



| | |
|---|--|
| ZE: Alfred-Wegener-Institut (AWI), Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Prof. Dr. G. Lohmann, Dr. G. Knorr | Förderkennzeichen: 01LP1915A |
| Vorhabenbezeichnung: PalMod-II_1-1-TP1 FKZ 01LP1915A, (Deglaciation and Future) | |
| Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2020 – 13.12.2023 | |

I. Kurze Darstellung zu

I.1. Aufgabenstellung

Die letzte Deglaziation in den letzten 21.000 Jahren, die den Übergang zwischen der letzten Eiszeit und der gegenwärtigen Zwischeneiszeit markierte, wurde von einer Reihe schneller (hundertjähriger und dekadischer) Klimaänderungen unterbrochen. Numerische Klimamodelle sind von großem Nutzen, um die Mechanismen zu untersuchen, die diesen Ereignissen zugrunde liegen, insbesondere jetzt, da einige der komplexen Modelle aufgrund der zunehmenden Rechenleistung über einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden betrieben werden können. In diesem Projekt haben wir mit Hilfe des AWI-ESM (und anderer in PalMod entwickelter Modellsysteme) Zeitscheiben und transiente Simulationen in der letzten Deglaziation durchgeführt, um die Beiträge verschiedener Klimafaktoren, z. B. Treibhausgaskonzentrationen, orbitale Parameter, kontinentale Eisschilde usw., zu den raschen Klimaänderungen zu quantifizieren. Unser Ziel ist es auch, die synergetischen Effekte dieser Faktoren zu quantifizieren. Darüber liefert unser Projekt auch eine Plattform für weitere Modell-Daten- und Modell-Modell-Vergleiche.

Die neueste Version des modernen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Eis-Modells AWI-ESM mit unstrukturiertem Netz und hoher Auflösung im Ozean. Die Auflösung des atmosphärischen Modells beträgt T63L47. Zusätzlich wurden sog. Hosing-Experimente durchgeführt, indem der Süßwasserfluss in der subpolaren Region des Nordatlantiks (Ruddiman-Gürtel, zwischen 50°N und 70°N) und in der Küstenzone des Laurentidischen Eisschildes (engl. LIS) hinzugefügt wurde (Lohmann et al., 2020). Die Bewertung des Einflusses des deglazialen Wassers auf das Klima in verschiedenen Klimamodellen ist die Grundlage für eine Bewertung und Robustheit solcher Effekte im Rahmen von PalMod. Die Modellergebnisse werden im Hinblick auf die Variationen der Atlantischen Umwälzzirkulation (AMOC) und deren mögliche Auswirkungen auf die nordatlantische Meeresoberflächentemperatur, das arktische Meereis und andere klimarelevante Variablen analysiert (Lohmann et al., 2020; Lu et al., 2014). Die Anwendung der komplexen Erdsystemmodelle, die in PalMod entwickelt wurden, sind dabei ein geeignetes Instrument um ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse/Mechanismen und Antriebsfaktoren zu entschlüsseln.

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

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 mit verschiedenen Komponenten, sowie -im Rahmen von einer PalMod-Kooperation- CLIMBER-X. Diese Modellplattformen eignen 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 (z.B. [Lohmann et al., 2020](#); Shi et al., 2022). Einige Kopplungsaspekte wurden bisher nur vereinfacht behandelt. Jedoch konnte PalMod wesentlich dazu beitragen, dass geeignete Lösungen, die eine Simulation von Glazialzyklen und des zukünftigen Klimas ermöglichen, entwickelt und angewandt wurden.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Vorhabens basierte auf den inhaltlichen und technischen Vorarbeiten in PalMod. Darauf aufbauend wurde neben Modelloptimierungen und Erweiterungen ein Schwerpunkt des Vorhabens auf die Simulation des LGMs, der anschließenden Perioden und der Zukunft gesetzt. Insgesamt bietet dieses vom BMBF geförderte Projekt eine noch nie dagewesene Möglichkeit, die zugrundeliegenden Mechanismen der raschen Klimaveränderungen während der letzten Deglaziation zu verstehen und Licht auf zukünftige Projektionen zu werfen, die anthropogene Einflüsse berücksichtigen. Einblicke in die Entwicklung des gekoppelten Eisschildmodells und von Parametern, die die Simulation des kombinierten Systems Lithosphäre/Mantel - Eisschild - Klima ermöglichen, sind ein Ausgangspunkt für die folgenden Klimasimulationen.

