

Verborgene Welten unter dem Antarktis-Eis

Signifikanz für das Verständnis künftiger Klimazustände unserer Erde

Auf einer Expedition mit dem deutschen Forschungseisbrecher Polarstern im Frühjahr 2017 wurde erstmals in der Antarktis das Meeresboden-Bohrgerät MARUM-MeBo70 eingesetzt, welches in bisher unerreichbare Sedimentablagerungen des westantarktischen Kontinentalschelfs des Amundsenmeeres eindringen konnte. In jahrelanger komplexer transdisziplinärer Arbeit unter Beteiligung diverser europäischer Institutionen konnten detaillierte Rekonstruktionen antarktischer Umweltbedingungen erstellt werden, die einzigartige Einblicke in die Klima- und Eisschildgeschichte der extrem klimasensitiven Westantarktis erlauben. Die offengelegten antarktischen Umweltbedingungen vergangener Extremklimazustände innerhalb der späten Kreide und des mittleren bis späten Paläogens, sowie Übergänge in und aus diesen, sind entscheidend, um künftige Klimadynamik unter warmen und CO₂-reichen Bedingungen mit Hilfe numerischer Modellprognosen verlässlicher vorherzusagen.

Die vorrangig weit unterhalb des Meeresspiegels befindliche und sich landwärts neigende Topographie der Westantarktis (Abb. 1) bedingt einen von Natur aus instabilen Eisschild, der unter dem Einfluss derzeitiger Klimaveränderungen ein unkalkulierbares Risiko darstellt. Die Westwinddrift der Südhemisphäre und somit der Zirkumantarktische Strom verlagern sich unter steigenden Temperaturen südwärts und sorgen dafür, dass relativ warmes zirkumpolares Tiefenwasser zunehmend durch glaziale Tröge der Kontinentalschelfe auf die inneren Schelfbereiche strömt, wo es die Eismassen von unten schmelzen lässt – Schelfeise dünne aus und werden brüchig, Eisströme aus dem Hinterland beschleunigen

sich und die Eisschild-Aufsetzlinien ziehen sich in immer tiefere Topographie zurück.

Satellitengestützte Beobachtungen der letzten Jahrzehnte zeigen deutlich, dass diese Prozesse sich intensivieren und eventuell sogar unaufhaltsam geworden sind [1]. Um das Risiko eines Zusammenbruchs des Westantarktischen Eisschilds bewerten zu können, reicht es jedoch nicht aus, Datenreihen zu analysieren, die nur die letzten Dekaden des Eisschildwandels aufzeichnen. Aus der geologischen Vergangenheit wissen wir, dass es vom sukzessiven Aufbau eines Eisschilds über seine maximale Ausbreitung bis zum vergleichbar schnellen Rückzug der Eisschild-Aufsetzlinien mehr als 100.000 Jahre dauern kann.

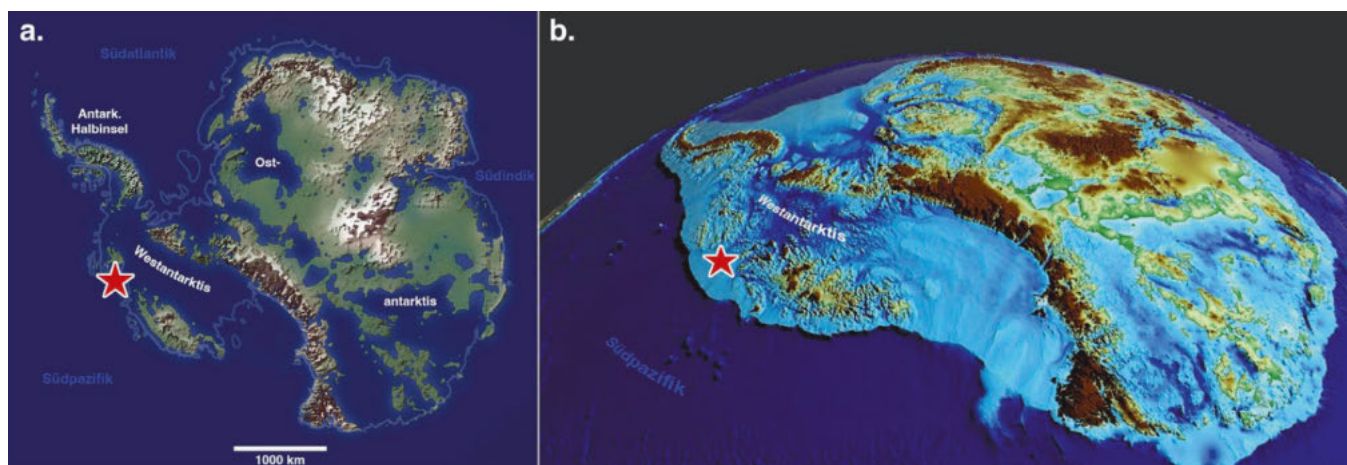


Abb. 1. Die subglaziale Topographie des antarktischen Kontinents [2]. Das Bohrgebiet der Expedition PS104 des Forschungseisbrechers Polarstern ist mit einem roten Stern markiert.

