächenmassenbilanz über dem nordamerikanischen Kontinent durchgeführt. So können Beiträge zum Eiswachstum durch atmosphärische Feuchtigkeitstransporte, Schmelzen und Gefrieren während der Sommermonate genauer quantifiziert werden.

Diese Analysen zeigen, dass die atmosphärischen Feuchtetransporte insbesondere im Sommer in einem verstärkten Niederschlag (Schnee) resultieren. Dieser Schneefall sorgt sogar im Sommer in der Nähe des südlichen Eisschildrandes (östlich der Kordilleren) für eine positive Massenbilanz (Abb. 5) in der Gletscherindexsimulation (Experiment *Tran_PISMindex*).

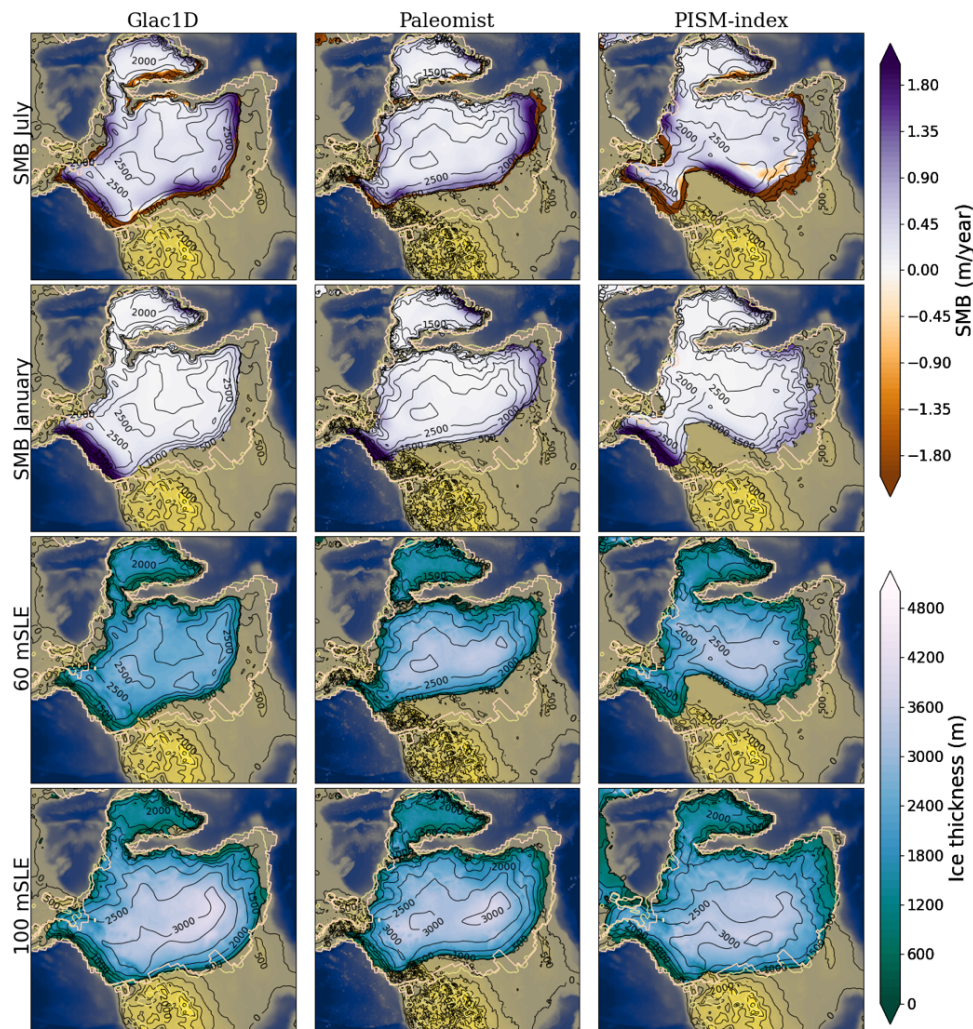


Abbildung 5: Eisschild Oberflächenmassenbilanz für Juli (Reihe eins) und Januar (Reihe zwei) und die dazugehörige simulierte Eisschilddicken (m) für Startbedingungen von 38 ka BP aus GLAC1D (links, Exp. *Tran_Glac1d*), PaleoMist (mitte, Exp. *Tran_Paleomist*) und einer Gletscherindex-Simulation (PISM-Index, rechts, Exp. *Tran_PISMindex*). Die simulierte Eisschildkonfigurationen sind für Volumina äquivalent zu Meeresspiegeländerungen von 60 m (Reihe drei) und 100 m (Reihe vier).

