

## Abschlussbericht Förderkennzeichen 01LP1925D

<i>Verbundthema:</i> Crosscutting Activities	<i>Förderkennzeichen:</i> 01LP1925D
<i>Vorhabensbezeichnung:</i> PalMod II – CC.1 TP4	
<i>Entwicklung des PICO-Modells zu einem ‚pop-up‘-Modell für transiente Glazialsimulationen</i>	
<i>Laufzeit des Vorhabens:</i> 01.10.2019 - 30.06.2023	
<i>Berichtszeitraum:</i> 01.01.2020 – 31.08.2023	<i>BerichterstellerIn:</i> Prof. Dr. Ricarda Winkelmann

### I. Kurzdarstellung

#### I.1. Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt PalMod II - CC.1 (Crosscutting Activities) umfasste verschiedene Arbeiten, deren Ergebnisse direkte Anwendung in den Working Groups 1-3 fanden. Einerseits wurde die Weiterentwicklung der gekoppelten Erdsystemmodelle unterstützt, andererseits wurden Analysemöglichkeiten und Interpretationen der Modellergebnisse vorangetrieben. Hierbei standen insbesondere die Entwicklung und Optimierung von Erdsystemmodellkomponenten in Hinblick auf die transiente Simulation eines Glazialzyklusses im Fokus. Im TP4 war das konkret das Eismodell PISM, welches in MPI-ESM und AWI-ESM benutzt wird, und das in PISM implementierte PICO Ozean-Box-Modell, welches die Schmelzprozesse in den Kavernen unter den Schelfeisen simuliert, welche von globalen Ozeanmodellen in der Regel nicht aufgelöst werden kann. PICO dient daher als Interaktionsmodul zwischen Eis- und Ozeanmodellen und bildet eine große Bandbreite an Schmelzraten in der Antarktis ab. Ziel des Teilprojektes TP4 in Kooperation mit WP1.4 war es PICO flexibler zu machen für sich auf glazialen Zeitskalen erheblich verändernde Schelfeis- und Kavernengeometrien (Task CC.1-21) und die Sensitivität von den mit PICO ermittelten Schmelzraten gegenüber PICO Parametern näher zu untersuchen (Task CC.1-22). Das verbesserte PICO Model sollte mit WP1.2 für die

Anwendungen in den Erdsystemmodellen für die Nordhemisphäre konfiguriert werden (Task CC.1-23) und in transienten Simulationen des letzten Glazialzyklusses angewandt werden (Task CC.1-24).

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

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) erforscht zentrale wissenschaftliche Fragestellungen zum globalen Wandel, zu Klimafolgen und zur nachhaltigen Entwicklung. Am 1992 gegründeten gemeinnützigen Institut erforschen Natur-, Wirtschafts- und SozialwissenschaftlerInnen aus aller Welt gemeinsam, wie sich das Erdsystem verändert, welche ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen der Klimawandel hat und welche Strategien eine nachhaltige Entwicklung ermöglichen, um Mensch und Natur in Einklang zu bringen. Der institutseigene Hochleistungscomputer ermöglicht komplexe Simulationen und Modellrechnungen des Erdsystems, von vergangenen Eiszeiten hin zum anthropogenen Klimawandel und seinen Auswirkungen in Bezug auf Wetterextreme, Meeresspiegeländerungen sowie wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen.

Das PIK hat 30 Jahre Erfahrung in der Erdsystemmodellierung und speziell der Erforschung glazialer Zyklen, von der weltweit ersten gekoppelten Ozean-Atmosphärensimulation des Eiszeitklimas im Jahr 1998 bis zur ersten transienten Simulation des letzten Eiszeitzyklus in 2010. In den vergangenen Jahren wurden unter Beteiligung des PIK über 250 Studien zur Eisdynamik und den Interaktionen im Erdsystem publiziert, mehrere davon im Rahmen des PalMod-Projektes.

Das PalMod-Projekt ist eng mit der aktuellen Forschungsarbeit mehrerer PIK-Arbeitsgruppen verbunden. Dazu gehören die Arbeitsgruppe zur Untersuchung der Kontinentaleisdynamik unter der Leitung von Ricarda Winkelmann und die Arbeitsgruppe zur Untersuchung der Ozeandynamik unter der Leitung von Stefan Rahmstorf, sowie die Arbeitsgruppe zur langfristigen Erdsystemdynamik unter der Leitung von Andrey Ganopolski, die Arbeitsgruppe zur Untersuchung der Vegetationsdynamik unter der Leitung von Kirsten Thonicke sowie die Arbeitsgruppe Erdsystemmodellentwicklung unter der Leitung von Georg Feulner.

## **I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Teilprojekt hat trotz personeller Verzögerungen (Dr. Torsten Albrecht hat erst im Januar 2020 seine Stelle antreten können) den Meilenstein M CC.1-12 („Erfolgreiche Implementierung von PICO als ‚pop-up‘-Modell, um das Zusammenwachsen oder Verschwinden von Schelfeisen simulieren zu können“) zeitgerecht am 31.03.2021 (M18) erreicht. Auch die Deliverable D CC.1-6 („Beschreibungspaper zu PISM-PICO für Paläo-Anwendungen“) wurde fristgerecht am 30.09.2021 (M24) abgeliefert. Zusammen mit WP1.4 (v.a. mit Dr. Willem Huiskamp und Moritz Kreuzer, TP2) hat Dr. Albrecht an der Kopplung von PISM-PICO mit dem

Ozeanmodell MOM gearbeitet und Wechselwirkungen auf Jahrtausendzeitskalen untersucht.

Ebenfalls in enger Zusammenarbeit mit dem WP1.4 (v.a. mit Dr. Meike Bagge und Dr. Volker Klemann, TP1) hat Dr. Torsten Albrecht intensiv an der Kopplung von PISM-PICO mit dem Modell der festen Erde, VILMA, gearbeitet. Mit dem gekoppelten PISM-PICO-VILMA Modellsystem haben wir Simulationen über die letzten beiden Galzialszyklen durchgeführt, technische Parameter und Unsicherheiten in der 3D-Erdstruktur untersucht, sowie Rückkopplungsmechanismen an der sich ausdehnenden und sich zurückziehenden Aufsetzlinie (Trippelpunkt zwischen Eis, Ozean und Erdboden) beschrieben. Dabei gab es einige technische, familiäre und Corona-bedingte Verzögerungen. Mit einer kostenneutralen Verlängerung konnte die letzte Deliverable D CC.1-7 (*Studie zur Simulation des letzten Eiszeitzyklus mit PISM und dem PICO "pop-up"-Modell*) zum 30.12.2023 (M36) abgeschlossen werden.