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

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.

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 uns entwickelten Energiebilanzmodell (dEBM) berechnet ([Krebs-Kanzow et al., 2021](#)), das zur Modellvergleichsstudie von [Fettweis et al. \(2020\)](#) beigetragen hat, an der auch das MPI-M in Hamburg 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](#)).

II. Eingehende Darstellung

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

In dem Berichtszeitraum wurden wesentliche Ergebnisse in 3 Bereichen geleistet:

- Simulation des Hochglazials und die Ausarbeitung der Hydrographie, die für die Termination entscheidend ist ([Knorr et al., 2021](#); [Chen et al. 2024](#))
- Validation und Modellentwicklung. Diese Arbeiten sind gesondert weiter unten aufgelistet. Rekonstruktion der Inlandeise ([Gowan et al., 2022](#)) und Daten-Modell-Vergleiche ([Krätschmer et al., 2022](#); [Knorr et al., 2023](#); [Jonkers et al., 2023](#)).
- Erste transiente Simulationen von Abschnitten des letzten Glazial-Interglazial-Zyklus und der Zukunft ([Ackermann et al., 2020](#); [Lohmann et al., 2020](#); [Keeble et al., 2021](#); [Niu et al. 2021, 2024](#); [Shi et al., 2022](#); [Gowan et al., 2023](#); [Sun et al., 2023](#); [Song et al., 2023b](#); [Masoum et al., 2024](#)).
- Vernetzung international im Rahmen von PMIP/CMIP mit dem modernen AWI-ESM. Diese Ergebnisse sind in vielfältigen Fachaufsätzen dokumentiert und die Daten wurde auf Servern abgelegt ([Kageyama et al., 2021](#); [Keeble et al., 2021](#))
- Vernetzung innerhalb PalMods ([Lohmann et al., 2021](#); [Martin et al., 2022](#); [Sun et al., 2023](#); [Sultzbach et al., 2023](#); [Song et al., 2023a](#); [Jonkers et al., 2023](#); [Masoum et al., 2023](#)).

[Knorr et al. \(2021\)](#) zeigten, dass der glaziale gut geschichtete glaziale Ozean von entscheidender Bedeutung für die Reaktion des Systems ist. Diese Ozeanstruktur ist wahrscheinlich vor dem LGM gebildet worden, als die Schiefe auf einem niedrigeren Niveau lag (~27 ka BP). Dieses Ergebnis erklärt die Diskrepanzen zwischen den LGM-Simulationen verschiedener Modelle ([Knorr et al., 2021](#)). Wir schlagen vor, dass deglaziale Veränderungen im tiefen Ozean bereits seit ~27 ka BP zusammen mit

der zunehmenden Schiefe stattgefunden haben (siehe auch Niu et al., 2024). Angesichts der signifikanten Veränderungen des Klimahintergrunds während der Deglaziation ist es von entscheidender Bedeutung zu verstehen, welche Rolle die verschiedenen Antriebsfaktoren für die Veränderungen der glazialen AMOC spielen (z.B. Sun et al., 2022; Shi et al., 2023; Masoum et al., 2023, Abbildung 1). Veränderungen der kontinentalen Eisschilde, der orbitalen Antriebe, sowie CO₂ können über die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis über dem nordöstlichen Nordatlantik abrupte glaziale Klimaveränderungen auslösen. Dies bietet einen grundlegenden Rahmen für das Verständnis abrupter glazialer Klimaveränderungen, die in Paläoklimaaufzeichnungen und -rekonstruktionen aufgezeichnet wurden (Sun et al., 2022; siehe auch Jonkers et al., 2023).

Weiterhin haben wir feedbacks mit dem Inlandeis studiert (Ackermann et al., 2020; Lohmann et al., 2020; Niu et al. 2021, 2024). Dieses wurde in den Zwischenberichten ausführlicher diskutiert. Z.B. zeigte sich in unseren Experimenten, dass das Kordilleren-Eisschild sehr empfindlich auf Veränderungen der Sonneneinstrahlung im Sommer (insbesondere die induzierte Präzession) reagiert. Das Kordilleren-Eisschild war ein Eisschild, der große Teile von Nordamerika periodisch während der Kaltzeiten bedeckte. Das AWI-ESM wurde sowohl für das Letzte Glaziale Maximum (Kageyama et al., 2021) als auch die Zukunft im Rahmen von CMIP/PMIP benutzt und analysiert (Keeble et al., 2021). In Wang et al. (2021) untersuchen wir die Empfindlichkeit des eiszeitlichen Zustandes durch Variationen in der ozeanischen Vermischung, die durch Oberflächenwellen ausgelöst wurden. Des Weiteren untersuchten wir die Rolle der horizontalen und vertikalen Auflösung in paläoklimatischen Studien (Lohmann et al., 2021).