Interessanterweise sind Änderungen der Schmelze dabei auch eng mit Albedoänderungen im Sommer korreliert, während die Beiträge der Oberflächenlufttemperatur weniger offensichtlich sind, da für dieselben Albedo-Werte unterschiedliche Temperaturen nebeneinander bestehen können, insbesondere bei relativ niedrigen Werten (Abb. 6).

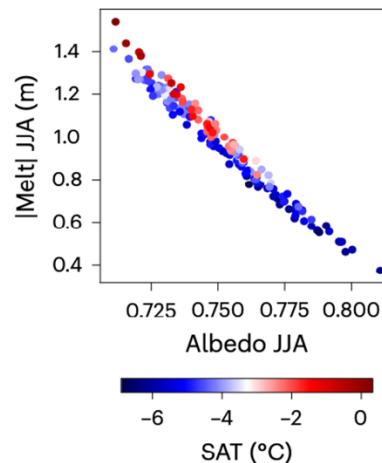


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen den sommerlichen (JJA) Albedoänderungen und der entsprechenden Sommerschmelze und der entsprechenden Oberflächenlufttemperatur (schattiert) entlang 97°W in Gebieten mit schneller Eisausdehnung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die rasche Ausdehnung des nordamerikanischen Eisschildes durch sommerliche Schneefälle erklärt werden kann und durch den Transport von Feuchtigkeit aus den wärmeren niedrigeren Breiten des Atlantiks in das Innere des nordamerikanischen Kontinents begünstigt wurde. Relative schwache AMOC-zustände wie während stadialer und/oder Heinrich Ereignissen waren dabei besonders effektive Ozeanzirkulationszustände für das Eiswachstum. Das Zusammenspiel dieser Faktoren führte nicht nur zu mehr Eis, sondern auch zu einer größeren Schneedecke über Nordamerika die das Sonnenlicht effektiver reflektierte und so das Schmelzen zusätzlich verringerte.

Diese Rückkopplungen heben hervor, wie das Zusammenspiel zwischen verschiedenen Erdsystemkomponenten, sowohl die Geschwindigkeit als auch die räumlichen Muster des Eisvorstoßes durch die Menge des sommerlichen Schneefalls steuert, der von den Feuchtetransportwegen aus dem nordatlantischen Warmpool in Verbindung mit der Eisschildgeometrie abhängt (Abb. 7). Entsprechende Mechanismen könnten auch für künftige Veränderungen der antarktischen und grönländischen Eisschilde eine Rolle spielen.