Abb. 2 Gerenderte Grafik des MARUM-MeBo70 kurz vor der Landung auf dem Meeresboden des Amundsenmeeres [Quelle: M. Künsting/MARUM; CC-BY 4.0]



Und wenn wir zusätzlich noch besser verstehen möchten, wie unser Klimasystem und somit auch unsere Eisschilde auf Temperatur- und CO₂-Bedingungen reagieren, die für die kommenden Jahrzehnte und Jahrhunderte prognostiziert sind, müssen wir noch viel weiter in die geologische Vergangenheit unseres Planeten zurückschauen, z.B. in das warme mittlere Pliozän (~3,5–3 Mio. Jahre) mit ähnlichen atmosphärischen CO₂-Gehalten wie heute, jedoch 2–3°C höheren Mitteltemperaturen oder in das Klimaoptimum des mittleren Miozäns (~17,5–14,5 Mio. Jahre) mit CO₂-Gehalten zwischen 300 und 500 ppmv und 3°C wärmerer globaler Mitteltemperatur als heute, also Bedingungen, die in nicht allzu ferner Zukunft erreicht werden könnten.

Weiterhin müssen wir die globale Klimadynamik in Zeiträumen verstehen, in denen extrem hohe atmosphärische CO₂-Gehalte zu sehr warmem und teils Eisschild-freien Klimaten geführt haben oder Übergänge in oder aus solchen stattgefunden haben, wobei insbesondere das Eozän (56–34 Mio. Jahre) und die späte Kreide (100,5–66 Mio. Jahre) betrachtet werden sollten. Bisher lagen uns jedoch nur sehr wenige verlässliche oder bruchstückhafte Daten vor, die uns Einblicke in diese Zeiträume auf oder direkt um den antarktischen Kontinent erlauben. Einige dieser weitreichenden Datenlücken konnten wir während einer Expedition mit dem deutschen Forschungs-Eisbrecher Polarstern auf den Kontinentalschelf der Westantarktis im Frühjahr 2017 schließen. Hierfür haben wir erstmals in der Antarktis das Meeresboden-Bohrgerät MARUM-MeBo70 des Zentrums für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) an der Universität Bremen eingesetzt (Abb. 2), welches vom Schiff aus gesteuert in bis zu 2000 m Wassertiefe eigenständig auf dem Meeresboden

arbeiten und dort bis in eine Sedimenttiefe von ~80 m bohren kann. In Abbildung 3a ist dargestellt, welchen besonderen geologischen Aufbau den Kontinentalschelf des Amundsenmeeres kennzeichnet und in welche Zeiträume der antarktischen Klima- und Eisschildgeschichte wir in einer unvergleichlichen Zusammenarbeit von Nautikern, Decksmannschaft, Technikern und Wissenschaft vordringen konnten [3–8].

Gemäßigte Regenwälder in Südpolnähe

Direkt am Übergang von kristallinem Grundgebirge in die ozeanwärts verkippten Sedimentabfolgen des Kontinentalschelfs (Abb. 3a), stehen nur wenige Meter unterhalb des Meeresbodens die ältesten überlieferten Sedimente an. Mit einer Bohrung an Bohrstelle „20“ konnten wir etwa 30 Meter in diese Sedimente eindringen und das Kernmaterial erfolgreich bergen. Kombinierte sedimentologische, geo- und sediment-physikalische, petrologische, geochemische und mikropaläontologische Untersuchungen des Bohrkerns haben detaillierte Rekonstruktionen der ehemaligen Umweltbedingungen ermöglicht. In den unteren drei Metern des Kerns sind hervorragend erhaltene Relikte eines gemäßigten Regenwaldes überliefert, der nur etwa 900 km vom Südpol entfernt im Treibhausklima der mittleren Kreide (~92–83 Ma) existiert hat [5]. Dieser erhaltene Waldboden mit stark verzweigten Wurzelgeflechten, zahlreich enthaltenen Pollen und Sporen und jüngst entdeckten Bernsteinfragmenten [6] zeugt von einem ausgeprägten Waldökosystem (Abb. 3b, 4), welches auf einer Paläo-Breite von 82° S von hohem Niederschlag (~1120 mm/Jahr) und gemäßigten Jahresdurchschnittstemperaturen von etwa 12 °C mit Sommertemperaturen bis zu 20 °C gekennzeichnet war. Um solche klimatischen Verhältnisse auf dieser Breite zu ermöglichen, muss die mittelkretazische Atmosphäre einen Kohlendioxid-Gehalt von 1120–1680 ppmv aufgewiesen haben, d.h. 4 bis 6-mal so hoch wie im Vergleich zu prä-industriellen Werten, und komplett von Vegetation bedeckt gewesen sein.