In PalMod laufen noch etliche Publikationen oder sind gerade in 2024 veröffentlicht worden. Wir untersuchen Effekte, die mit der eiszeitlichen Stratifikation im Ozean zu tun haben (siehe Zhang et al., 2020; Knorr et al., 2022). Gezeitendissipation in der Eiszeit war etwa dreimal so hoch wie heute, was zu einer erheblichen Zunahme der vertikalen Durchmischung geführt haben könnte. Dieser Anstieg könnte die glaziale atlantische meridionale Umwälzzirkulation (AMOC) verstärkt haben, was im Widerspruch zu der aus Paläoproben bekannten schwachen AMOC steht. Hier führen wir Ozeanmodellsimulationen durch (Chen et al. 2024, siehe auch Sultzbach et al., 2023), um die Auswirkungen der klimatischen Hintergrundbedingungen und der Gezeitenmischung auf die AMOC während des LGM zu untersuchen. Wir reproduzieren erfolgreich die geschichteten Ozeaneigenschaften des LGM, indem wir den erhöhten Salzgehalt der Tiefsee und den schnellen Temperaturabfall in den oberen Schichten des Ozeans genau simulieren. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die schwache eiszeitliche AMOC hauptsächlich auf die starke Schichtung des eiszeitlichen Ozeans zurückzuführen ist, unabhängig von der erhöhten Gezeitendissipation. Allerdings spielt die glaziale Gezeitendissipation eine entscheidende Rolle bei der Intensivierung des antarktischen Bodenwassers (AABW) während des LGM. Angesichts der entscheidenden Rolle der AMOC in der (de-)glazialen Klimaentwicklung unterstreichen unsere Ergebnisse die komplexen Wechselwirkungen zwischen Ozeanschichtung und Gezeitendissipation, die bisher vernachlässigt

wurden. Dieser Effekt hat evtl. große Auswirkungen auf die Kohlenstoffinventare bei der Termination der Eiszeiten. Möglicherweise ist dieses der Schlüssel für den deglazialen Kohlenstoff, und damit sehr hilfreich für WG2 in PalMod.

Ein anderer Effekt, der bislang nicht ausreichend Berücksichtigung fand, ist das Basalschmelzen des antarktischen Schelfeises. Dieses gilt als Schlüsselprozess für die künftige Entwicklung des antarktischen Eisschildes und der großräumigen Ozeanzirkulation. Beobachtungen zeigen, dass die meisten Schelfe in der Westantarktis schnell schmelzen, während die Schmelzraten der beiden größten Schelfe, des Filchner-Ronne- und des Ross-Schelfeises (FRIS und RIS), immer noch relativ niedrig sind, was auf die potenzielle Gefahr eines beschleunigten Massenverlustes in der Zukunft hinweist. Indem sie die von den Eisschildmodellen prognostizierten Süßwasserantriebe vorschreiben, betonen frühere Studien die wesentliche und komplexe Rolle des Schelfeisschmelzwassers für das künftige Klima, einschließlich einer Verlangsamung der Umwälzung des abysalen Ozeans, der Meereisausdehnung und der Verringerung der globalen Erwärmung. Allerdings haben bisher nur sehr wenige Modellansätze eine explizite Simulation von Schelfeishöhlen (englisch cavities) berücksichtigt. Hier (Song et al., 2023b) implementieren wir antarktische Schelfeishöhlen in ein komplexes multiskaliges Erdsystemmodell auf dem neuesten Stand der Technik, um die Reaktionen und Rückkopplungen des Basalschmelzens des Schelfeises in Klimaprojektionen zu untersuchen. Wir stellen fest, dass eine Kombination aus regionaler Hydrographie und Topographie das Vorhandensein eines Kipppunktes maßgeblich bestimmt. An diesem Punkt dringt warmes Wasser intensiv in die FRIS-Höhle ein, was einen raschen Anstieg der Schmelzrate und der Süßwasserfreisetzung als Reaktion aufsteigende CO₂-Werte bereits in diesem Jahrhundert bewirkt. Im Gegensatz dazu wird für das RIS eine allmählichere Reaktion simuliert. Trotz einer möglichen FRIS-Instabilität deuten unsere Ergebnisse jedoch darauf hin, dass frühere Eisschildmodellierungen und Süßwasserexperimente die zukünftige Schelfeisschmelze überschätzt haben. Daher sind umfassende Modellansätze, die sowohl interaktive Eisschilde als auch deren Hohlräume einbeziehen, dringend erforderlich, um die kombinierten Auswirkungen in Klimaprojektionen besser bewerten zu können. Dieser Beitrag wird in PalMod III fortgeführt, ein hochrangiges Paper befindet sich derzeit im Begutachtungsverfahren.

