

# Die außerordentlichen Wetter-Ereignisse von 2022 bis 2024\*

geschrieben von Chris Frey | 29. März 2024

Javier Vinós, [Climate Etc.](#)

*[\*Im Original lautet die Schlagzeile „...climate events...“. Auch im Beitrag wird „climate events“ mit „Wetterereignisse“ übersetzt. A. d. Übers.]*

Der unwahrscheinliche Vulkan, das wärmste Jahr und der Zusammenbruch des Polarwirbels.

Die Wetter-Ereignisse des Jahres 2022-24 waren wirklich außergewöhnlich. Von einem unwahrscheinlichen unterseeischen Vulkanausbruch über das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen bis hin zum Zusammenbruch des Polarwirbels nach drei plötzlichen stratosphärischen Erwärmungs-Ereignissen. Diese seltene Konvergenz stellt eine einzigartige Lernmöglichkeit für Klimatologen und Klimabegeisterte gleichermaßen dar und bietet Einblicke in ein Klimaereignis, das sich möglicherweise in Hunderten oder gar Tausenden von Jahren nicht wiederholen wird.

## 1. Januar 2022, der unwahrscheinliche Vulkan

Nie zuvor hat es einen unterseeischen Vulkanausbruch gegeben, dessen Rauchfahne bis in die Stratosphäre reichte und der eine große Menge an verdampftem Wasser absetzte. Zu diesem außergewöhnlichen Ereignis war es im Januar 2022 gekommen, als der Vulkan Hunga Tonga ausbrach. Die Bedingungen für ein solches Ereignis sind selten: Der Vulkan muss tief genug sein, um genügend Wasser mit der Wolke auszustoßen, aber nicht zu tief, um zu verhindern, dass es die Stratosphäre erreicht. Die meisten Unterwasservulkane erzeugen überhaupt keine Wasserfahnen, was den Ausbruch des Hunga Tonga umso bemerkenswerter macht.

Der Vulkan Hunga Tonga befand sich am Tag vor dem Ausbruch in einer Tiefe von 150 Metern an einem einzigartigen „Sweet Spot“. Außerdem muss die Eruption selbst außergewöhnlich stark sein, damit Wasserdampf in die Stratosphäre aufsteigen kann. Der Ausbruch des Hunga Tonga im Januar 2022 war der stärkste seit dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 und damit seit 30 Jahren.