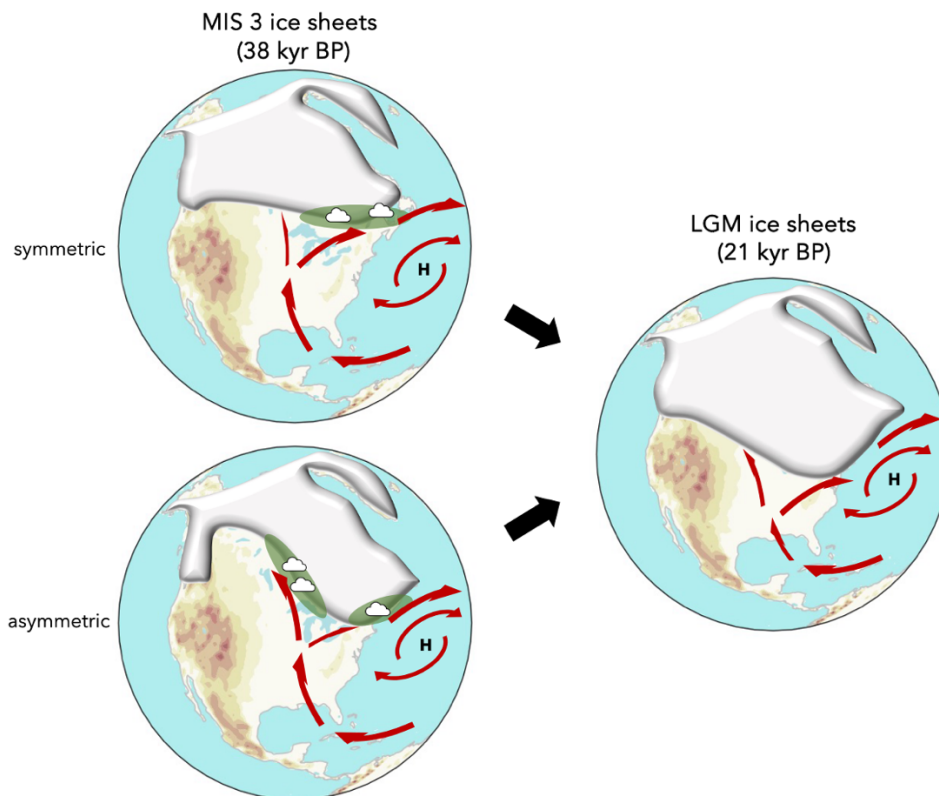


Abbildung 7: Schematische Darstellung des dominanten Mechanismus zur Ausprägung eines Hochglazialen Eispanzers trotz substanzieller Unterschiede zu Beginn der jeweiligen Simulationen. H repräsentiert das Azoren Hoch und die roten Pfeile den sommerlichen Transportweg atmosphärischer Feuchte mit den assoziierten Hauptniederschlagsgebieten entlang des Eisschildes in Grün. Die ins Zentrum gerichtete Strömung ist dabei im Fall der zonal heterogenen Eisschildkonfiguration besonders ausgeprägt (unten links) und führt dort zu hohen Akkumulationsraten (angepasste Version der Abbildung 6 des Artikels von Niu et al., 2024).

Fortschritt konnte auch bezüglich der Ursache von abrupten Klimaereignissen während MIS3 erzielt werden. Frühere Studien konzentrierten sich hauptsächlich auf Faktoren, die innerhalb des Klimasystems liegen, während die Rolle externer Faktoren, wie die einfallende Sonnenstrahlung, unklar blieb. Um diese Frage zu beantworten, haben wir transiente Klimaexperimente mit Hilfe der älteren Version des MPI-ESM Klimamodells durchgeführt um den Phasenraum, in dem interne Klimaoszillationen im Erdsystem auftauchen zu untersuchen (Zhang et al., 2021). Das verwendete Modell wurde in PalMod ausführlich getestet und für wärmere und kältere Grundzustände als Heute untersucht (z.B. Zhang et al., 2017; Maier et al., 2018).

Die Erdumlaufbahn besteht aus drei Parametern - Exzentrizität, Schiefe und Präzession -, die unterschiedlichen Auswirkungen auf die zeitlich-räumliche Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung auf der Erde haben. Um die Bedeutung der einfallenden Sonnenstrahlung für abrupte-Klimaereignisse



zu untersuchen, wurden Experimente durchgeführt bei dem nur Orbitalveränderungen angewendet wurden (Abbildung 8). Die Experimente zeigen, dass Abrupte Klimaänderungen entweder durch die exzentrizitätsmodulierte Präzession oder Schiefe der Erdachse ausgelöst werden können. Beide Treiber führen jedoch zu einer unterschiedlichen Antriebsdynamik. Die Präzession moduliert den Feuchtigkeitsexport vom tropischen Atlantik in den Pazifik, während die Schiefe der Erdachse die Temperatur der Meeresoberfläche und das Meereis im subpolaren Nordatlantik beeinflusst (Zhang et al., 2021). Oszillationen können dabei innerhalb eines bestimmten Bereichs von Orbitalparametern auftreten und andauern, bis sie sich aus diesem Bereich herausbewegen.

Außerdem können Veränderungen im klimatischen Hintergrund (z.B. atmosphärische CO₂ Konzentration oder Eisschildkonfiguration) die Stabilität und Sensitivität des Klimas verändern (Barker und Knorr, 2021; Sun et al. 2022) und sich wechselseitig beeinflussen (Barker und Knorr, 2023).

