

Das Thermische Maximum des Paläozän-Eozän oder PETM

geschrieben von Chris Frey | 24. August 2021

Andy May

Das PETM oder Paläozän-Eozän-Thermal-Maximum war eine Warmzeit, die von vor 56,3 bis 55,9 Ma (vor Millionen Jahren) begann. Der am 9. August 2021 veröffentlichte IPCC-Bericht AR6 (eigentlich ein Entwurf, kein endgültiger Bericht) deutet darauf hin, dass diese Warmzeit ähnlich abläuft wie heute und auch in der Zukunft zu erwarten ist (IPCC, 2021, S. 2-82 & 5-14). Während des PETM war es sehr warm, und die durchschnittlichen globalen Oberflächentemperaturen erreichten wahrscheinlich kurzzeitig Spitzenwerte zwischen 25,5 °C und 26 °C, verglichen mit einer durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur von etwa 14,5 °C heute, wie in Abbildung 1 dargestellt:

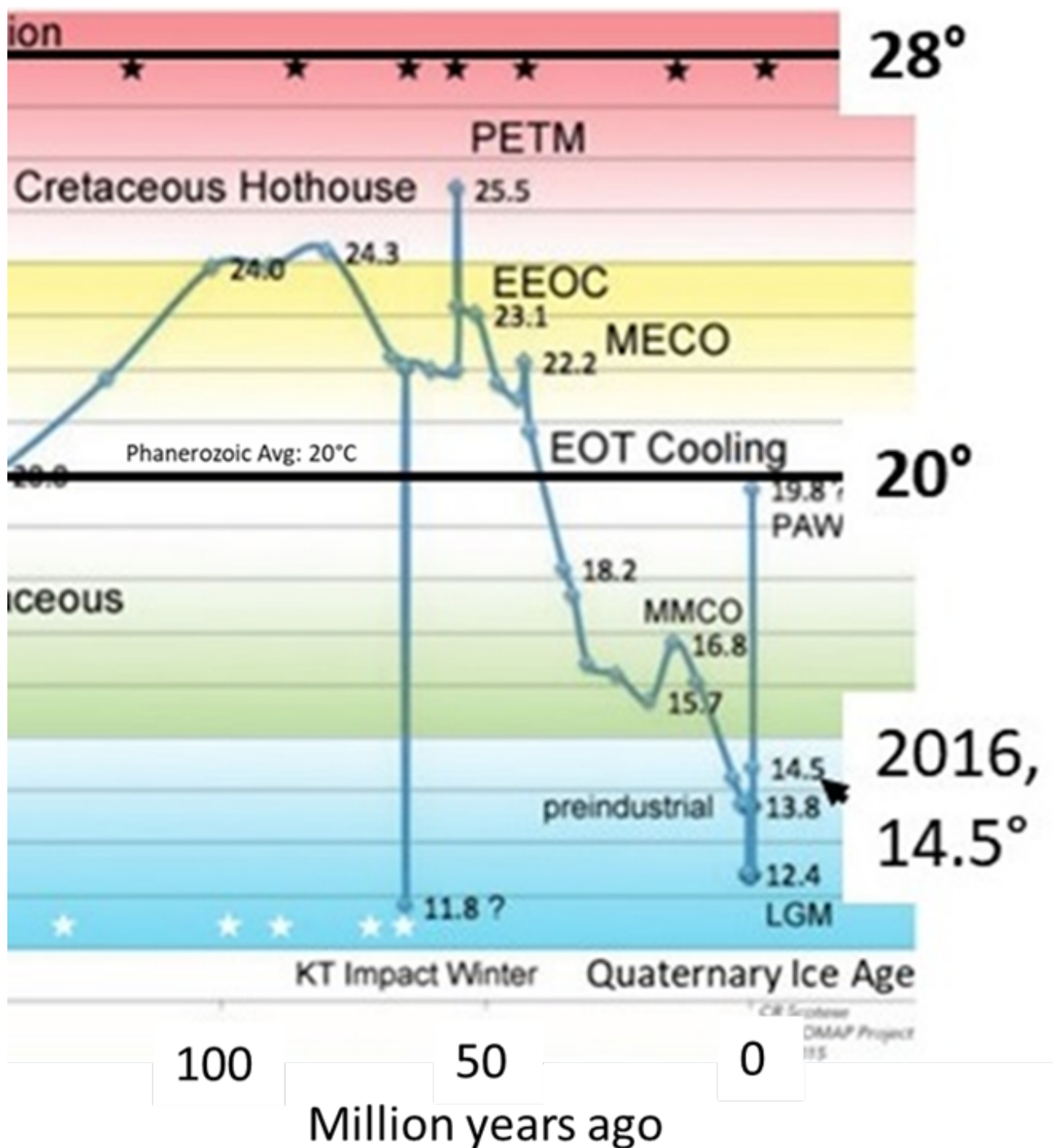


Abbildung 1. Die geschätzte globale durchschnittliche Oberflächentemperatur in den letzten 150 Millionen Jahren. Modifiziert von: Christopher Scotese, Paleomap Project, [Link](#).