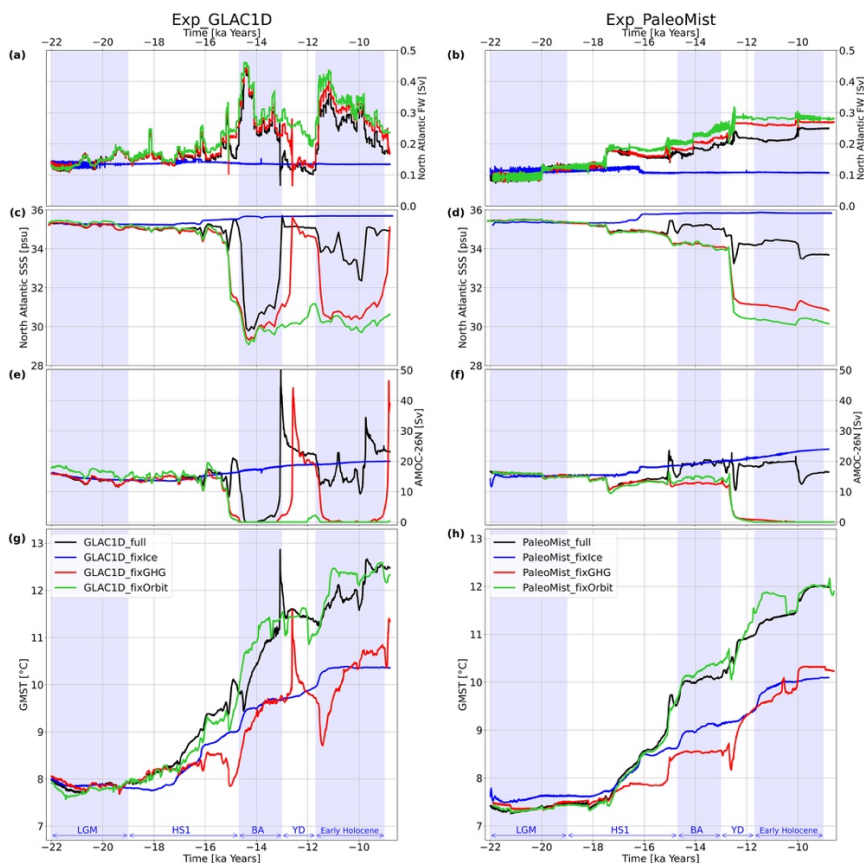


Abbildung 1: Nordatlantische FW, nordatlantische SSS, AMOC bei 26°N und GMST für Exp_GLAC1D (a),(c),(e),(g), und für Exp_PaleoMist (b),(d),(f), und (h). Wir definieren LGM als 22-19 kyr BP, Heinrich Stadial 1 (HS1) als 19-14.7 kyr BP, BA als 14.7-13 kyr BP, und YD als 13-11.6 kyr BP. Der Nordatlantik-Index für SSS ist definiert als ein Durchschnitt über 50°N-70°N und 45°W-0°W. Der blaue Hintergrund repräsentiert LGM, BA und das frühe Holozän, während der weiße Hintergrund HS1 und YD darstellt. Beachten Sie, dass sich die vertikalen Achsen für Exp_GLAC1D und Exp_PaleoMist unterscheiden, mit Ausnahme der GMST-Panels (g) und (h). Der nordatlantische FW-Fluss umfasst Niederschlag-Verdunstung, Meereisflüsse, Landabfluss und Flüssigwasserflüsse, die von Eisschilden geschmolzen werden.

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 glazialen Zyklus in PalMod Phase III. Weitere Modell-Modell und Daten-Modell-Studien werden folgen.