Transkontinentales Wildfluss-System

Der an Bohrlokation „20“ geborgene Kern enthält von direkt oberhalb der bereits beschriebenen mittelkretazischen Einheit bis zur Oberfläche einen etwa 26 m mächtigen, halbverfestigten und gut geschichteten Sandstein mittel- bis spät-Eozänen (~45–34 Ma) Alters. Petrologische und thermochronologische sowie sedimentologische, geochemische und geophysikalische Analysen zeigen, dass sich diese Sedimente im Deltabereich eines verzweigten Flusssystemes abgelagert haben müssen (Abb. 3c), welches seinen Ursprung wohl im etwa 1500 km entfernten Transantarktischen Gebirge gehabt haben muss. Unter weiterhin gemäßigten klimatischen Bedingungen, hat sich folglich ein breites Wildflusssystem durch die weiten Ebenen des Westantarktischen Riftsystems geschlängelt, welches zu diesem Zeitpunkt noch vollständig oberhalb des Meeresspiegels gelegen hat [8].

Geburtsstunde des Antarktischen Eisschildes

Mit einer weiteren erfolgreichen Bohrung an Bohrlokation „21“ (Abb. 3a) konnten ungestörte Sedimentablagerungen geborgen werden, die uns direkten Einblick in die Bildungsphase des Antarktischen Eisschildes vor etwa 34 Millionen Jahren ermöglichen – also dem Übergang vom eozänen Treibhausklima in das känozoische Eishausklima, in dem wir weiterhin leben. Integrierte sedimentologische, geochemische, sediment-physikalische und mikropaläontologische Untersuchungen konnten erstmals für die Westantarktis verlässliche Daten liefern, um die Ausbreitung permanenter Eisschildbedeckung in diesem Teil der Antarktis zu verstehen [7]. Für das erste glaziale Maximum – also die erste Maximalausbreitung von Gletschereis – nach Beendigung der warmen und CO₂-reichen Bedingungen des Eozäns, gab es bisher nur unzureichendes Wissen, wann und vor allen Dingen wo sich permanente Eisflächen bildeten, die sich in der Folge zu Eisschilden entwickelten.

Nicht nur der bisherige Mangel an verlässlichen Daten zu zirkumantarktischen Wasser- und Lufttemperaturen sowie Eispräsenz sorgten für eine ganze Bandbreite widersprüchlicher Modellsimulationen des frühen Antarktischen Eisschildes, sondern auch die Eisschildmodelle selbst, da sie in den meisten Fällen nicht mit Klimamodellen gekoppelt wurden und somit viele komplexe Rückkopplungseffekte zwischen Atmosphäre, Ozean und Landoberflächen nicht berücksichtigt werden konnten.

Die nun neu vorliegenden Daten aus der Westantarktis zeugen von einem kühl-temperierten Klima ohne Anzeichen für die Präsenz von kontinentalem oder driftendem Eis aber mit direkten Hinweisen auf eine dichte Vegetationsbedeckung, ähnlich zu der im heutigen Süden Patagoniens (Abb. 3d). Da die West-

antarktis in diesem ersten glazialen Maximum folglich noch nicht von einem Eisschild bedeckt gewesen sein kann, muss sich anderswo eine große permanente Eismasse gebildet haben. Vor diesem Hintergrund wurde eine neuartige Modellsimulation gestartet, für die das hochkomplexe Erdsystemmodell AWI-ESM 2.1 mit dem Parallel Ice Sheet Model (PISM) asynchron gekoppelt wurde – mit den AWI-ESM-Ergebnissen jedes dritten Klimajahrs wurden 300 Jahre Eisschildentwicklung gerechnet, welche dann wiederum in das AWI-ESM rückgekoppelt wurden. Dieser Rückkopplungsprozess wurde wiederholt bis letztlich 1.500 „Klimajahre“ und 200.000 „Eisjahre“ erreicht waren und das Modell ein sogenanntes Quasi-Gleichgewicht erreicht hat.