Abbildung 1. Die geschätzte globale durchschnittliche Oberflächentemperatur in den letzten 150 Millionen Jahren. Modifiziert von: Christopher Scotese, Paleomap Project, [Link](#).

Heute verfügen wir über Zehntausende von täglichen Temperaturmessungen auf der ganzen Welt und können eine ziemlich genaue globale durchschnittliche Oberflächentemperatur berechnen. Um einen globalen

Durchschnitt für das PETM zu ermitteln, müssen wir uns auf [Ersatztemperaturen](#) stützen, z. B. [Sauerstoff-Isotopenverhältnisse](#) oder [Kalzium/Magnesium-Verhältnisse](#) in fossilen Schalen und fossile Membranlipide, die wie [Tex₈₆](#) temperaturempfindlich sind. Proxy-Temperaturwerte sind nur spärlich vorhanden und haben eine zeitliche Auflösung (56 Ma) von Tausenden bis Hunderttausenden von Jahren. Daher sind sie in Bezug auf die Geschwindigkeit der Temperaturveränderung nicht mit den heutigen monatlichen globalen Durchschnittswerten vergleichbar.

Bevor wir uns mit dem PETM befassen, wollen wir eine geologische Perspektive aufzeigen. Laut [Christopher Scotese](#) war die höchste globale Durchschnittstemperatur im Phanerozoikum (dem Zeitalter komplexer Schalenorganismen, d. h. in den letzten 550 Millionen Jahren) das triassische [Treibhausereignis](#), das auf das Ende der [Karoo-Eiszeit](#) folgte (vor ca. 250-300 Ma). Die globalen durchschnittlichen Oberflächentemperaturen erreichten damals einen Höchststand von etwa 27,9 °C.

Die späte Kreidezeit war die nächste Warmzeit, und die globalen Temperaturen erreichten vor 80 Mio. Jahren 24 °C. Um 65 Ma ereignete sich der berühmte Chicxulub-Bolideinschlag in der Nähe der Halbinsel Yucatan, der eine Explosion von 100 Millionen Megatonnen verursachte, die das Ende der Dinosaurier bedeutete, mit Ausnahme der Vögel. Die globalen Temperaturen sanken rasch auf ein Minimum von etwa 12 °C. Das ist etwas kälter als das letzte glaziale Maximum, so dass die Tiere, die die Explosion überlebten, von der Kälte getroffen wurden. Diese Kälteperiode war kurz, vielleicht nur zehn Jahre, aber sehr kalt.

Nachdem sich die Welt von der Explosion erholt hatte, kehrte sie zu einer globalen Oberflächentemperatur von 22 °C zurück, die knapp über der durchschnittlichen Oberflächentemperatur des Phanerozoikums von 20 °C lag. Etwa neun Millionen Jahre später kam es dann zur PETM-Erwärmung, die in [Abbildung 1](#) dargestellt ist. Neben dem PETM sind in [Abbildung 1](#) auch das EECO (Early-Eocene Climatic Optimum, in der [Abbildung](#) von Scotese fälschlicherweise als EEOC bezeichnet), das MECO (Middle-Eocene Climatic Optimum), die EOT (Eocene-Oligocene Transition) Abkühlung, das MMCO (Middle-Miocene Climatic Optimum), das LGM (Last Glacial Maximum) und die vorindustrielle Temperatur (Little Ice Age) von 13,8 °C angegeben. Die derzeitige globale durchschnittliche Oberflächentemperatur von 14,5 °C und die mögliche „PAW“-Temperatur (projizierte anthropogene globale Erwärmung) von 19,8 °C sind ebenfalls angegeben. Selbst wenn die extremste projizierte anthropogene Erwärmung eintritt, bringt sie die Erde nur auf ihre phanerozoische Durchschnittstemperatur von 20 °C. Dies gibt uns eine Vorstellung davon, wie kalt es heute historisch oder geologisch gesehen wirklich ist.

Die Vermischung von Proxy-Temperaturauflösungen von Hunderttausenden von Jahren und modernen instrumentellen Temperaturmittelwerten ist mit Vorsicht zu genießen. Die Proxy-Temperaturen von Scotese basieren auf

geologischen Gletschersignaturen und geschätzten Temperaturgradienten von Äquator zu Pol. Sie sind vernünftig, haben aber eine zeitliche Auflösung von mehreren zehn Millionen Jahren. Angesichts dieser Auflösung können wir die Erwärmungs- oder Abkühlungsraten der Vergangenheit nicht mit den letzten 170 Jahren vergleichen, dem Zeitraum, in dem die Thermometer täglich die Erde erfassen. Seine Punkte haben nicht die zeitliche Auflösung oder Genauigkeit, um dies zu ermöglichen.

Das PETM

Zu Beginn des EECO gab es eine abrupte, aber geologisch kurze (< 200.000 Jahre) Periode extremer Erwärmung, die gewöhnlich als „PETM“ bezeichnet wird (Scotese, 2015). Das PETM ist die wärmste von mehreren kurzen, sehr warmen Perioden oder „Hyperthermien“, die im späten Paläozän und frühen Eozän zwischen 56 und 53 Ma auftraten.