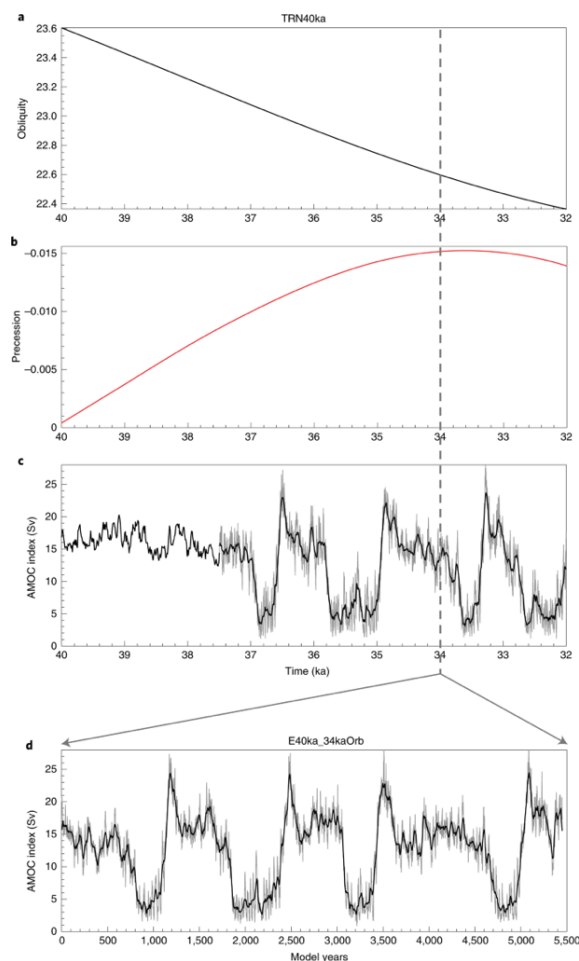


Abbildung 8: Graduelle Variationen der Sonneneinstrahlung durch Änderungen der Erdumlaufbahn können direkt zu abrupten Temperaturänderungen führen. Angewendete Änderungen der Schiefe (a) und der Präzession (b). Der simulierte AMOC-Index im transienten Experiment ist in (c) dargestellt. (d) zeigt die Reaktion der AMOC auf konstante Orbitaleinstellungen von 34ka unter mittelglazialen Bedingungen. Die schwarzen Linien in (c) und (d) zeigen die Mittelwerte über 30 Jahre.

II.2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung.

II.3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Die geleisteten Arbeiten waren in vollem Umfang notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Neben dem erweiterten Klimaverständnis, bilden die Studien und Ergebnisse die Grundlage zur Eingrenzung des Modellverhaltens im glazialen/interglazialen Phasenraum für die transiente Simulation eines kompletten glazialen Zyklus in PalMod Phase III.

II.5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

International sind uns keine Arbeiten bekannt, die mit unseren Arbeiten vergleichbar und entscheidend sind. Einige Publikationen konnten in hochrangigen Journalen veröffentlicht werden.

II.6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung der Ergebnisse

a) Kernpublikationen im Projekt

- Knorr, G., S. Barker, X. Zhang, G. Lohmann, X. Gong, P. Gierz, C. Stepanek, L. Stap (2021): A salty deep ocean as a prerequisite for glacial termination, *Nature Geoscience*, 14, 930–936 (2021).
- Niu, L., Knorr, G., Krebs-Kanzow, U.; Gierz, P., Lohmann; G. Rapid Laurentide Ice Sheet growth preceding the Last Glacial Maximum due to summer snowfall. *Nat. Geosci.* 17, 440–449 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01419-z>
- Niu, L. Knorr, G., Krebs-Kanzow, U.; Gierz, P., Lohmann; G. Laurentide Ice Sheet evolution towards the Last Glacial Maximum using AWIESM model with interactive ice sheets. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.10646880> (2024).
- Niu, L., Lohmann, G., Gierz, P., Gowan, E. J. & Knorr, G. Coupled climate-ice sheet modeling of MIS-13 reveals a sensitive Cordilleran ice sheet. *Glob. Planet. Change* 200, 103474 (2021).
- Niu, L., Knorr, G., Ackermann, L., Krebs-Kanzow, U., Lohmann, G. Eurasian ice sheet formation promoted by weak AMOC following MIS 3. *npj Clim Atmos Sci* (submitted).