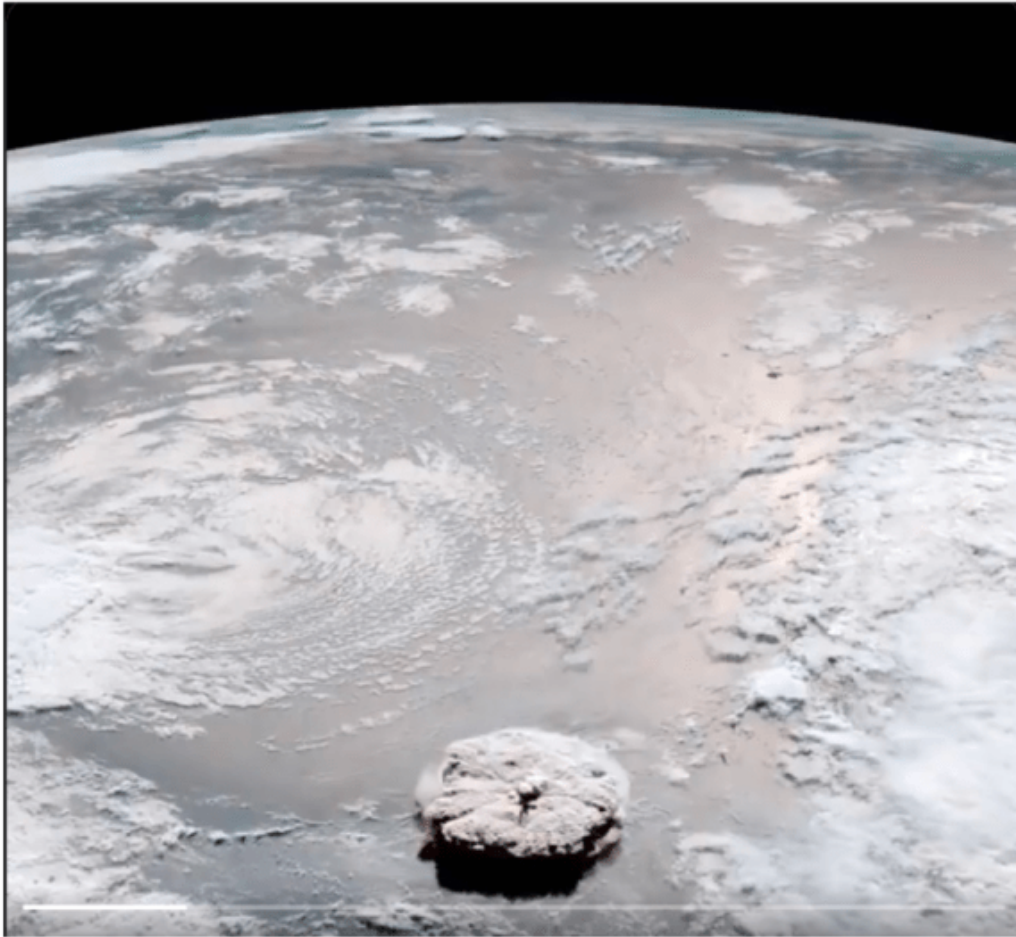


Figure 4. The Hunga Tonga eruption from space.

Abbildung 1. Der Ausbruch des Hunga Tonga aus dem Weltraum.

Aktive Unterwasservulkane in der entsprechenden Tiefe sind selten, und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Vulkan mit dieser Intensität ausbricht, ist relativ gering. Möglicherweise handelt es sich um ein Ereignis, das nur alle paar Jahrhunderte oder vielleicht sogar nur einmal pro Jahrtausend auftritt. Zweifellos war es ein außergewöhnlich seltenes Ereignis.

Während die stärksten Eruptionen wie z. B. der Tambora im Jahre 1815 das Wetter in der Hemisphäre einige Jahre lang stark beeinflussen können, deuten unsere Beobachtungen von Eruptionen wie Agung (1963), El Chichón (1982) und Pinatubo (1991) darauf hin, dass ihre Auswirkungen innerhalb von drei bis vier Jahren abklingen.

Die Vorstellung, dass die Kleine Eiszeit (LIA) durch verstärkte vulkanische Aktivität verursacht wurde, ist weit verbreitet. Die Daten sprechen jedoch dagegen. Die vulkanische Aktivität während der LIA war nicht ungewöhnlich hoch, sondern eher niedriger als im Durchschnitt des Holozäns (obwohl die vulkanische Aktivität im frühen 19. Jahrhundert, gegen Ende der LIA, außergewöhnlich hoch war). Der wichtigste ungewöhnliche Klimafaktor während der LIA war die außergewöhnlich

geringe Sonnenaktivität.

In die Stratosphäre eindringende Vulkanausbrüche führen zu erheblichen strahlungsbedingten, chemischen und dynamischen Veränderungen, wobei Schwefel eine Schlüsselrolle spielt. Vulkanisches Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) oxidiert, verbindet sich und aggregiert zu Sulfataerosolen. Diese Aerosole streuen die eintreffende kurzwellige Strahlung, was zu einer verringerten Oberflächeneinstrahlung und damit zu einer Abkühlung der Oberfläche führt. Außerdem absorbieren sie sowohl die ein- als auch die ausgehende Infrarotstrahlung und tragen so zur Erwärmung der Stratosphäre bei.