Die Hyperthermie des PETM könnte die Erdoberfläche auf fast 26 °C erwärmt haben, was fast 12 °C wärmer ist als heute. Zu dieser Zeit erreichte die SST (Meeresoberflächentemperatur) im Nordatlantik in der Nähe von Dänemark 33 °C (Stokke, Jones, Tierney, Svensen, & Whiteside, 2020). Die PETM-Breite Dänemarks lag bei etwa 45°N, südlich der heutigen Breite von 55,6°N (siehe Abbildung 3). Die Erwärmung fällt zeitlich mit einem kleinräumigen marinen Aussterbeereignis zusammen. Die hohen Temperaturen treten auch etwa zur gleichen Zeit auf wie eine Kohlenstoff-Isotopen-Exkursion (CIE). Das bedeutet, dass sich das Verhältnis von Kohlenstoff-13 und Kohlenstoff-12 in geologischer Hinsicht für kurze Zeit abrupt verändert hat. Der CIE deutet auf einen Fluss von Kohlenstoffverbindungen, die mit Kohlenstoff-12 angereichert sind, in den Ozean und die Atmosphäre hin. Kohlenwasserstoffe sind mit Kohlenstoff-12 angereichert, weil Pflanzen diesen Kohlenstoff gegenüber Kohlenstoff-13 bevorzugen, so dass die Quelle Kohlenwasserstoffe wie Methan-Clathrate sein könnten. Clathrate sind Verbindungen, bei denen Moleküle einer Komponente, in diesem Fall Methan, in einer anderen, wie Wasser, eingeschlossen sind. Methanclathrate werden manchmal auch als Methanhydrate bezeichnet.

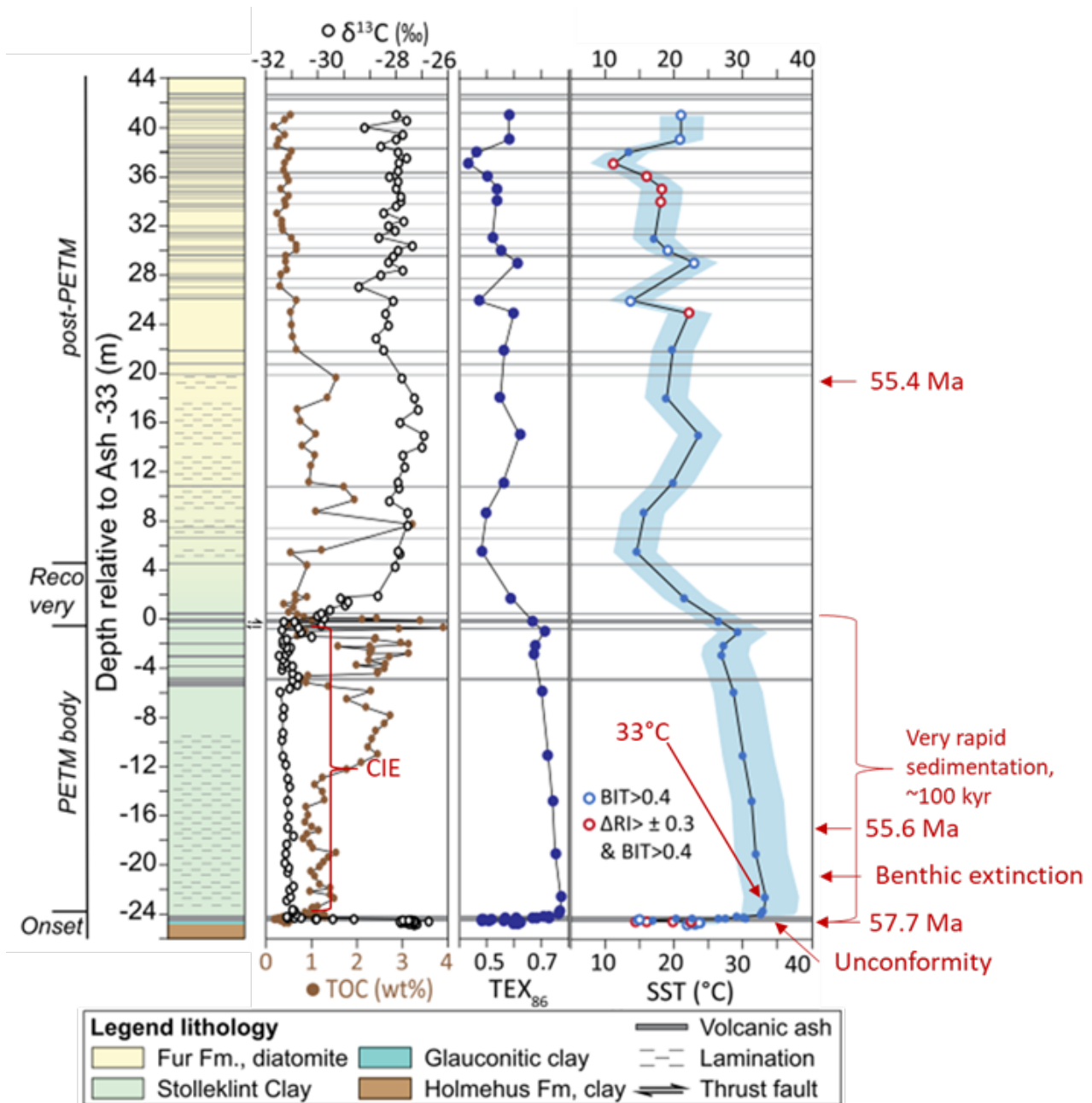


Abbildung 2. Der von Stokke untersuchte Abschnitt, Fur Island, Dänemark. Abbildung modifiziert nach (Stokke, Jones, Tierney, Svensen, & Whiteside, 2020).