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

Die Eisdynamikgruppe am PIK ist seit über 17 Jahren gemeinsam mit Kollegen an der University of Alaska, Fairbanks (UAF) an der Entwicklung des **Parallel Ice Sheet Models (PISM)**, insbesondere für Anwendungen in der Antarktis, maßgeblich beteiligt (z.B., Winkelmann et al., 2011; Albrecht et al., 2011; Albrecht et al., 2020a,b; Zeitz et al., 2021; Garbe et al., 2023). PISM ist offen verfügbar ([www.pism.io](http://www.pism.io)) - das Modell ist thermodynamisch gekoppelt und beschreibt alle wesentlichen Prozesse im Eis auf einem regulären Gitter - für Anwendungen in der Antarktis werden typischerweise horizontale Auflösungen zwischen 4km und 16km verwendet. Dr. Torsten Albrecht ist einer der Hauptentwickler des Modells, insbesondere für Anwendungen von PISM im antarktischen Eisschild- und Eisschelfsystem, in dem Wechselwirkungen zwischen Eis und Ozean (inkl. Meeresspiegel) sowie zwischen Eis und fester Erde eine wesentliche Rolle spielen.

Das **Potsdam Ice shelf Cavity model (PICO)** wurde bereits in PalMod Phase I entwickelt und an das Eisschildmodell PISM gekoppelt. PICO berechnet Schmelzraten an der Unterseite der Eisschelfe in Abhängigkeit von Salinität und Temperatur der umgebenden Wassermassen. Dabei wird die typische Umwälzzirkulation in den Eisschelfkavernen abgebildet, was einen wesentlichen Fortschritt gegenüber anderen parametrisierten Ansätzen bedeutet. Somit füllt PICO die Lücke zwischen sehr rechenintensiven Modellen, die die Gesamtdynamik des Ozeans in den Kavernen auflösen, und stark vereinfachten Parametrisierungen. In PalMod Phase I konnte gezeigt werden, dass PICO die große Bandbreite von Schmelzraten der heutigen antarktischen Eisschelfe, mit den höchsten Schmelzraten in der Amundsen-Region, qualitativ gut abbildet (Reese et al., 2018). In Zusammenarbeit mit dem EU Horizon 2020 Projekt TiPACCs konnten die PICO Parameter nicht nur für mittlere beobachtete Schmelzraten sondern auch für regionale Schmelzsensitivitäten unter Erwärmung systematisch eingestellt werden (Reese et al., 2023).

## I.5 Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums

Das Teilprojekt TP4 hat sich mit allen Verbundpartnern in regelmäßigen Treffen ausgetauscht und gemeinsam wissenschaftliche Fragestellungen und Ansätze entwickelt sowie die Ergebnisse analysiert.

Auch im gesamten PalMod-II Konsortium gab es einen lebhaften Austausch, insbesondere mit WG1.4 bei der Kopplung zwischen PISM-PICO und VILMA sowie bei der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen den Eisschelfen und dem Südlichen Ozean (PISM-PICO-MOM, FOCI) war dieser Austausch sehr wertvoll und resultierte in mehreren gemeinsamen Publikationen und Manuskripten.

Außerdem hat TP4 bei der Interpretation der Erdsystemmodell (ESM) - Ergebnisse aus Working Groups 1--3 als auch zu technischen und numerischen Fragestellungen unterstützt. Während der Projektlaufzeit haben alle Projektmitglieder aktiv an den PalMod-übergreifenden Meetings teilgenommen und mehrere Fokus-Workshops zur Antarktis organisiert und geleitet. Ricarda Winkelmann ist zudem Mitglied der Scientific Steering Group. Darüber hinaus wirken die Ergebnisse aus PalMod auch in den internationalen Kontext hinein (beispielsweise über enge Kollaborationen mit der University of Alaska Fairbanks (UAF) und dem Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), in mehreren Konsortien wie der Earth Commission, SCAR-INSTANT, SCAR-FRISP sowie in mehreren Modell-vergleichsprojekten wie dem Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) oder dem Tipping Point Modeling Intercomparison Project (TIPMIP).

## 1. Aufgabenstellung / Ziel des Projekts

Ziel des Projektes war es, die Weiterentwicklung der gekoppelten Erdsystemmodell zu unterstützen. Im TP4 wurde dabei vor allem das Eis-Ozean-Interaktionsmodul PICO weiterentwickelt, um es für auf glazialen Zeitskalen sich erheblich verändernde Schelfeis- und Kavernegeometrien flexibler zu machen und für verschiedene Anwendungen (Antarktis, Nordhemisphäre) generalisiert physikalisch sinnvolle Schmelzraten abschätzen zu können.

## 2. Aufzählung der wichtigsten Projektergebnisse

- Kopplung von Eisschild-Modell PISM mit Ozean-Modell MOM über Eiskavernen-Modell PICO (Kreuzer et al. 2021)
- Sensitivitätsexperimente des gekoppelten PISM-PICO-MOM Systems in transienten Simulationen (Kreuzer et al., in Vorb.): In hohen Emissions-Szenarien zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang von erhöhter basaler Eisschmelze in den antarktischen Ozean-Kavernen und einem davon abhängigen Anstieg der lokalen Ozeantemperaturen, der zu selbstverstärkenden Rückkopplungsprozessen führen kann.
- Evaluierung des Einflusses der Ozeanvariabilität im südlichen Ozean auf die Schmelzraten der antarktischen Eisschelfe und den daraus resultierenden Eisfluss über die Aufschwimmlinie, sowie umgekehrt, des Einflusses der Süßwassereinträge durch erhöhtes basales Schmelzen auf die Ozeanströmungen, basierend auf Simulationen mit PICO und dem wirbelauflösenden Ozeanmodells FOCI (WG1.4)
- Optimierung von PISM-PICO Parametern mit beobachteten Schmelz(änderungs)raten (Reese et al., 2023), sowie Generalisierung und Evaluierung der PICO Grundgleichungen
- Verbesserung der Skalierbarkeit von PISM-PICO auf Hochleistungsrechnern. Charakterisierung der Schmelzraten der antarktischen Eisschelfe im letzten glazialen Maximum, in der heutigen Konfiguration und in Zukunftsprojektionen (Albrecht et al., 2020a,b; Kreuzer et al., 2021, Johnson et al., 2023; Seroussi et al., 2023; Chandler et al., 2023)
- Kopplung von PISM-PICO mit VILMA (WG1.4), Durchführung von Sensitivitätsstudien (zwei Eiszeitzyklen) mit dem gekoppelten Eis-Erde Modellsystem mit verschiedenen 1D und 3D-Erdstrukturen (Albrecht et al., unter Begutachtung)
- Evaluierung von potentiellen ozeanischen Gateways, über die warmes, modifiziertes zirkumpolares Tiefenwasser in antarktische Schelfeiskavernen gelangen könnte (Nicola et al., unter Begutachtung)