Die Ergebnisse waren erstaunlich, da nicht nur die eisfreie Westantarktis klar bestätigt werden konnte und nur die Ostantarktis bereits weiträumig vergletschert war, sondern sich der Antarktische Eisschild auch vom Rand des Kontinents und nicht, wie bisher gedacht, aus seinem kalten Zentrum heraus ausbreitete [7]. Erst bei atmosphärischen CO₂-Gehalten von ~300 ppmv breitete sich der Westantarktische Eisschild (WAIS) bis an die Kontinentalränder, d.h. bis auf etwa das heutige Niveau, aus. Diese Ergebnisse verdeutlichen, wie angreifbar der WAIS ist und wie es deshalb nicht verwundern sollte, dass heutige CO₂-Gehalte von etwa 420 ppmv dem westantarktischen Kontinentaleis bereits empfindliche Verluste bescheren, die auf Basis der oben geschilderten neuen Ergebnisse auf einen künftig stark beschleunigten Rückzug bis zu einem teilweisen bis vollständigen Zusammenbruch des WAIS hindeuten könnten.

Entwicklung zum vollständig vergletscherten Kontinent

An den Sedimentaufzeichnungen von Bohrlokation „40“

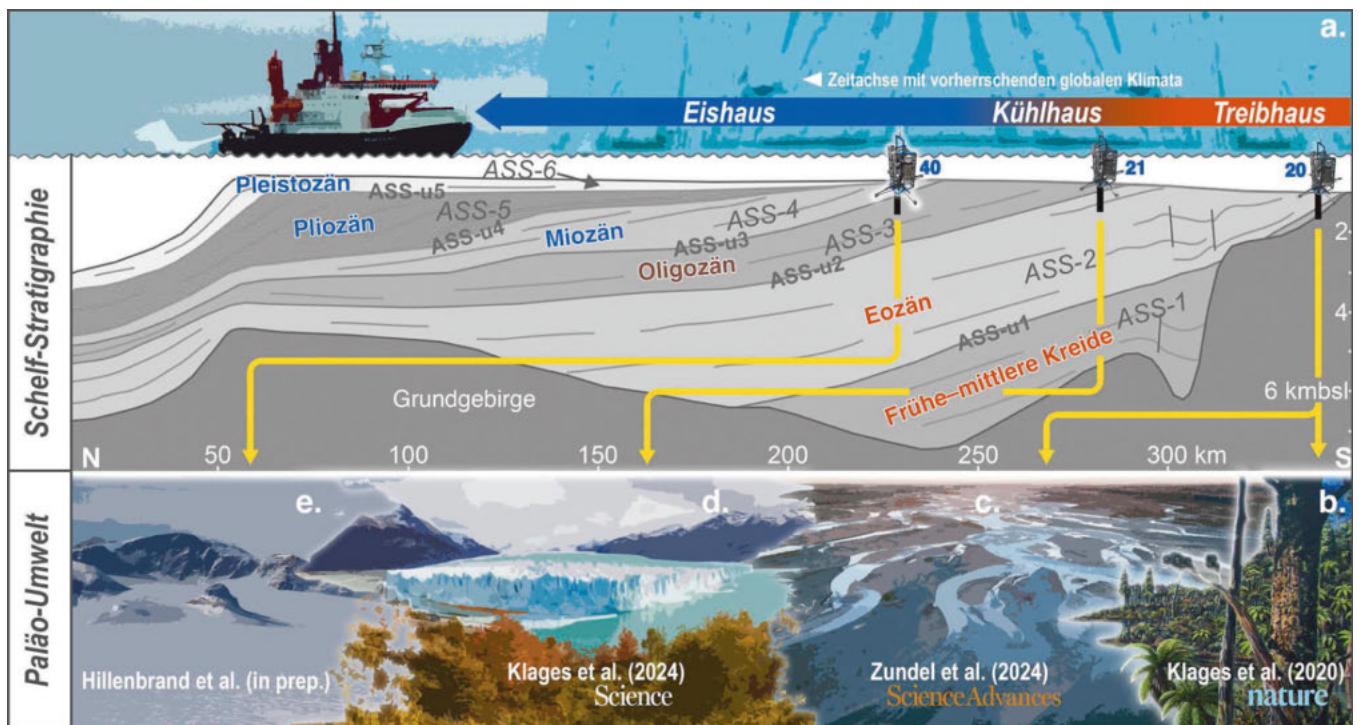


Abb. 3 - **a**: Stratigraphischer Aufbau des Kontinentalschelfes im östlichen Amundsen Sea Embayment [3,4] mit eingezeichneten Bohrstellen an Lokationen „20“, „21“ und „40“ (projiziert, da nicht genau auf gezeigtem stratigraphischen Profil gelegen). - **b-e**: Rekonstruierte Umweltbedingungen auf Basis der in **(a)** aufgeführten Bohrlokationen [5,6,7,8].