Abbildung 2 zeigt den von Stokke et al. untersuchten Abschnitt. Unterhalb des Abschnitts befindet sich eine Diskordanz, aber man geht davon aus, dass die PETM-Lagerstätte vollständig ist. Die Sedimentation erfolgte sehr schnell, und der gesamte 24 Meter lange PETM-Abschnitt wurde wahrscheinlich innerhalb von 100 000 Jahren abgelagert. Die Ascheablagerungen der NAIP (North Atlantic Igneous Province, siehe Abbildung 3) innerhalb des PETM-Körpers werden auf 55,6 Ma datiert. Gleichzeitig sanken der pH-Wert des Ozeans und der Sauerstoffgehalt in der Tiefsee (Anoxie) (IPCC, 2021, S. 2-82).

Es ist in Abbildung 2 nur schwer zu erkennen, aber nach der Diskordanz

und kurz vor dem PETM-Wärmeereignis fällt die SST in der Nordsee auf 14,5 °C, bevor sie rasch auf 33 °C ansteigt. Der heutige globale, nach Flächen gewichtete SST-Durchschnitt liegt bei etwa 18,3 °C, wenn man die mehrjährigen MIMOC-Daten der NOAA und der Universität Hamburg zur Temperatur der Mischschicht des Ozeans verwendet. Die heutige durchschnittliche SST in der Nordsee beträgt laut [Climate-Data.org](https://climate-data.org) etwa 11 °C, so dass die Temperatur von 14,5 °C vor dem PETM etwas wärmer ist als heute. Nach den [MIMOC-Daten](#) der NOAA beträgt die globale durchschnittliche SST in der Mischschicht bei 45°N heute etwa 10 °C.

Der NAIP-Vulkanismus war während und vor dem PETM aktiv. Fünf Kilometer dicke Basalte wurden auf Ostgrönland und den Färöer-Inseln zwischen 56 und 55,6 Ma abgelagert. Diese vulkanische Episode vor dem PETM dürfte Schwefelverbindungen erzeugt haben. Die Schwefelverbindungen (wie SO₂ und SO₃) erzeugten in Verbindung mit Wasser Schwefelsäure, die die Atmosphäre und die Ozeane abkühlte, den pH-Wert der Ozeane senkte und der Atmosphäre und den Ozeanen Sauerstoff entzog.

Francesca McInerney und Scott Wing haben ebenfalls über das PETM geschrieben (McInerney & Wing, 2011). Sie betonen die globalen Auswirkungen des Ereignisses. Sie glauben, dass die globale Oberflächentemperatur um 5-8 °C anstieg. Während Stokke et al. den Beginn des PETM auf 55,9 Ma ansetzen, datieren McInerney und Wing ihn auf 56,0 bis 56,3 Ma. Angesichts der Unsicherheiten bei der Datierung ist der Zeitunterschied nicht signifikant.

Die Daten deuten darauf hin, dass das PETM-Aussterben recht begrenzt war und mit einer starken Zunahme der Säugetierarten zusammenfiel. Etwa 30-50 % der benthischen (bodenbewohnenden) Foraminiferen und Dinoflagellaten (mikroskopisch kleine Meerestiere) starben aus. Die ausgestorbenen benthischen Foraminiferen stammten meist aus den mittleren und tieferen Tiefen der Ozeane. Einige spekulieren, dass das Aussterben auf die größere Korrosivität tieferer Gewässer, den niedrigeren Sauerstoffgehalt und/oder höhere Temperaturen zurückzuführen ist (McInerney & Wing, 2011). Andere benthische Tiere, wie z. B. Ostracoden, die in der gleichen Umgebung wie die Foraminiferen leben, verzeichneten nicht den gleichen zahlenmäßigen Rückgang. McInerney und Wing spekulieren, dass das Aussterben vor allem auf die höheren Temperaturen zurückzuführen ist, was jedoch unklar ist. An der Oberfläche und an Land herrschten höhere Temperaturen, und dennoch gedieh das Leben in diesen Umgebungen zu jener Zeit.

Merkwürdigerweise haben sich die benthischen Foramen während des PETM nicht gut entwickelt, während ihre planktischen (schwimmenden) Vettern sehr gut gediehen sind und sowohl an Größe als auch an Vielfalt zugenommen haben, berichten McInerney und Wing. Einige planktische Arten haben ihr Verbreitungsgebiet und ihre Anzahl während des PETM stark vergrößert.