- Abschätzung der potentiellen Wechselwirkung von Meeresspiegel und Schelfeisschmelze (PICO) durch Änderung der Wassertiefe in Folge von *Glacial Isostatic Adjustment* (GIA)-Effekten (VILMA), die den Zugang wärmerer Wassermassen zur Aufschwimmlinie (über ozeanische Gateways) erschweren oder erleichtern könnten (Kreuzer et al., unter Begutachtung)
- Die Erweiterungen und Anpassungen in PISM-PICO, die interaktive Kopplung mit dem Erdmodell VILMA, sowie die gewonnenen Erkenntnisse aus der Kopplung mit dem Ozeanmodell MOM5/6 und der Wechselwirkung mit FOCI bedeuten einen wesentlichen Fortschritt zur adäquaten Simulation paläoklimatischer Szenarien und sind demnach für das Gesamtprojekt PalMod von hoher Bedeutung. Sämtliche Entwicklungen fließen in die geplanten transienten Läufe von PalMod Phase III ein.
- Basierend auf unserem Verständnis der Eisschilde als Kippelemente im Klimasystem (Garbe et al., 2020; Armstrong McKay et al., 2022) wurden die Interaktionen zwischen den Eisschilden über Ozean, Atmosphäre und feste Erde und ihre langfristigen Auswirkungen besser verstanden.
- Die gewonnenen Erkenntnisse sind auch über PalMod hinaus von großer Relevanz. Dies zeigt sich an den vielen Kooperationen (z.B. mit KollegInnen am GEUS, Kopenhagen, an der UAF und der Columbia University, USA; in Horizon 2020-Projekten TiPAC-Cs, PROTECT, und Horizon Europe-Projekt OCEAN:ICE; in übergreifenden Kontexten z.B. Earth Commission, SCAR-INSTANT, SCAR-FRISP; in Modellvergleichsprojekten wie ISMIP6, TIPMIP (u.v.a. MIPs); sowie der Nutzung des entsprechenden Codes in anderen Modellen (z.B. MPI-ESM und AWI-ESM) und dem großen medialen Interesse (z.B. The Guardian, Daily Mail, Science News, Mongabay, Carbon Brief, Der SPIEGEL, Der Standard etc.).

## II. Eingehende Darstellung

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

Ziel des Projektes ist es, das PICO Eisschelfschmelzmodul weiterzuentwickeln, um es flexibler zu machen für Simulationen verschiedener mariner Eisschilde über glazialen Zeitskalen, um somit wichtige Prozesse und Wechselwirkungen zwischen dem Eisschild, Eisschelfen, Ozean und der festen Erde zu untersuchen. Dabei war Teilprojekt TP4 federführend an den Arbeitspaketen (Tasks) T CC.1-21, T CC.1-22, T CC.1-23 und T CC.1-24 sowie den Meilenstein M CC.1-12 und Deliverables D CC.1-6 und D CC.1-7 beteiligt.

Aufgabe / Meilenstein / Deliverable	Beschreibung	Haupt- und Kooperationspartner	PM (am PIK), Abschlussdatum
<b>Task CC.1-21</b>	Implementierung der PICO-Erweiterung, um das Zusammenwachsen oder Verschwinden von Schelfeisen bei Rückzug und Vorschieben der Aufschwimmlinie modellieren zu können	<b>PIK</b> , GFZ (WG1.4)	1-18
<b>Task CC.1-22</b>	Untersuchung der Sensitivität von PICO gegenüber bestimmter Modellparameter in idealisierten Experimenten eines marinen Eisschild/Schelfeis-Systems	<b>PIK</b>	10-18
<b>Task CC.1-23</b>	Konfiguration von PICO für die Nordhemisphäre (in Kooperation mit WP1.2)	<b>PIK</b> , MPI-M (WG1.2), AWI (WG1.2)	7-21
<b>Task CC.1-24</b>	Transiente Simulationen des letzten glazialen Zyklus mit PISM und dem erweiterten PICO Modell.	<b>PIK</b>	16-36
<b>M CC.1-12</b>	Erfolgreiche Implementierung von PICO als „pop-up“-Modell, um das Zusammenwachsen oder Verschwinden von Schelfeisen simulieren zu können	<b>PIK</b>	18 31.03.2021

<b>D CC1-6</b>	Beschreibungspaper zu PISM-PICO für Paläo-Anwendungen	<b>PIK</b>	24 30.09.2023
<b>D CC.1-7</b>	Studie zur Simulation des letzten Eiszeitzyklus mit PISM und dem PICO "pop-up"-Modell	<b>PIK,</b> GFZ (WG1.4)	36 30.12.2023

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse aus dem Projekt näher beschrieben:

### **Aufsetzen eines hochauflösenden Schelfeiskavernenmodells (PISM-PICO):**

PICO wurde bereits in PalMod Phase I als Modul in PISM implementiert und dient als Kopppler zwischen Eisschild- und Ozeanmodellen, bzw. Ozeanrandbedingungen auf dem Kontinentalschelf. In **Task CC.1-21** (Implementierung der PICO-Erweiterung, um das Zusammenwachsen oder Verschwinden von Schelfeisen bei Rückzug und Vorschieben der Aufschwimmlinie modellieren zu können) hat in PalMod Phase II hat Dr. Torsten Albrecht PICO so weiterentwickelt, dass es mit neu entstehenden, sich teilenden oder sich verbindenden Schelfeisen sinnvoll umgehen kann und auch die potentiellen Einflüsse des Ozeans adäquat berücksichtigt. Basierend auf den Grenzen von Eisflusseinzugsgebieten (Bassins) werden in jedem Zeitschritt Schelfeisinstanzen nach ozeanischen Inputs zuordnet und unterteilt (d.h. jedes Schelfeis erhält eine eigene Nummer). Dies ist insbesondere auf Paläozeitskalen relevant, da hier große Schelfeise entstehen und wieder verschwinden können, beispielsweise beim Kollaps des Westantarktischen Eisschildes. Wenn also ein Schelfeis Bassingrenzen kreuzt, detektiert PICO all jene Bassins, in denen das Schelfeis eine Verbindung zum Ozean hat, so dass auch nur diese im flächengewichteten Mittel über potentielle Ozeanantriebe berücksichtigt werden. Sind diese Bassins keine Nachbarn entlang der Küste, dann wird das Schelfeis in zwei separate Instanzen unterteilt, mit unterschiedlichen Ozeaneinflussgebieten. Der entsprechende veränderte Modellcode für PICO wurde in das main PISM repository begutachtet und eingepflegt und steht ab Modellversion PISM v.2.0 zur Verfügung. **Milestone M12 (Successful implementation of PICO as "pop-up" model to account for merging and vanishing ice shelves) wurde daher fristgerecht bis zum 30.03.2021 erledigt.**