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) Publikationen (fett markiert sind Autoren in PalMod)

- **Ackermann, L.**, Rackow, T., Himstedt, K., **Gierz, P.**, **Knorr, G.**, and **Lohmann, G.**, 2024: A comprehensive Earth system model (AWI-ESM2.1) with interactive icebergs: effects on surface and deep-ocean characteristics, *Geosci. Model Dev.*, 17, 3279–3301, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-3279-2024>
- Chen, Y., **Song, P.**, Chen, X., and **Lohmann, G.**: Glacial AMOC shoaling despite vigorous tidal dissipation: vertical stratification matters, *Clim. Past*, 20, 2001–2015, <https://doi.org/10.5194/cp-20-2001-2024>, 2024.
- 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>.
- Gowan, E. J., **S. Hinck**, **L. Niu**, C. Clason, and **G. Lohmann**, 2023: The impact of spatially varying ice sheet basal conditions on sliding at glacial time scales. *J. Glaciology*, 1-15, DOI:[10.1017/jog.2022.125](https://doi.org/10.1017/jog.2022.125)
- **Jonkers, L.**, **T. Laepple**, M. C. Rillo, **X. Shi**, **A. M. Dolman**, **G. Lohmann**, **A. Paul**, A. Mix, and **M. Kucera**, 2023: Plankton biogeography shows strong meridional variation in ice age to modern ocean warming. *Nat. Geosci.* 16, 1114–1119, DOI: 10.1038/s41561-023-01328-7 .
- **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).
- Krätschmer, S., **A. Cauquoin**, **Lohmann, G.**, and **Werner, M.**, 2022: A Modeling Perspective on the Lingering Glacial Sea Surface Temperature Conundrum. *Geophys. Res. Lettters*, 49 (23), e2022GL100378. DOI:10.1029/2022GL100378
- **Martin, T.**, **A. Biastoch**, **G. Lohmann**, **U. Mikolajewicz**, X. Wang, 2022: On timescales and reversibility of the ocean's response to enhanced Greenland Ice Sheet melting in comprehensive climate models *Geophys. Res. Lettters*, 49 (5), e2021GL097114, doi:10.1029/2021GL097114
- Masoum, A., L. Nerger, **M. Willeit**, **A. Ganopolski**, **G. Lohmann**, 2023: Evaluating forcing factors of the Last Deglaciation: Lessons from an efficient Earth System Model. *Geophys. Res. Lett.* 51, e2023GL107310, <http://dx.doi.org/10.1029/2023GL107310>
- **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.**, **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).
- **Shi, X.**, **Werner, M.**, Yang, H., D'Agostino, R., Liu, J., Yang, C., and **Lohmann, G.**:



Unraveling the complexities of the Last Glacial Maximum climate: the role of individual boundary conditions and forcings, *Clim. Past*, 19, 2157–2175, <https://doi.org/10.5194/cp-19-2157-2023>, 2023.

- **Song, P.**, P. Scholz, **G. Knorr**, D. Sidorenko, R. Timmermann, **G. Lohmann**, 2023b: Thresholds of accelerated basal melting of the Antarctic Ice Sheet in climate projections. <https://www.researchsquare.com/article/rs-3774797/v1>
- Sulzbach, R., **V. Klemann**, **G. Knorr**, H. Dobslaw, H. Dümpelmann, **G. Lohmann**, and M. Thomas, 2023: Evolution of Global Ocean Tide Levels Since the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, doi:10.1029/2022PA004556 <https://doi.org/10.1029/2022PA004556>

Validation und Modellentwicklung:

- **Contzen, J.**, **Dickhaus, T.**, and **Lohmann, G.**: Variability and extremes: statistical validation of the Alfred Wegener Institute Earth System Model (AWI-ESM), *Geosci. Model Dev.*, 15, 1803–1820, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1803-2022>, 2022.
- **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.**, **Steffing, 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.
- **Green, R. A.**, **Menviel, L.**, **Meissner, K. J.**, **Crosta, X.**, **Chandan, D.**, **Lohmann, G.**, **Peltier, W. R.**, **Shi, X.**, and **Zhu, J.**: Evaluating seasonal sea-ice cover over the Southern Ocean at the Last Glacial Maximum, *Clim. Past*, 18, 845–862, 2022. <https://doi.org/10.5194/cp-18-845-2022>
- **Hinck, S.**, **Gowan, E. J.**, **Zhang, X.**, and **Lohmann, G.**: 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>, 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.
- **Krebs-Kanzow, U.**, **Rodehacke, C. B.**, and **Lohmann, G.**, 2023: Brief communication: Surface energy balance differences over Greenland between ERA5 and ERA-Interim, *The Cryosphere*, 17, 5131–5136, <https://doi.org/10.5194/tc-17-5131-2023>
- **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.
- **Lohmann, G.**, **A. Wagner**, **M. Prange**, 2021: Resolution of the atmospheric model matters for the Northern Hemisphere Mid-Holocene climate. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93, 101206 [doi:10.1016/j.dynatmoce.2021.101206](https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2021.101206)
- **Gierz, P.**, **L. Ackermann**, **C. B. Rodehacke**, **U. Krebs-Kanzow**, **C. Stepanek**, **D. Barbi**, and **G. Lohmann** (2020): Interactive Ice Sheets in a Multi-Resolution Climate Model. *Geosci. Model Dev. Disc.* doi: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-17-1065-202>