An Land entwickelten sich zu dieser Zeit neue Säugetiere, insbesondere

Primaten, die sich weit verbreiteten. Während des PETM und des EECO kam es zu einem „Ausbruch von Säugetier-Erstaufftreten“. Dieser Zeitraum wird manchmal als „Säugetier-Ausbreitungereignis“ bezeichnet (McInerney & Wing, 2011). Dieser Schub an neuem Säugetier-Erstaufftreten ist sowohl in Nordamerika als auch in Europa zu beobachten und fällt mit dem Beginn des PETM CIE zusammen.

Neben Säugetieren entwickelten sich während des PETM und des EECO auch zahlreiche neue und bestehende Schildkröten- und Eidechsenarten bzw. breiteten sich aus. Behauptungen, dass das PETM so warm war, dass es in den Tropen tödlich war, sind unwahrscheinlich, „weil terrestrische Organismen aus den Tropen während des PETM nicht weniger, sondern mehr Vielfalt entwickelten“ (McInerney & Wing, 2011).

Während des PETM stiegen die Temperaturen um 6 bis 12 °C und es gab kein Polareis. In der Arktis wuchsen Palmen, und die Antarktis war mit Wäldern bedeckt. Die biologische Vielfalt nahm während des PETM stark zu, insbesondere bei den Landpflanzen (McInerney & Wing, 2011). Einige Pflanzenarten schienen während des PETM zu verschwinden, tauchten aber später wieder auf, was darauf hindeutet, dass sie nicht ausgestorben sind, sondern nur für kurze Zeit nicht überlebt haben. Viele Arten blühten auf und breiteten sich in neue Gebiete aus. Das erste Vorkommen von Mangrovenpalmen stammt aus der Zeit des PETM. **Insgesamt blühte die Natur auf, als die globalen Temperaturen wahrscheinlich 12 °C wärmer waren als heute.**

[Hervorhebung vom Übersetzer]

Die Ursache des PETM ist unbekannt. Wie bereits erwähnt, legt die Arbeit von Ella Stokke nahe, dass die Warmzeit und das Aussterben eng mit dem gleichzeitigen Vulkanismus der Nordatlantischen Igneischen Provinz (NAIP) zusammenhängen und möglicherweise durch diesen verursacht wurden. Der Vulkanismus könnte einen Sauerstoffmangel im Atlantischen Ozean verursacht haben, insbesondere in der Tiefe des Atlantiks, was zum Aussterben der benthischen Foraminiferen führte. Die NAIP-Region und das von Stokke und ihren Kollegen untersuchte Gebiet der dänischen Insel Fur sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Aufschlüsse auf der Fur-Insel liefern eine ziemlich vollständige geologische Aufzeichnung, die die Grenze zwischen Paläozän und Eozän umfasst. Zu den Sedimenten gehören vulkanische Aschebetten aus dem NAIP, fossilreiche Tonsteine und Schiefer mit eindeutigen Aufzeichnungen über die Kohlenstoffisotopen-Exkursion und das PETM-Ereignis. Zur Schätzung der SST wurde der Temperaturproxy TEX_{86} verwendet. Die NAIP-Ablagerung war zwischen 56 und 54 Ma während der Öffnung des Nordatlantiks am stärksten.