PICO wurde in PISM Antarktis Simulationen über die letzten beiden Glazialzyklen verwendet und in einem Paper (Albrecht et al., 2020a) zusammen mit anderen klimatischen Randbedingungen und Parameterkonfiguration beschrieben. **Damit wurde auch die Deliverable D CC.1-6 (Beschreibungspaper zu PISM-PICO für Paläo-Anwendungen) zum 30.09.2023 erfüllt.**

### **Verbesserung der Schmelzphysik in PISM-PICO:**

Für **Task CC.1-22** (Untersuchung der Sensitivität von PICO gegenüber bestimmter Modellparameter in idealisierten Experimenten eines marinen Eisschild/Schelfeis-Systems) wurde an einer noch realistischeren Schmelzphysik in PICO weiter gearbeitet, in Kollaboration mit Ronja Reese (EU-H2020 project TiPACCs) und Adrian Jenkins (UK). Darin wurde das zu-Grunde-liegenden schmelzphysikalische Gleichungssystem nach neusten Erkenntnissen vereinfacht und in eine analytisch lösbare kubische Gleichung überführt. Erste Tests zeigten eine quadratische Temperaturabhängigkeit der Schmelzraten und eine größere Variabilität in den Schmelzraten abhängig von topografischen und klimatischen Eigenschaften. Der Code wurde allerdings noch nicht in PISM implementiert, da Dr. Ronja Reese eine neue Position an der Northumbria University antrat und zunächst mit anderen Aufgaben betraut wurde. Dennoch konnten mit diesen neuen Erkenntnissen relevanten Parameter von PICO neu eingestellt werden, so dass es nicht nur beobachtete mittlere Schmelzraten besser reproduziert, sondern auch Schmelzratensensitivitäten für sich verändernde Ozeantemperaturen (Reese et al., 2023).

Zur Verbesserung der Skalierbarkeit von PISM-PICO auf Hochleistungsrechnern konnte in Zusammenarbeit mit Enrico Degregori (DKRZ, ebenfalls in CC.1), sowie mit KollegInnen der Universität Stuttgart (Alexander van Craen) und der University of Alaska, Fairbanks, USA (Constantine Khroulev) wesentliche Nadelöhre identifiziert und an der Laufzeitoptimierung gearbeitet werden. Diese Optimierung wird derzeit auch in Zusammenarbeit mit der nationalen Erdsystemmodellinitiative (natESM), insbesondere für hochaufgelöste Anwendungen weiter vorangetrieben.

### **Anwendung von PISM-PICO für Eisschilde der Nordhemisphäre:**

Für **Task CC.1-23** (Konfiguration von PICO für die Nordhemisphäre (in Kooperation mit WP1.2) haben wir in der Arbeitsgruppe am PIK Erfahrungen mit PISM-PICO für Anwendungen in Grönland gemacht (Zeitze et al., 2022) und auch mit KollegInnen am „Geological Survey of Denmark and Greenland“ (GEUS) im Rahmen eines Workshops diskutiert. Für eine mögliche Erweiterung auf die gesamte Nordhemisphäre standen wir in Erfahrungsaustausch mit WP1.2 (z.B. Paul Gierz, Sebastian Beyer, Clemens Schannwell, Gerrit Lohmann). Allerdings verwendet MPI-ESM noch nicht die aktuelle PISM Versionen mit der PICO Erweiterung, die CESM-PISM Kopplung wurde pausiert und AWI-ESM verwendet mittlerweile ein Kavernen-auflösendes Ozeanmodell, so dass bisher keine entsprechende Neukonfiguration der PICO Parameter gebraucht wurde.

## **Wechselwirkungen zwischen dem Antarktischen Eisschild, -schelfen und dem globalen Ozean (PISM-PICO-MOM, PISM-PICO-FOCI):**

PISM-PICO wurde in Zusammenarbeit mit den KollegInnen Moritz Kreuzer und Dr. Willem Huiskamp aus WG1.4 (TP2, Task T1.4-2: Aufsetzen eines hochauflösenden Schelfeiskavernenmodells) erfolgreich mit dem Ozeanmodell MOM gekoppelt und in einem Beschreibungspaper ausführlich dokumentiert (Kreuzer et al., 2021). Mit dem gekoppelten PISM-PICO-MOM wurden physikalische Sensitivitätsexperimente durchgeführt, in denen der Fokus auf Rückkopplungen zwischen Eis und Ozean lag. Die Kopplung wurde seit der Publikation des Beschreibungspapers in wesentlichen Punkten verfeinert und weiterentwickelt. Eine wichtige Erweiterung der Kopplung ist die Implementierung des Meeresspiegel-Antriebs vom Ozean in Interaktion mit dem Eismodell. Damit können die Auswirkungen auf die Eisdynamik durch eine Veränderung des lokalen Meeresspiegels nun realistisch in PISM-PICO abgebildet werden. Eine weitere wichtige Weiterentwicklung ist die kopplungsübergreifende Massenbilanzierung, welche einen konsistenten Masseaustausch zwischen Eis und Ozean erlaubt. Die vorherige Kopplungsversion war zwar masseerhaltend, erlaubte aber keine Akkumulation von erhöhter Eisschmelze im Ozean, was einen konstanten Meeresspiegel zur Folge hatte. Desweiteren kann der Schmelzfluss nun für jedes Eisschild-Bassin in unterschiedlichen Tiefen des Ozeanmodells verteilt werden, zum Beispiel in Abhängigkeit von der Schelfeisunterkante, anstatt wie gewöhnlich an der Meeresoberfläche.

## **Wechselwirkungen zwischen Eis und fester Erde (PISM-PICO-VILMA):**

In Zusammenarbeit mit den KollegInnen Dr. Meike Bagge und Dr. Volker Klemann aus WG1.4 (TP1) konnte im Rahmen von Task T1.4-1 (Verfeinerung des 3-D viskoelastischen Modells VILMA zur Nutzung in GCMs und Analyse kleinskaliger, transienter Prozesse) konnte Dr. Torsten Albrecht maßgeblich die Kopplung von VILMA mit PISM-PICO vorantreiben.

Dabei wurden zahlreiche Sensitivitätsstudien durchgeführt, um beispielsweise Effekte der Erdstruktur und der Modellauflösung zu untersuchen. Dies sind wichtige Bausteine, um auch lokale Anomalien der Erdstruktur, besonders im elastischen Anteil, näher zu untersuchen, was unter anderem im Amundsen-Sektor hinsichtlich der vergangenen und aktuellen Veränderungen von großer Relevanz ist. Der Kopplungscode wurde überarbeitet um damit eine Integration in die ESM-Tools technisch zu erleichtern. Dies wurde in einem Workshop (koordiniert von Hendryk Bockelmann, DKRZ, ebenfalls CC.1) im April 2022 diskutiert.