Die Auswirkungen des Hunga-Tonga-Ausbruchs sind jedoch genau das Gegenteil. Hunga Tonga wurde zwar mit Schwefeldioxid in Verbindung gebracht, aber die Hauptauswirkung ging von Wasserdampf aus. Wasserdampf ist ein starkes Treibhausgas, so dass der plötzliche Anstieg des Wasserdampfs in der Stratosphäre um 10 % an einem einzigen Tag die Trübung der Stratosphäre für ausgehende Infrarotstrahlung erhöhte. Anders als in der unteren Troposphäre, wo der Treibhauseffekt relativ gesättigt ist, wirkt sich der Zusatz von Wasserdampf in der Stratosphäre wesentlich stärker aus, befindet sich dieser doch damit weit oberhalb der durchschnittlichen Emissionshöhe der Erde (etwa 6 km). Außerdem verstärkt der erhöhte Wasserdampfgehalt in der Stratosphäre die Infrarot-Emissionen aus der Stratosphäre und kühlt sie dadurch erheblich ab.

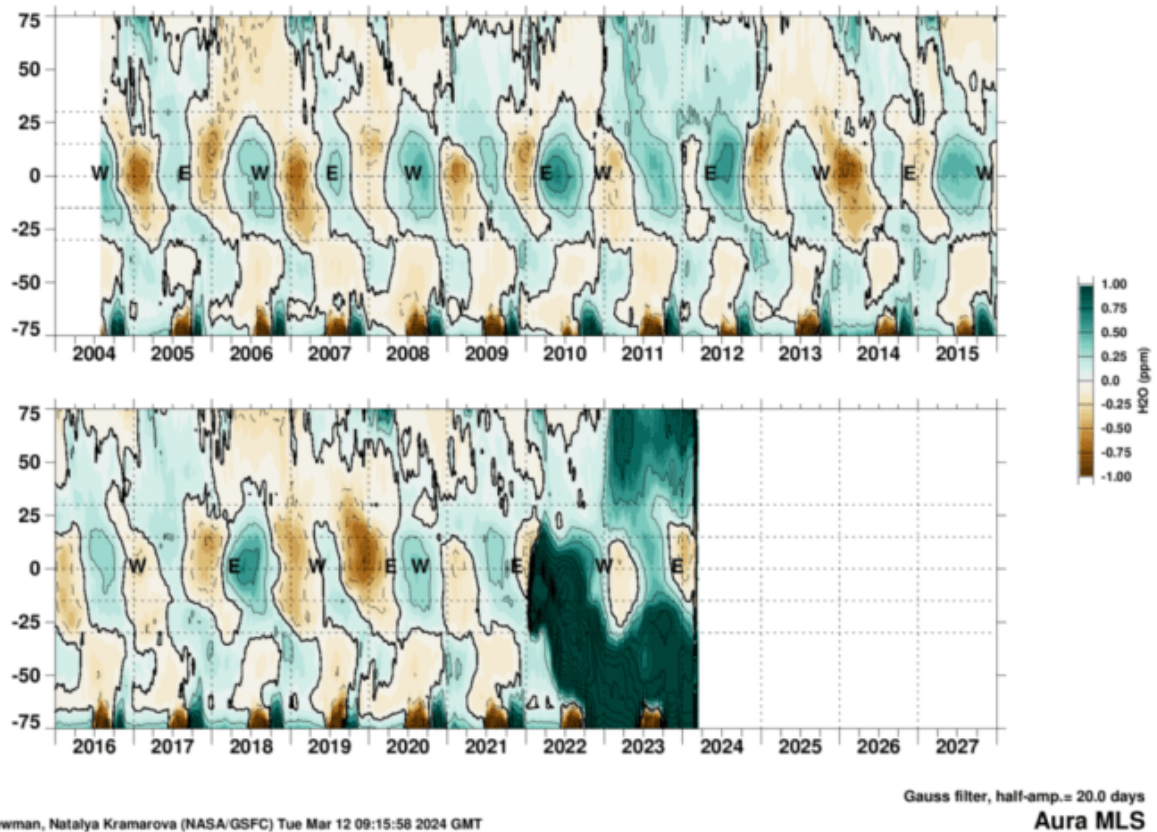
**H<sub>2</sub>O****31.6hPa**

Abbildung 2: Stratosphärischer Wasserdampf in ppm nach Breitengrad im Laufe der Zeit in 31,6 hPa Höhe. Die Entwicklung des Hunga-Tonga-Wasserdampfes ist von der tropischen Injektion in Richtung der Pole deutlich zu erkennen.