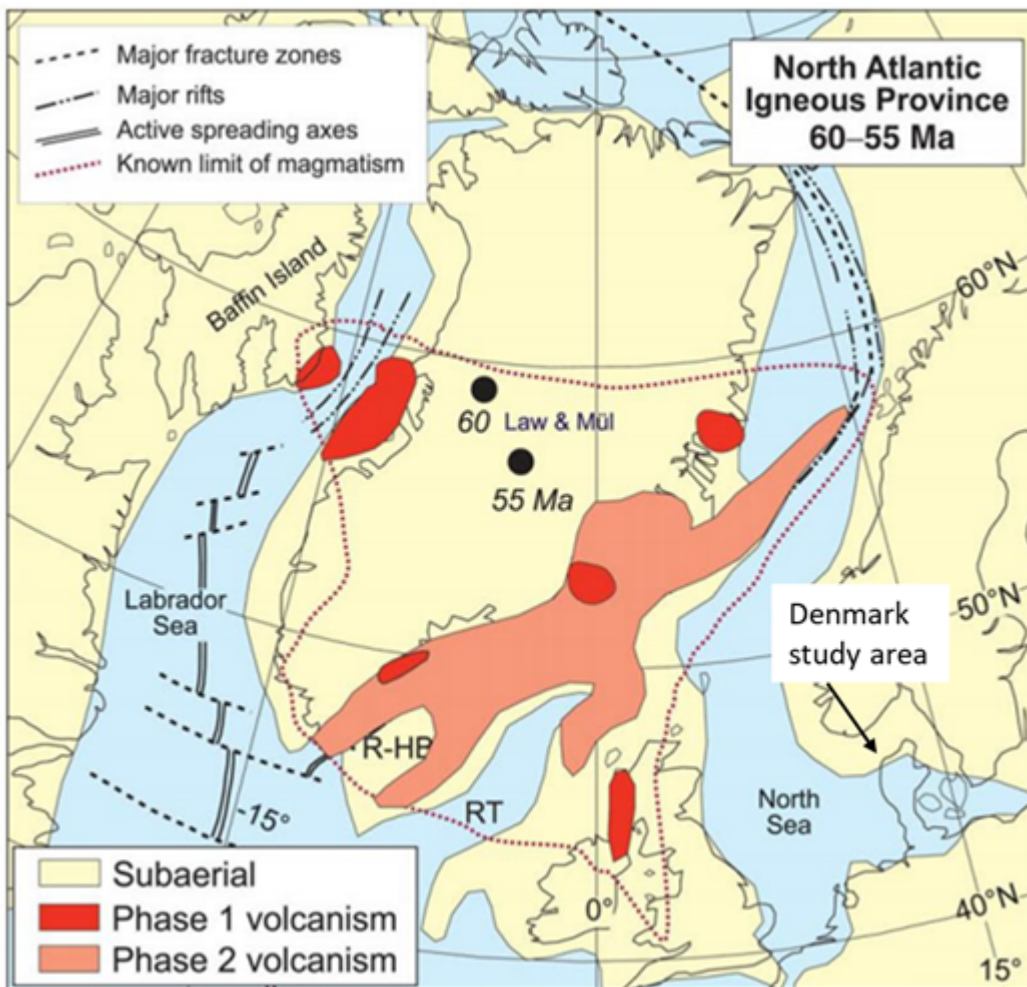


Abbildung 3. Die Nordatlantische Igneo-Provinz und das Untersuchungsgebiet von Stokke. Modifiziert von: E.A.M. van de Lisdonk, Universität Utrecht.

Es wurden viele Theorien für die Erwärmung vorgeschlagen, darunter eine plötzliche Freisetzung von CO₂ und Methan, aber die Beweise sind nicht eindeutig. Ursprünglich wurde spekuliert, dass Vulkanismus die Freisetzung einer großen Menge von Methanclathraten verursachte, die dann zu einem Temperaturanstieg führten.

Sicherlich gelangten in dieser Zeit große Mengen an Kohlendioxid und Methan in die Atmosphäre. Das Hauptproblem bei der Methan-Clathrat-Theorie ist, dass es nicht genug davon gab, um den notwendigen Kohlenstoff zu liefern (McInerney & Wing, 2011). Andere mögliche Quellen für den damaligen Kohlenstoffüberschuss in der Atmosphäre und den Ozeanen, der mit Kohlenstoff-12 angereichert war, sind Vulkanismus und Kontaktmetamorphismus im NAIP (Stokke, Jones, Tierney, Svensen, & Whiteside, 2020). McInerney und Wing bevorzugen die Theorie, dass Torf und Permafrost in der Antarktis schmolzen und die Quelle des Kohlenstoff-12-Überschusses waren.

Obwohl der Gesamtkohlenstoffgehalt der Atmosphäre während des PETM

anstieg, waren die Klimamodelle nicht in der Lage, den starken Temperaturanstieg mit vernünftigen Parametern zu reproduzieren. Die CO₂-Schätzungen (siehe Abbildung 4), die uns für diesen Zeitraum vorliegen, sind viel zu niedrig. Selbst wenn man davon ausgeht, dass die Atmosphäre das 16-fache der vorindustriellen CO₂-Konzentration (4.800 ppm) enthält – ein Vielfaches des Niveaus, das die in Abbildung 4 gezeigten fossilen Belege nahelegen – und die Klimasensitivität mit 3 °C/2xCO₂ angenommen wird (McInerney & Wing, 2011), reicht der CO₂-Antrieb immer noch nicht aus, um die in den Sedimentaufzeichnungen beobachtete Erwärmung zu verursachen (IPCC, 2021, 5-14). Die Abkürzung „°C/2xCO₂“ steht für den Temperaturanstieg infolge einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

Die NASA behauptet, dass ihre Simulationen den PETM-Temperaturanstieg modellieren können, wenn sie eine sehr hohe CO₂-Empfindlichkeit einbeziehen. Jiang Zhu und Kollegen haben den PETM mit den vorhandenen Daten erfolgreich simuliert, aber ihr Modell legt eine Klimasensitivität von 6,6°C/2xCO₂ nahe, was nicht angemessen ist (Zhu, Poulsen, & Tierney, 2019). Der sehr wahrscheinliche Bereich der Empfindlichkeit des IPCC AR6 liegt bei 2°C bis 5°C/2xCO₂ (IPCC, 2021, S. TS-58). Im AR5 ist der IPCC noch deutlicher: „Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Sensitivität über 6°C liegt, dies ist ein Expertenurteil, das auf mehreren Beweislinien beruht.“ (IPCC, 2013, S. 1111). AR5 folgt mit einer Liste der Beweise, warum ECS nicht größer als 6°C ist.