b) Arbeiten mit Beteiligung durch PalMod

- Barbi, D., Wieters, N., Gierz, P., Andrés-Martínez, M., Ural, D., Chegini, F., Khosravi, S., and Cristini, L.: ESM-Tools version 5.0: a modular infrastructure for stand-alone and coupled Earth system modelling (ESM), *Geosci. Model Dev.*, 14, 4051–4067, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4051-2021>, 2021.
- Barker, S., G. Knorr, R. L. Edwards, F. Parrenin, A. E. Putnam, L. C. Skinner, E. Wolff and M. Ziegler (2011): 800,000 years of abrupt climate variability, *Science*, 334, 347-351.
- Barker, S. and G. Knorr (2021): Barker, S., Knorr, G. Millennial scale feedbacks determine the shape and rapidity of glacial termination. *Nat Commun* 12, 2273. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22388-6>
- Barker, S., Starr, A., van der Lubbe, J., Doughty, A., Knorr, G., Conn, S., Lordsmith, S., Owen, L., Nederbragt, A., Hemming, S., et al. (2022): Persistent influence of precession on northern ice sheet variability since the early Pleistocene. *Science*, 376, 961–967. [10.1126/science.abm4033](https://doi.org/10.1126/science.abm4033)
- Barker, S., & Knorr, G. (2023). A systematic role for extreme ocean-atmosphere oscillations in the development of glacial conditions since the Mid Pleistocene Transition. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38, e2023PA004690. <https://doi.org/10.1029/2023PA004690>
- Fettweis, X., Hofer, S., Krebs-Kanzow, U., Amory, C., Aoki, T., Berends, C. J., Born, A., Box, J. E., Delhasse, A., Fujita, K., Gierz, P., Goelzer, H., Hanna, E., Hashimoto, A., Huybrechts, P., Kapsch, M.-L., King, M. D., Kittel, C., Lang, C., Langen, P. L., Lenaerts, J. T. M., Liston, G. E., Lohmann, G., Mernild, S. H., Mikolajewicz, U., Modali, K., Mottram, R. H., Niwano, M., Noël, B., Ryan, J. C., Smith, A., Streffing, J., Tedesco, M., van de Berg, W. J., van den Broeke, M., van de Wal, R. S. W., van Kampenhout, L., Wilton, D., Wouters, B., Ziemen, F., and Zolles, T.: GrSMBMIP: intercomparison of the modelled 1980–2012 surface mass balance over the Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, 14, 3935–3958, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3935-2020>, 2020
- Gowan, E.J., X. Zhang, S. Khosravi, A. Rovere, P. Stocchi, A. L. C. Hughes, R. Gyllencreutz, J. Mangerud, J. I. Svendsen, G. Lohmann (2021): A new global ice sheet reconstruction for the past 80,000 years. *Nature comm.* 12, 1199 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21469-w>.
- Hinck, S., E. J. Gowan, and G. Lohmann (2020): LakeCC: a tool for efficiently identifying lake basins with application to paleo-geographic reconstructions of North America. *Journal of Quaternary Science* 35 (3), 422-432. DOI:10.1002/jqs.3182
- Hinck, S., Gowan, E. J., Zhang, X., and Lohmann, G. (2022): PISM-LakeCC: Implementing an adaptive proglacial lake boundary in an ice sheet model, *The Cryosphere*, 16, 941–965, <https://doi.org/10.5194/tc-16-941-2022>
- Krebs-Kanzow, U., Gierz, P., Rodehacke, C. B., Xu, S., Yang, H., and Lohmann, G. (2021): The diurnal Energy Balance Model (dEBM): a convenient surface mass balance solution for ice sheets in Earth system modeling, *The Cryosphere*, 15, 2295–2313.
- Lohmann, G., M. Butzin, N. Eissner, X. Shi, C. Stepanek (2020): Abrupt climate and weather changes across timescales. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 35, e2019PA003782, DOI:10.1029/2019PA003782, Special Section AGU Grand Challenges in the Earth and Space Sciences.
- Shi, X., Werner, M., Wang, Q., Yang, H. and G. Lohmann (2022): Simulated mid-Holocene and last interglacial climate using two generations of AWI-ESM *Journal of Climate* 35 (23), 7811-7831
- Gierz, P., Ackermann, L., Rodehacke, C. B., Krebs-Kanzow, U., Stepanek, C., Barbi, D., and Lohmann, G. (2020) Simulating interactive ice sheets in the multi-resolution AWI-ESM 1.2: A case study using SCOPE 1.0, *Geosci. Model Dev. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-159>.
- Kageyama, M., Harrison, S. P., Kapsch, M.-L., Löfverström, M., Lora, J. M., Mikolajewicz, U., Sherriff-Tadano, S., Vadsaria, T., Abe-Ouchi, A., Bouttes, N., Chandan, D., LeGrande, A. N., Lhardy, F., Lohmann, G., Morozova, P. A., Ohgaito, R., Peltier, W. R., Quiquet, A., Roche, D. M., Shi, X., Schmittner, A., Tierney, J. E., and Volodin, E. (2021): The PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3-CMIP5 simulations, *Clim. Past*, <https://doi.org/10.5194/cp-17-1065-2021>