Mit den Änderungen des relativen Meeresspiegels (und damit der Wassertiefe) aus den gekoppelten PISM-PICO-VILMA Simulationen lässt sich abschätzen, inwieweit ozeanische Gateways (Nicola et al., unter Begutachtung) sich verändern (beispielsweise unter Bedingungen des letzten glazialen Maximums (LGM) oder im eisfreien Zustand als Extrema). Dies hat direkten Einfluss auf das Potential von Warmwassereinflüssen (in Tiefen von wenigen 100m) in die Schelfeiskavernen, und damit die basalen Schmelzraten und den Eisfluss über die Auf-

schwimmlinien. Diese Abschätzung unterstreicht die Abhängigkeit der Schmelzraten von Meeresspiegelveränderungen und Bodenhebungen (und damit die Relevanz der Kopplung der beiden Modellkomponenten MOM und VILMA; Kreuzer et al., unter Begutachtung).

Im Rahmen von **T CC.1-24** (Transiente Simulationen des letzten glazialen Zyklus mit PISM und dem erweiterten PICO Modell) ist eine umfangreiche Beschreibung der PISM-PICO-VILMA Kopplung entstanden, sowie gekoppelte Simulationen der Wechselwirkungen zwischen der Eisschilddynamik in der Antarktis und dem globalem Meeresspiegel über die letzten beiden Eiszeitzyklen (Albrecht et al., unter Begutachtung), womit **Deliverable D CC.1-7 (Studie zur Simulation des letzten Eiszeitzyklus mit PISM und dem PICO "pop-up"-Modell)** ebenfalls erfolgreich abgeschlossen wurde.

## 2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die getätigten Ausgaben wurden ausschließlich für Personal, Publikationen und Reisen zu Projekttreffen aufgewendet, sowie zur Teilnahme an Konferenzen und Workshops (EGU22, IUGG23, esm-tools), die teilweise online erfolgten (EGU20, FRISP20, EGU21). Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung des PIK.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung des Teilprojektziels – der Weiterentwicklung des PISM-PICO Schmelzmoduls zur Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen dem Antarktischen Eisschild und seinen Schelfeisen und dem globalen Ozean sowie der festen Erde – unbedingt notwendig und wären ohne die Förderung des BMBF nicht umsetzbar gewesen. Die Projektmittel wurden ausschließlich für die im Projektantrag geplanten bzw. in den Einzelberichten genannten Arbeiten eingesetzt, und die entsprechenden Arbeiten erfolgreich abgeschlossen.

Für das PalMod Hauptprojektziel, der Simulation des letzten Eiszeitzyklus unter Berücksichtigung ebenjener Wechselwirkungen, sind diese Arbeiten eine wichtige Grundlage.

Die im Rahmen des Teilprojekts entwickelten Modellerweiterungen konnten von Projektpartnern in den jeweiligen ESMs adaptiert werden und liefern somit auch eine wichtige Grundlage für die geplanten Anwendungen in PalMod Phase III.

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

Unsere Arbeiten liefern einen detaillierten Einblick in die Interaktionen und Rückkopplungen zwischen dem Antarktischen Eisschild, dem südlichen Ozean und der festen Erde. Der daraus entstandene Erkenntnisgewinn mit Hinblick auf mögliche Kippmechanismen und Schwellenwerte, Meeresspiegelveränderungen und Rückkopplungen auf das globale Klima sind von breiter gesellschaftlicher und politischer Relevanz.

Die Modellentwicklungen und die auf ihrer Basis gewonnenen Erkenntnisse werden innerhalb der PalMod Modellstrategie nutzbar gemacht und Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Alle Ergebnisse werden in international begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften beschrieben, sowie die Daten öffentlich zugänglich publiziert. Eine Fortführung mit den erforderlichen Mitteln in PalMod Phase III wird den Fokus auf Anwendungen und Ergebnisinterpretation setzen, insbesondere auf Kippmechanismen in Zukunftsszenarien.

Ein direkter wirtschaftlicher Nutzen ist nicht zu erwarten, da das Teilprojekt und der Verbund auf Grundlagenforschung abzielt.

## 5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Aussagen des jüngsten Sachstandsbericht des IPCC (AR6) zur zukünftigen Entwicklung des globalen Klimas und Meeresspiegelanstiegs basieren hauptsächlich auf Simulationen, in denen Eisschilde und Schelfeise (noch) nicht dynamisch mit den anderen Teilen des Erdsystems gekoppelt sind. Die in PalMod erzielten Ergebnisse zur Kopplung und zum Verständnis der Interaktionen zwischen Eis, Ozean und fester Erde stellen also einen wichtigen Beitrag für diese gesellschaftlich hochrelevanten Fragestellungen dar.

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in der Kopplung von hochauflösenden Eis- und Ozeanmodellen erzielt, welche die Dynamik in den Schelfeis-Kavernen detailliert abbilden (z.B. FESOM-PISM, Timmermann & Göller et al. 2017; Úa-MITgcm, Naughten et al., 2021). Diese Modelle sind allerdings extrem rechenintensiv. Um beispielsweise Kippprozesse besser zu charakterisieren, braucht es hingegen viele Simulationen über längere Zeitskalen, und dabei füllt das erweiterte Box-Modell PICO eine entscheidende Nische, da es typische Schmelzmuster reproduziert, dabei aber die Ozeandynamik in der Schelfeiskaverne stark reduziert abbildet, wodurch die benötigte Rechenzeit sehr begrenzt bleibt (Reese et al., 2018). Ähnliche, teils auf PICO aufbauende Ansätze legen zusätzlich Wert auf subglaziale Schmelzwasserquellen (z.B. PLUME, Lazeroms et al., 2018; PICOP, Pelle et al., 2019, Burgard et al., 2022). Großes Potenzial haben auch neue Methoden auf Basis von künstlicher Intelligenz (z.B. deep-learning MELTNET, Rosier et al., 2023).

Die Schmelzphysik von PICO wird derzeit weiter optimiert und relevante Parameter entsprechend der Anwendungen angepasst. PICO wird bereits im Rahmen von Erdsystemmodellen außerhalb PalMods verwendet (z.B. EC-Earth). Es ist als physikalisches Verbindungselement im besonderen Maße dazu geeignet, eine recheneffiziente Modellkopplung zwischen den vorherrschenden Bedingungen im Ozean und dem Schmelzen im Schelfeis, und damit der Eisschilddynamik, herzustellen. Die von uns entwickelte bidirektionale Kopplung von PISM und MOM via PICO (Kreuzer et al., 2021) ist sehr flexibel und kann gut für die PalMod-ESMs (und darüber hinaus für andere Eis-Ozean-Modellkomponenten) angepasst werden.