Abb. 4 Acrylbild der ehemaligen Umweltbedingungen, die für den Bereich der Bohrung aus dem Sedimentkern rekonstruiert werden konnten [Quelle: Alfred-Wegener-Institut/James McKay; CC-BY 4.0]

(Abb. 3a) wird derzeit in transdisziplinärer Arbeit versucht, die Entwicklung zum vollständig vergletscherten Kontinent (Abb. 3e) besser zu verstehen. Die Ablagerungen im Kern weisen eindeutig auf die Präsenz von kontinentalem Eis zu einem frühen Zeitpunkt hin und es soll in den kommenden Monaten geklärt werden, wann genau und unter welchen Umweltbedingungen sich der Eisschild erstmals in diese äußeren Bereiche des westantarktischen Kontinentalrandes vorschieben konnte.

Verständnis extremer Klimazustände für verlässlichere Modellsimulationen

Paläoklimatologische Datenbeweise aus Zeiträumen, die wärmer und CO₂-reicher waren als heute, sind vor allen Dingen aus den Polargebieten von großer Bedeutung, da diese sehr viel sensibler und weitreichender auf globale Klimaänderungen reagieren als andere Regionen der Erde. Tendenziell treten in numerischen Klimasimulationen weiterhin signifikante Probleme auf, sobald Temperaturgradienten zwischen polaren und äquatorialen Breiten zu flach werden, der Temperaturunterschied also kleiner wird.

Während sich das tropische Temperaturniveau auch in vergangenen warmen Hoch-CO₂-Klimaten nicht sonderlich stark vom heutigen unterscheidet, beweisen Klimarekonstruktionen aus den Polargebieten, dass die hohen Breiten eine sehr viel stärkere Schwankungsbreite aufweisen [5,7]. Nur durch die sukzessive Schließung diverser vorhandener Datenlücken wärmerer und CO₂-reicherer Analogzeiträume der geologischen Vergangenheit wird es also möglich sein, komplexe numerische Klima- und Erdsystemmodelle mit robusten polaren Daten zu Luft- und Ozeantemperaturen, Vegetationsbedeckung und Eispräsenz zu validieren [7], um somit die Verlässlichkeit ihrer Vorhersagefähigkeit zu erhöhen – ein wichtiger Schritt, um Prognosen

eben dieser Modelle auch für künftige Klimabedingungen entscheidend zu verbessern.

Literatur

- [1] Joughin, I., *et al.*, Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica, *Science* **344**, 735–738 (2014) - [2] Morlighem, M., *et al.*, Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet, *Nature Geoscience* **13**, 132–137 (2020) - [3] Gohl, K., *et al.*, Seismic stratigraphic record of the Amundsen Sea Embayment shelf from pre-glacial to recent times: Evidence for a dynamic West Antarctic ice sheet, *Marine Geology* **344**, 115–131 (2013) - [4] Gohl, K., *et al.*, Evidence for a highly dynamic West Antarctic Ice Sheet during the Pliocene, *Geophysical Research Letters* **48**, doi:10.1029/2021GL093103 (2021)- [5] Klages, J. P., *et al.*, Temperate rainforests near the South Pole during peak Cretaceous warmth, *Nature* **580**, 81–86 (2020) - [6] Klages, J. P., *et al.*, First discovery of Antarctic amber, *Antarctic Science*, doi:10.1017/S0954102024000208 (2024) - [7] Klages, J. P., *et al.*, Ice sheet-free West Antarctica during peak early Oligocene glaciation, *Science* **385**, 322–327 (2024) - [8] Zundel, M., *et al.* A large-scale transcontinental river system crossed West Antarctica during the Eocene, *Science Advances* **10**, doi:10.1126/sciadv.adn6056 (2024).



Dr. **Johann P. Klages** ist Meeresgeologe am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und forscht seit 2011 zur Eisschild- und Klimarekonstruktion der Antarktis. Er hat an den Universitäten Würzburg und Kiel studiert und an der Universität Bremen promoviert. Ziel seiner Arbeit ist es, Klimaarchive zu verstehen, um daraus zukünftige Eisschildentwicklungen besser vorhersagen zu können. Zudem lehrt er Sedimentologie an der Universität Bremen und

führt Studenten in die Polarforschung ein. Klages hat zahlreiche Preise erhalten, war an verschiedenen Antarktis-Expeditionen beteiligt und setzt sich für die Vermittlung geowissenschaftlicher Erkenntnisse in der Öffentlichkeit ein.