- **Song, P., Sidorenko, D., Scholz, P., Thomas, M., and Lohmann, G., 2023a:** The tidal effects in the Finite-volume Sea ice–Ocean Model (FESOM2.1): a comparison between parameterised tidal mixing and explicit tidal forcing, *Geosci. Model Dev.*, 16, 383–405. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-383-2023>
- **Shi, X., Cauquoin, A., Lohmann, G., Jonkers, L., Wang, Q., Yang, H., Sun, Y., and Werner, M.:** Simulated stable water isotopes during the mid-Holocene and pre-industrial periods using AWI-ESM-2.1-wiso, *Geosci. Model Dev.*, 16, 5153–5178, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5153-2023>, 2023.
- **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

b) Arbeiten mit Beteiligung durch PalMod oder Nennung im Text:

- **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.
- **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
- **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
- **Wang, R., G. Kuhn, X. Gong, B. K. Biskaborn, R. Gersonde, L. Lembke-Jene, G. Lohmann, R. Tiedemann, Diekmann, B., 2021:** Deglacial land-ocean linkages at the Alaskan continental margin in the Bering Sea. *Frontiers in Earth Science, section Quaternary Science, Geomorphology and Paleoenvironment*, DOI: 10.3389/feart.2021.712415
- **Zhang, X., S. Barker, G. Knorr, G. Lohmann, Y. Sun, R. Drysdale, D. Hodell, F. Chen, 2021:** Direct astronomical influence on abrupt climate variability. *Nature Geo.* 14, 819–826. [doi:10.1038/s41561-021-00846-6](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00846-6)
- **Wang, S., X. Gong, F. Qiao, E. Gowan, J. Streffing, and G. Lohmann, 2021:** The impact of non-breaking waves in upper-ocean temperature simulations of the Last Glacial Maximum. *Environ. Res. Lett.* 16, 034008 [doi:10.1088/1748-9326/abe14e](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe14e)
- **Shi, J., and G. Lohmann, 2024:** Considerable uncertainty of simulated Arctic temperature change in the mid-Holocene due to initial ocean perturbation, *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106337, [doi:10.1029/2023GL106337](https://doi.org/10.1029/2023GL106337)
- **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
- **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.glopla.2022.103755>
- **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>

III. Anlagen

Erfolgskontrollbericht

Berichtsblatt

| | |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN - | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht PalMod-II-1-1-TP1 |
| 3. Titel PalMod-II-1.1-TP1 Simulation der letzten Deglaziation und Klimaänderungen in der Zukunft unter Verwendung des 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-1-1-TP1 10. Förderkennzeichen *) 01LP1915A |
| 11. Seitenzahl 9 | |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. Literaturangaben Im Bericht 14. Tabellen Keine |
| 15. Abbildungen 1 | |
| 16. Zusätzliche Angaben - | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) DLR Projektträger | |
| 18. Kurzfassung Übergeordnetes Ziel in diesem Teilprojekt ist die Simulation des Endes der letzten Eiszeit. Mit Hilfe von gekoppelten Eisschild-Klima Modelleexperimenten werden dazu Simulation des letzten Hochglazials, der anschließenden Perioden und der Zukunft durchgeführt. Arbeitsschwerpunkte des Teilprojektes umfassen die Untersuchung von verschiedenen Antriebsfaktoren von abrupten Klimaereignissen und deren Timing. 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 zu erreichen. Das Teilprojekt am AWI ist für die Durchführung und Analyse der Simulationen mit AWI-ESM zuständig. | |
| 19. Schlagwörter Klimaänderungen, Paläoklima, Eiszeit, Schnelle Klimaübergänge, Ozean Zirkulation | |
| 20. Verlag - | 21. Preis 0 |