## 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

### Publikationen in Fachzeitschriften:

Beschreibung von PISM-PICO in Kopplung zum Ozeanmodell MOM:

- M. Kreuzer, R. Reese, **W. N. Huiskamp**, S. Petri, **T. Albrecht**, G. Feulner and **R. Winkelmann**; *Coupling framework (1.0) for the PISM (1.1.4) ice sheet model and the MOM5 (5.1.0) ocean model via the PICO ice shelf cavity model in an Antarctic domain*; *Geoscientific Model Development* (2021), 14, 3697–3714, 10.5194/gmd-14-3697-2021

Anwendung von PISM-PICO in hochaufgelösten Ensemblesimulationen in der Weddell Sea:

- A. Johnson, A. Aschwanden, **T. Albrecht** and R. Hock; *Range of 21st century ice mass changes in the Filchner-Ronne region of Antarctica*; *Journal of Glaciology* (2023), FirstView, pp. 1-11, DOI:10.1017/jog.2023.10

Antarktis-Projektionen für ISMIP6 mit PISM-PICO:

- H. Seroussi, S. Nowicki, A. J. Payne, H. Goelzer, W. H. Lipscomb, A. Abe-Ouchi, C. Agosta, **T. Albrecht**, X. Asay-Davis, A. Barthel, R. Calov, R. Cullather, C. Dumas, B. K. Galton-Fenzi, R. Gladstone, N. R. Golledge, J. M. Gregory, R. Greve, T. Hatterman, M. J. Hoffman, A. Humbert, P. Huybrechts, N. C. Jourdain, T. Kleiner, E. Larour, G. R. Leguy, D. P. Lowry, C. M. Little, M. Morlighem, F. Pattyn, T. Pelle, S. F. Price, A. Quiquet, R. Reese, N.-J. Schlegel, A. Shepherd, E. Simon, R. S. Smith, F. Straneo, S. Sun, L. D. Trusel, J. Van Breedam, R. S. W. van de Wal, **R. Winkelmann**, C. Zhao, T. Zhang and T. Zwinger; "ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21st century." *The Cryosphere* 14, no. 9 (2020): 3033-3070. DOI: 10.5194/tc-14-3033-2020
- Edwards, T. L., Nowicki, S., Marzeion, B., Hock, R., Goelzer, H., Seroussi, H., Jourdain, N. C., Slater, D. A., Turner, F. E., Smith, C. J., McKenna, C. M., Simon, E., Abe-Ouchi, A., Gregory, J. M., Larour, E., Lipscomb, W. H., Payne, A. J., Shepherd, A., Agosta, C., Alexander, P., **Albrecht, T.**, Anderson, B., Asay-Davis, X., Aschwanden, A., Barthel, A., Bliss, A., Calov, R., Chambers, C., Champollion, N., Choi, Y., Cullather, R., Cuzzone, J., Dumas, C., Felikson, D., Fettweis, X., Fujita, K., Galton-Fenzi, B. K., Gladstone, R., Golledge, N. R., Greve, R., Hattermann, T., Hoffman, M. J., Humbert, A., Huss, M., Huybrechts, P., Immerzeel, W., Kleiner, T., Kraaijenbrink, P., Le clec'h, S., Lee, V., Leguy, G. R., Little, C. M., Lowry, D. P., Malles, J.-H., Martin, D. F., Maussion, F., Morlighem, M., O'Neill, J. F., Nias, I., Pattyn, F., Pelle, T., Price, S., Quiquet, A., Radić, V., Reese, R., Rounce, D. R., Rückamp, M., Sakai, A., Shafer, C., Schlegel, N.-J., Shannon, S., Smith, R. S., Straneo, F., Sun, S., Tarasov, L., Trusel, L. D., Breedam, J. V., van de Wal, R., van den Broeke, M., **Winkelmann, R.**, Zekollari, H., Zhao, C., Zhang, T., Zwinger, T.; Pro-

jected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise; *Nature* (2021), 593, 74–82, DOI:10.1038/s41586-021-03302-y

- A. J. Payne, S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, C. Agosta, P. M. Alexander, **T. Albrecht**, X. Asay-Davis, A. Aschwanden, A. Barthel, T. J. Bracegirdle, R. Calov, C Chambers, Y. Choi, R. I. Cullather, J. K. Cuzzone, C. Dumas, T. Edwards, D. Felikson, X. Fettweis, B. K. Galton-Fenzi, H. Goelzer, R. Gladstone, N. R. Golledge, J. M. Gregory, R. Greve, T. Hattermann, M. J. Hoffman, A. Humbert, P. Huybrechts, N. C. Jourdain, T. Kleiner, P. Kuipers Munneke, E. Y. Larour, S. Le clec'h, V. Lee, G. Leguy, W. H. Lipscomb, C. M. Little, D. P. Lowry, M. Morlighem, I. Nias, F. Pattyn, T. Pelle, S. Price, A. Quiquet, R. Reese, M. Rückamp, N.-J. Schlegel, H. Seroussi, A. Shepherd, E. Simon, D. A Slater, R. Smith, F. Straneo, S. Sun, L. Tarasov, L. Trusel, J. Van Breedam, R. S. W. van de Wal, M. R. van den Broeke, **R. Winkelmann**, C. Zhao, T. Zhang, T. Zwinger; *Future sea level change under CMIP5 and CMIP6 scenarios from the Greenland and Antarctic ice sheets*; *Geophysical Research Letters* (2021), 48 (16), DOI:10.1029/2020GL091741
- H. Seroussi, V. Verjans, S. Nowicki, A. J. Payne, H. Goelzer, W. H. Lipscomb, A. Abe-Ouchi, C. Agosta, **T. Albrecht**, X. Asay-Davis, A. Barthel, R. Calov, R. Cullather, C. Dumas, B. K. Galton-Fenzi, R. Gladstone, N. R. Golledge, J. M. Gregory, R. Greve, T. Hatterman, M. J. Hoffman, A. Humbert, P. Huybrechts, N. C. Jourdain, T. Kleiner, E. Larour, G. R. Leguy, D. P. Lowry, C. M. Little, M. Morlighem, F. Pattyn, T. Pelle, S. F. Price, A. Quiquet, R. Reese, N.-J. Schlegel, A. Shepherd, E. Simon, R. S. Smith, F. Straneo, S. Sun, L. D. Trusel, J. Van Breedam, P. Van Katwyk, R.S. W. van de Wal, R. Winkelmann, C. Zhao, T. Zhang, and T. Zwinger; *Insights into the vulnerability of Antarctic glaciers from the ISMIP6 ice sheet model ensemble and associated uncertainty* ; *The Cryosphere* (2023), 17, 5197–5217, DOI:10.5194/tc-17-5197-2023
- R. Reese, A. Levermann, **T. Albrecht**, H. Seroussi and **R. Winkelmann**, „The role of history and strength of the oceanic forcing in sea-level projections from Antarctica with the Parallel Ice Sheet Model“; *The Cryosphere* (2020), 14, 3097–3110, DOI: 10.5194/tc-14-3097-2020
- Reese, R., Garbe, J., Hill, E. A., Urruty, B., Naughten, K. A., Gagliardini, O., Durand, G., Gillet-Chaulet, F., Gudmundsson, G. H., Chandler, D., Langebroek, P. M., and **Winkelmann, R.**: *The stability of present-day Antarctic grounding lines – Part 2: Onset of irreversible retreat of Amundsen Sea glaciers under current climate on centennial timescales cannot be excluded*, *The Cryosphere* (2023), 17, 3761–3783, DOI: 10.5194/tc-17-3761-2023