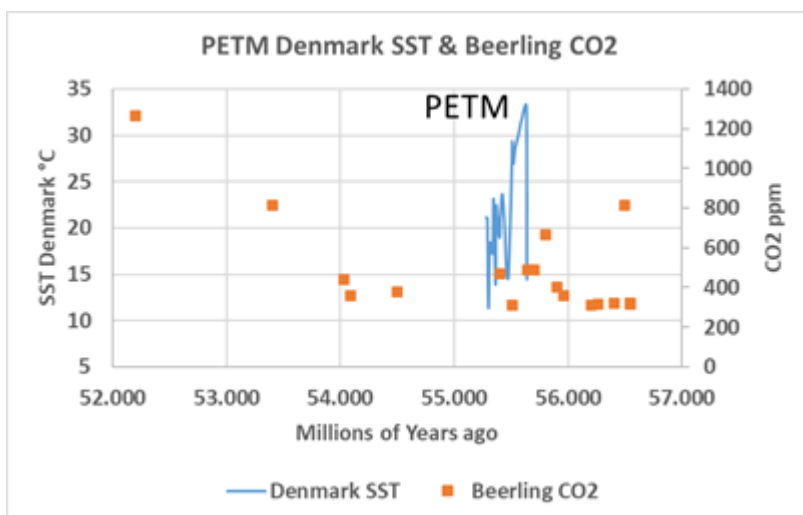


Abbildung 4. Die Oberflächentemperaturen des dänischen Meeres (SST) von Stokke sind blau und die CO₂-Schätzungen von Beerling in orangefarbenen Kästen dargestellt.

Vor 55 bis 56 Ma gibt es 16 Proxy-Schätzungen des CO₂-Gehalts (Beerling & Royer, 2011, S.I. Tabelle 1). Die 16 Proxy-Proben repräsentieren sieben einzigartige Probenzeiten, die in Abbildung 4 dargestellt sind. Laut einer Zusammenfassung von David Beerling und Dana Royer in *Nature*

Geoscience lag die CO₂-Konzentration während des PETM-Ereignisses bei etwa 487 ppm (328-667 ppm). Der Datierungsfehler für die Proben wird auf ±500.000 Jahre geschätzt und der Fehler in den CO₂-Schätzungen beträgt ±235 ppm (Beerling & Royer, 2011). Laut Beerling und Royer gibt es vier Verfahren zur Bestimmung der atmosphärischen CO₂-Konzentration im Altertum. Die beiden terrestrischen Methoden sind die Häufigkeit von Spaltöffnungen auf fossilen Blättern und die Kohlenstoffisotopenzusammensetzung von Karbonaten in fossilen Böden. Die Anzahl der Spaltöffnungen auf den Blättern nimmt ab, wenn der CO₂-Gehalt hoch ist, und nimmt zu, wenn der CO₂-Gehalt niedrig ist, wie es heute der Fall ist.

Die beiden marinen Verfahren sind die Kohlenstoff-Isotopen-Zusammensetzung von Phytoplankton-Fossilien und die Bor-Isotopen-Zusammensetzung von fossilen Foraminiferen. Ich verweise auf die Arbeit von Beerling und Royer und ihre Referenzen, um zu erfahren, wie diese Verfahren im Einzelnen funktionieren. Es gibt auch eine gute Zusammenfassung im AR6 (IPCC, 2021, 2-15). Die allgemeine Unsicherheit bei den Schätzungen der CO₂-Konzentration im Eozän beträgt nahezu 100 %, d. h. der tatsächliche Wert liegt zwischen dem Doppelten des wahrscheinlichsten Wertes und der Hälfte davon.

Die SST-Werte für Dänemark von Stokke sind in Abbildung 4 ebenfalls zum Vergleich eingezeichnet. Die CO₂-Schätzungen sind etwas niedriger als andere PETM-Schätzungen und nur geringfügig höher als heute, aber die globalen Durchschnittstemperaturen waren 10-12 °C höher.

Heute messen wir das atmosphärische CO₂ kontinuierlich, viele Male am Tag, und jede Probe hat ein genaues Datum und eine genaue Uhrzeit. Die Daten aus 56 Ma sind natürlich nicht mit den heutigen vergleichbar. Beerling und Royer behaupten, dass der höchste CO₂-Gehalt 52 Mio. Jahre nach dem PETM auftrat (siehe Abbildung 5). Sie haben zwei CO₂-Schätzungen aus diesem Zeitraum: 1.868 ppm (1.092 – 3.501 ppm) und 659 ppm (439 – 878 ppm). Erhöhte CO₂-Werte gab es von 54 bis 32 Ma und liegen im Durchschnitt bei 800 ppm. Die **fehlende Korrelation zwischen dem CO₂-Anstieg und der Temperatur** im Zeitraum von 52 bis 57 Ma ist in Abbildung 4 deutlich zu erkennen.