- Maier, E., Zhang, X., Abelman, A., R. Gersonde, S. Mulitza, M. Werner, M. Méheust, J. Ren, B. Chaplignin, H. Meyer, R. Stein, R. Tiedemann, G. Lohmann (2018): North Pacific freshwater events linked to changes in glacial ocean circulation. *Nature* 559, 241–245. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0276-y>
- Sidorenko, D., H. F. Goessling, N. Koldunov, P. Scholz, S. Danilov, D. Barbi, W. Cabos, O. Gurses, S. Harig, C. Hinrichs, S. Juricke, G. Lohmann, M. Losch, L. Mu, T. Rackow, N. Rakowsky, D. Sein, T. Semmler, X. Shi, C. Stepanek, J. Streffing, Q. Wang, C. Wekerle, H. Yang, T. Jung (2019): Evaluation of FESOM2.0 coupled to ECHAM6.3: Pre-industrial and HighResMIP simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11 (11), 3794–3815. DOI: 10.1029/2019MS001696
- Shi, X., Lohmann, G., Sidorenko, D., Yang, H. (2020): Early-Holocene simulations using different forcings and resolutions in AWI-ESM. doi:10.1177/0959683620908634
- Starr, A., I.R. Hall, S. Barker, S.R. Hemming, J. van der Lubbe, M.A. Berke, G.R. Bigg, A. Cartagena, F.J. Jiménez-Espejo, J. Gruetzner, G. Knorr, N. Lathika, L.J. LeVay, R. Robinson, M. Ziegler, X. Zhang and Exp. 361 Science Party (2021): Antarctic icebergs reorganize ocean circulation during Pleistocene glacials. *Nature* 589, 236–241. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03094-7>
- Shi, X., Werner, M., Wang, Q., Yang, H. and G. Lohmann (2022): Simulated mid-Holocene and last interglacial climate using two generations of AWI-ESM *Journal of Climate* 35 (23), 7811-7831
- Sulzbach, R., Klemann, V., Knorr, G., Dobslaw, H., Dümpelmann, H., Lohmann, G., & Thomas, M. (2023). Evolution of global ocean tide levels since the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38, e2022PA004556. <https://doi.org/10.1029/2022PA004556>
- Sun, Y., Knorr, G., Zhang, X., Tarasov, L., Barker, S., Werner, M. and G. Lohmann (2022): Ice sheet decline and rising atmospheric CO₂ control AMOC sensitivity to deglacial meltwater discharge. *Global and Planetary Change* 210. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103755>
- Zhang, X., Lohmann, G., Knorr, G. and C. Purcell (2014): Abrupt glacial climate shifts controlled by ice sheet changes, *Nature*, 512 (7514), 290-294. doi: 10.1038/nature13592.
- Zhang, X., Knorr, G., Lohmann, G. and S. Barker (2017): Abrupt North Atlantic circulation changes in response to gradual CO₂ forcing in a glacial climate state, *Nature Geoscience*, 10, 518-523, doi: 10.1038/ngeo2974.
- Zhang, X., Barker, S., Knorr, G., Lohmann, G., Sun, Y, Drysdale, R. and D. Hodell (2021): Direct astronomical influence on abrupt climate variability. *Nature Geosci.* 14, 819–826. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00846-6>

c) Weitere zitierte Arbeiten:

- Bereiter, B. et al. Mode change of millennial CO₂ variability during the last glacial cycle associated with a bipolar marine carbon seesaw. *Proc. Natl Acad. Sci.* 109, 9755–9760 (2012).
- Berger, A. (1978): Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences* 35, 2362–2367.
- Bintanja, R., van de Wal, R. S. W. & Oerlemans, J. Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. *Nature* 437, 125–128 (2005).
- Ganopolski, A. & Rahmstorf, S. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature* 409, 153–158 (2001).
- Grant, K. M. et al. Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years. *Nature* 491, 744–747 (2012).

- Köhler, P., Nehrbass-Ahles, C., Schmitt, J., Stocker, T.F., Fischer, H. (2017): A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO₂, CH₄, and N₂O and their radiative forcing. *Earth System Science Data* 9, 363–387.
- Lüthi, D. et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* 453, 379–382 (2008).
- Medina-Elizalde, M. A global compilation of coral sea-level benchmarks: implications and new challenges. *Earth Planet. Sci. Lett.* 362, 310–318 (2013).
- Milankovitch, M. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Royal Serbian Academy Special Publication* 133, 1–633 (1941).
- NGRIP_members (2004), High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature*, 431(7005), 147–151.
- Stommel, H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13, 224–230 (1961).
- Tarasov, L., Dyke, A. S., Neal, R. M., and Peltier, W. R. (2012): A data-calibrated distribution of deglacial chronologies for the North American ice complex from glaciological modeling, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 315–316, 30–40.
- Vettoretti, G., and Peltier, W.R.: Thermohaline Instability and the Formation of Glacial-North Atlantic Super Polynyas at the Onset of Dansgaard-Oeschger Warming Events, *Geophys. Res. Lett.*, 2016.

III. Anlagen

Erfolgskontrollbericht

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht PalMod-II-1-2-TP2
3. Titel PalMod-II-1.2-TP2 Analysen des Marinen Isotopenstadiums 3 mit AWI-ESM	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Lohmann, Gerrit Prof. Dr. Knorr, Gregor Dr.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
	6. Veröffentlichungsdatum xxxxxxx
	7. Form der Publikation Internet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research Klussmannstr. 3 D-27570 Bremerhaven Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution AWI-PalMod-II-1-2-TP2
	10. Förderkennzeichen *) 01LP1916B
	11. Seitenzahl 13
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben Im Bericht
	14. Tabellen Keine
	15. Abbildungen 5
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) DLR Projektträger	
18. Kurzfassung <p>Das Ziel der Arbeiten in diesem Teilprojekt ist das Verständnis abrupter Klimavariabilität während des Marinen Isotopenstadiums 3 (MIS3) und des Hochglazialen (LGM) Eisaufbaus zu verbessern. Mit Hilfe von gekoppelten Eisschild-Klima Modellexperimenten werden dazu transiente Simulationen für das Zeitfenster von ~40,000 Jahre vor heute bis zum LGM (21,000 Jahre vor heute) durchgeführt. Diese Zeitspanne ist durch abrupte Klimaumschwünge auf Zeitskalen von tausenden von Jahren gekennzeichnet (Dansgaard-Oeschger (DO) Zyklen), deren Wechselwirkung mit der Eisschild-Entwicklung unter variierenden Orbitalkonfigurationen und Treibhausgaskonzentrationen Gegenstand der Untersuchungen ist. Die Anwendung der komplexen Erdsystemmodelle, die in der ersten Phase von PalMod entwickelt wurden, ist dabei ein geeignetes Instrument um ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse/Mechanismen und Antriebsfaktoren zu entschlüsseln. Das Teilprojekt am AWI ist für die Durchführung und Analyse von Simulationen mit AWI-ESM zuständig.</p>	
19. Schlagwörter Klimaänderungen, Paläoklima, Eiszeit, Schnelle Klimaübergänge, Ozean Zirkulation	
20. Verlag -	21. Preis 0