Anwendung von PISM-PICO in Grönland:

- M. Zeitz, J. M. Haacker, J. F. Donges, **T. Albrecht and R. Winkelmann**; *Dynamic regimes of the Greenland Ice Sheet emerging from interacting melt-elevation and*

glacial isostatic adjustment feedbacks; *Earth System Dynamics* (2022), 13, 1077–1096, DOI:10.5194/esd-13-1077-2022

- Zeitz, M., R. Reese, J. Beckmann, U. Krebs-Kanzow, and **R. Winkelmann**: Impact of the melt-albedo feedback on the future evolution of the Greenland Ice Sheet with PISM-dEBM-simple, *The Cryosphere* (2021), DOI: 10.5194/tc-15-5739-2021.

Anwendung von PISM-PICO auf Paläozeitskalen in Antarktis-Simulationen:

- **T. Albrecht, R. Winkelmann** and A. Levermann; „Glacial-cycle simulations of the Antarctic Ice Sheet with the Parallel Ice Sheet Model (PISM) – Part 1: Boundary conditions and climatic forcing“; *The Cryosphere* (2020), 14, 599–632, DOI: 10.5194/tc-14-599-2020
- **T. Albrecht, R. Winkelmann** and A. Levermann, „Glacial-cycle simulations of the Antarctic Ice Sheet with the Parallel Ice Sheet Model (PISM) – Part 2: Parameter ensemble analysis“; *The Cryosphere* (2020), 14, 633–656, DOI: 10.5194/tc-14-633-2020

Hysterese des Antarktischen Eisschildes:

- J. Garbe, **T. Albrecht**, A. Levermann, J. F. Donges and **R. Winkelmann** "The Hysteresis of the Antarctic Ice Sheet"; *Nature* (2020), 585, 538-544, DOI: 10.1038/s41586-020-2727-5

unter Begutachtung:

- **Albrecht, T.**, Bagge, M., Klemann, V, *Feedback mechanisms controlling Antarctic glacial cycle dynamics simulated with a coupled ice sheet-solid Earth model, in review for The Cryosphere, DOI:10.5194/egusphere-2023-2990*
- Nicola, L., Reese, R., Kreuzer, M., **Albrecht, T. and R. Winkelmann.**, *Oceanic gateways to Antarctic grounding lines - Impact of critical access depths on sub-shelf melt, in review for The Cryosphere, DOI:10.5194/egusphere-2023-2583*
- Kreuzer, M., **Albrecht, T.**, Nicola, L. **and R. Winkelmann.**, *Oceanic gateways in Antarctica - Impact of relative sea level change on sub-shelf melt, in review for The Cryosphere, DOI:10.5194/egusphere-2023-2737*
- Chandler, D.M., Langebroek, P.M., Reese, R., **Albrecht, T.**, Garbe, J, and **R. Winkelmann**, *Antarctic Ice Sheet tipping in the last 800 kyr warns of future ice loss, in review DOI:10.21203/rs.3.rs-3042739/v1*

#### In Vorbereitung:

- Kreuzer, M., **Huiskamp, W., Albrecht, T., Petri, S., Reese, R., Feulner, G., and Winkelmann, R.**, *Interactive coupling of the Antarctic Ice Sheet and the global ocean on multi-millennial time scales*

#### Datenpublikationen:

- Albrecht, T (2022): PISM parameter ensemble analysis of Antarctic Ice Sheet glacial cycle simulations - additional data <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940149>
- Albrecht, T (2019): PISM glacial cycle sensitivity experiments of the Antarctic Ice Sheet <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.909727>
- Albrecht, T (2019): PISM parameter ensemble analysis of Antarctic Ice Sheet glacial cycle simulations <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.909728>
- Albrecht, Torsten. (2019). PISM ensemble scoring: Parameter ensemble analysis tools as used in Albrecht et al. (2020), The Cryosphere (v1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3585118>
- Albrecht, Torsten (2018): PISM simulation results of the Antarctic Ice Sheet deglaciation. GFZ Data Services <https://doi.org/10.5880/PIK.2018.008>
- Modellcode PISM: <https://github.com/pism/pism>

## Konferenzbeiträge:

- *FRISP Konferenz (erstmalig online) im Juni 2020,*
  - Organisationsteam: **R. Winkelmann**, R. Reese, **T. Albrecht**, A. Kliese de Souza, <https://eveeno.com/virtualFRISP2020>
- EGU General Assembly, online, 19.-30.04.2021
  - **Albrecht, T.**, Bagge, M., **Winkelmann, R.**, Klemann, V. 2021. Coupled solid Earth – Antarctic ice sheet simulations with VILMA and PISM. EGU General Assembly 2021, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8050> (virtual pico)
  - Kreuzer, M., Reese, R., Huiskamp, W., Petri, S., **Albrecht, T.**, Feulner, G., and **Winkelmann, R.**: First results from coupling the Parallel Ice Sheet Model with the Modular Ocean Model via an Antarctic ice-shelf cavity module, EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021, EGU21-6063, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6063> (virtual pico)
  - **Ricarda Winkelmann** (CC.1, WP1.4) koorganisierte eine vEGU21-Session zum verbundübergreifenden Thema „Characterizing interactions between ice sheets, solid Earth and sea level by observations, data assimilation and coupled modelling“, in Zusammenarbeit mit Meike Bagge (WP1.4), **Torsten Albrecht** (CC.1), Evelyn Powell (Harvard Universität), Kira Rehfeld (CC.2)
- PalMod virtual General Assembly, online, 27.05.2021
  - **T. Albrecht, R. Winkelmann** and WP1.4 team; "Effects of ice-ocean-solid-Earth interactions on the long-term stability of the Antarctic Ice Sheet";
- EGU General Assembly, Wien, 23.-27.05.2022
  - **Albrecht, T., Winkelmann, R.**, Bagge, M., Klemann, V., Deglaciation of the Antarctic Ice Sheet modeled with the coupled solid Earth – ice sheet model system PISM-VILMA, EGU22, G3.3, 23.05.2022
  - Kreuzer, M., Huiskamp, W., **Albrecht, T.**, Petri, S., Reese, R., Feulner, G., and **R. Winkelmann**, Millennial-scale interactions of the Antarctic Ice Sheet and the global ocean, EGU22, OS1.11, 23.05.2022
  - Zeitz, M., Haacker, J. M., Donges, J. F., **Albrecht, T., and Winkelmann, R.**: Interacting melt-elevation and glacial isostatic adjustment feedbacks allow for distinct dynamic regimes of the Greenland Ice Sheet, EGU22, G3.3, 23.05.2022
  - Chandler, D., Langebroek, P., Reese, R., **Albrecht, T., and Winkelmann, R.**: Ocean temperature forcings in glacial-interglacial Antarctic Ice Sheet simulations, EGU22, CR1.4, 26.05.2022.
  - Creel, R., Austermann, J., Kopp, R., Khan, N., Ashe, E., Kingslake, J., and **Albrecht, T.**: Probabilistic Estimation of mid-Holocene global mean sea level, EGU22, CLO, 27.05.2022
- PalMod General Assembly, Travemünde, 16.–17.05.2022