[Hervorhebung vom Übersetzer]

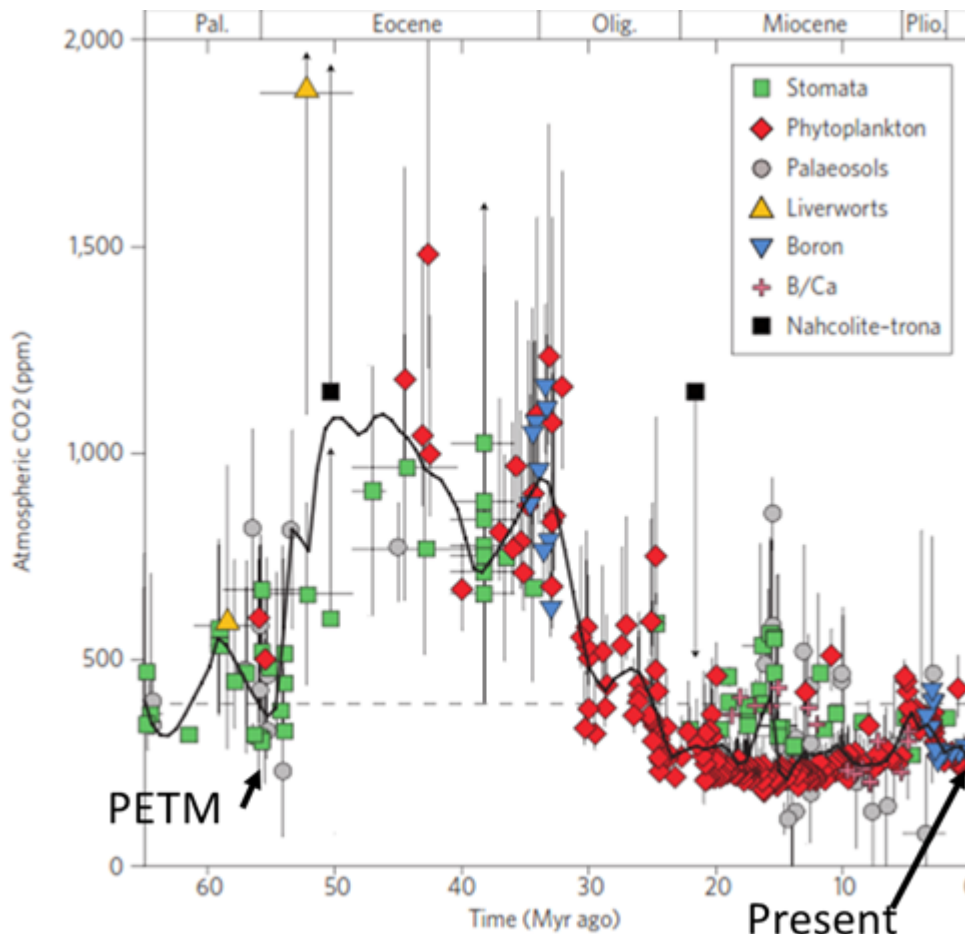


Abbildung 5. Verschiedene Schätzungen der CO₂-Konzentration im Känozoikum. Nach: (Beerling & Royer, 2011).

Während des PETM können wir sicher sein, dass die CO₂-Konzentration nur geringfügig höher war als heute, nicht hoch genug, um ein signifikanter Faktor für die Erwärmung zu sein, wie im AR6 anerkannt wird (IPCC, 2021, S. 5-14). Wir haben keine Ahnung, wie schnell es sich im PETM erwärmt hat oder wie schnell der CO₂-Anstieg im Vergleich zu heute war, da die Schätzungen Tausende bis Hunderttausende von Jahren auseinander liegen.

Der IPCC will das PETM als Beispiel dafür verwenden, was heute passieren kann, räumt aber ein, dass das Vertrauen in die Menge des während des PETM freigesetzten Kohlenstoffs gering bis mittel ist und dass der aus ihm abgeleitete CO₂-Anstieg nur die Hälfte der geschätzten Erwärmung während dieser Zeit erklären kann (IPCC, 2021, S. 5-14). Sie versuchen auch, bisher ohne Erfolg, die globalen Temperaturen während des PETM zu modellieren. Ihre Modelle der CO₂-Auswirkungen auf das Klima während des PETM und anderer ausgewählter Zeiträume sagen die beobachtete Erwärmung nicht voraus, so dass man vernünftigerweise zu dem Schluss kommen könnte, dass die Modelle nicht funktionieren. Im AR6 wird jedoch festgestellt, dass dies bedeutet, dass sich die Rückkopplungen auf die Oberflächentemperatur mit der Oberflächentemperatur ändern. Die Rückkopplungen haben also Rückkopplungen (IPCC, 2021, S. 7-78). Sie

glauben nicht, dass die Modelle falsch sein können, sondern kommen zu dem Schluss, dass wir einfach einen weiteren Faktor einführen müssen. Dies ist Karl Poppers Definition von [Pseudowissenschaft](#), eine Hypothese, die nicht falsifiziert werden kann. Das PETM ist eine interessante Zeit in der Erdgeschichte, aber die Ursachen für die Erwärmung, den niedrigeren pH-Wert der Ozeane, das begrenzte Aussterben von Meerestieren und die zunehmende Vielfalt der Säugetiere sind unklar. Eines ist sicher: Das PETM ist kein Analogon für heute.

The bibliography can be downloaded [here](#).

Link:

<https://andymaypetrophysicist.com/2021/08/18/the-paleocene-eocene-thermal-maximum-or-petm/>

Übersetzt von [Christian Freuer](#) für das EIKE