- **Bagge, M., Klemann, V.,** Huang, P. Steinberger, B., Haeger, C., Boergens, E., Balidakis, K., **Albrecht, T, Winkelmann, R.** Solid Earth component in coupled Earth System Models.
- **Albrecht, T, Bagge, M.** Stability of the Antarctic Ice Sheet in interaction with the solid Earth, . (nominierter Highlight Talk)
- Kreuzer, M., Huiskamp, W., **Albrecht, T.,** Petri, S., Reese, R., Feulner, G., and **R. Winkelmann,** Coupling framework for simulating multi-millennial interactions of the Antarctic Ice Sheet and the global ocean.
- EGU General Assembly, Wien, 23.-28.04.2023
  - Kreuzer, M., Huiskamp, W., **Albrecht, T.,** Petri, S., Reese, R., Feulner, G., and **Winkelmann, R.:** Interactive coupling of the Antarctic Ice Sheet and the global ocean, EGU23-9449, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9449>, 2023.
  - Chandler, D., Langebroek, P., Reese, R., **Albrecht, T., and Winkelmann, R.:** Antarctic Ice Sheet tipping points in the last 800,000 years, EGU23-8341, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8341>, 2023.
  - **Ricarda Winkelmann** (CC.1, WP1.4) ko-organisierte drei EGU23-Session zu ITS2.1/NP0.4 Tipping points, resilience, and stochasticity in the Earth's climate and ecosystems, CL3.2.6 Earth resilience, tipping points and human-Earth system interactions in the Anthropocene und CR3.2 Ice-sheet and climate interactions und war Koautorin in mindestens 11 Konferenzbeiträgen
- IUGG 2023 - International Union of Geodesy and Geophysics, Berlin, 11.-20.07.2023
  - **T. Albrecht,** M. Bagge, **R. Winkelmann** & V. Klemann; Simulation of the Antarctic Ice Sheet over last glacial cycle with the coupled solid Earth – ice sheet model PISM-VILMA, JG01p-068
  - M. Bagge, E. Börgens, K. Balidakis, **T. Albrecht,** V. Klemann, H. Dobslaw, B. Steinberger, C. Haeger, Space geodetic data and validation method for global and regional glacial isostatic adjustment model optimization, IUGG23-2776
  - R. Reese, J. Garbe, E.A. Hill, B. Urruty, K.A. Naughten, O. Gagliardini, G. Durand, F. Gillet-Chaulet, G.H. Gudmundsson, D. Chandler, P.M. Langebroek, **R. Winkelmann,** Exploring the current and future stability of the Antarctic Ice Sheet, C04p-199
  - J. Feldmann, **R. Winkelmann,** A. Levermann, Hysteresis of idealized marine outlet glaciers under variation of pinning-point buttressing, IUGG23-0358
  - **R. Winkelmann,** When Giants Falter: Tipping Points in Greenland and Antarctica, Union Lecture

## Weitere im Text erwähnte Referenzen

**Albrecht, T.**, Martin, M., Haseloff, M., **Winkelmann, R.**, and Levermann, A.: Parameterization for subgrid-scale motion of ice-shelf calving fronts, *The Cryosphere*, 5, 35–44, <https://doi.org/10.5194/tc-5-35-2011>, 2011.

Armstrong McKay, D.I., Staal, A., Abrams, J.F., **Winkelmann, R.**, Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S.E., Rockström, J. and Lenton, T.M., 2022. Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611), p.eabn7950. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>

Burgard, C., Jourdain, N. C., Reese, R., Jenkins, A., and Mathiot, P.: An assessment of basal melt parameterisations for Antarctic ice shelves, *The Cryosphere*, 16, 4931–4975, <https://doi.org/10.5194/tc-16-4931-2022>, 2022.

Lazeroms, W. M. J., Jenkins, A., Gudmundsson, G. H., and van de Wal, R. S. W.: Modelling present-day basal melt rates for Antarctic ice shelves using a parametrization of buoyant meltwater plumes, *The Cryosphere*, 12, 49–70, <https://doi.org/10.5194/tc-12-49-2018>, 2018.

Naughten, K.A., De Rydt, J., Rosier, S.H.R. *et al.* Two-timescale response of a large Antarctic ice shelf to climate change. *Nat Commun* 12, 1991 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22259-0>

Pelle, T., Morlighem, M., and Bondzio, J. H.: Brief communication: PICOP, a new ocean melt parameterization under ice shelves combining PICO and a plume model, *The Cryosphere*, 13, 1043–1049, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1043-2019>, 2019.

Reese, R., **Albrecht, T.**, Mengel, M., Asay-Davis, X., and **Winkelmann, R.**: Antarctic sub-shelf melt rates via PICO, *The Cryosphere*, 12, 1969–1985, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1969-2018>, 2018.

Rosier, S. H. R., Bull, C. Y. S., Woo, W. L., and Gudmundsson, G. H.: Predicting ocean-induced ice-shelf melt rates using deep learning, *The Cryosphere*, 17, 499–518, <https://doi.org/10.5194/tc-17-499-2023>, 2023.

Timmermann, R. and Goeller, S.: Response to Filchner–Ronne Ice Shelf cavity warming in a coupled ocean–ice sheet model – Part 1: The ocean perspective, *Ocean Sci.*, 13, 765–776, <https://doi.org/10.5194/os-13-765-2017>, 2017.

**Winkelmann, R.**, Martin, M. A., Haseloff, M., **Albrecht, T.**, Bueler, E., Khroulev, C., and Levermann, A.: The Potsdam Parallel Ice Sheet Model (PISM-PIK) – Part 1: Model description, *The Cryosphere*, 5, 715–726, <https://doi.org/10.5194/tc-5-715-2011>, 2011.