Der unwahrscheinliche inverse Vulkanausbruch von Hunga Tonga kühlt derzeit die Stratosphäre ab und erwärmt gleichzeitig die Oberfläche. Dieser Effekt wird jedoch im Laufe der Zeit allmählich abnehmen, wenn der überschüssige Wasserdampf in den nächsten 2 bis 4 Jahren aus der Stratosphäre entweicht. Abbildung 2 veranschaulicht die Bewegung des vulkanischen Wassers von den tropischen Regionen, in welche die dehydrierte Luft aus der Troposphäre eindringt, zu den mittleren und hohen Breiten, wo es in den kommenden Jahren allmählich die Stratosphäre verlassen wird.

Es stellt sich die Frage: Warum hat es mehr als ein Jahr gedauert, bis die Auswirkungen der stratosphärischen Veränderungen auf die Temperatur nach der Explosion festgestellt werden konnten? Normalerweise geht man davon aus, dass Strahlungseffekte sofort eintreten, sobald Wasserdampf oder Sulfataerosole in die Stratosphäre gelangen. Unser Wissen darüber, wie Vulkane das Wetter beeinflussen, ist jedoch nach wie vor unvollständig, und Klimamodelle haben Schwierigkeiten, diese Phänomene genau zu reproduzieren.

Der Transport in der Stratosphäre erfolgt schnell in Nord-Süd-Richtung,

aber sehr langsam in Bezug auf den Breitengrad und die Höhe, mit erheblichen saisonalen Schwankungen. Abhängig von Faktoren wie dem Breitengrad des Ausbruchs und der Jahreszeit können die Auswirkungen eines Vulkanausbruchs auf das Wetter sehr unterschiedlich sein. Der Ausbruch des Tambora liefert einen Präzedenzfall: Er ereignete sich im April 1815, aber seine Auswirkungen auf das Wetter, die zum „Jahr ohne Sommer“ führten, wurden erst im Juni 1816, also 15 Monate nach dem Ausbruch, festgestellt. Dieses historische Beispiel unterstreicht die Möglichkeit, dass Ereignisse, die mehr als ein Jahr nach einer Eruption eintreten, tatsächlich auf diese zurückgeführt werden können.

## **2. 2023, das wärmste Jahr jemals**

Ab Juni 2023 waren die letzten sieben Monate des Jahres die wärmste Periode seit Beginn der Aufzeichnungen und übertrafen die bisherigen Rekorde deutlich. Angesichts der beträchtlichen Temperaturschwankungen, die von Monat zu Monat zu beobachten sind, ist ein solches Ereignis recht bemerkenswert. Aber wie unwahrscheinlich ist es?

Anhand des HadCRUT5-Datensatzes stellen wir fest, dass es seit 1870 17 rekordverdächtige wärmste Jahre gegeben hat. Jedes Jahr in HadCRUT5, das alle vorangegangenen Jahre übertrifft, wird als Rekordjahr eingestuft, und der Rekordanstieg wird als Temperaturdifferenz zum vorherigen Rekordjahr gemessen (höchste Marke bis dahin). Zum Beispiel war 2009 das wärmste Jahr, aber es war nur  $0,005^{\circ}\text{C}$  wärmer als 2007, das vorherige Rekordjahr. Das Jahr 2023 war das wärmste Jahr und  $0,17^{\circ}\text{C}$  wärmer als 2016. Dies ist der größte Unterschied zwischen einem Rekordjahr und dem vorherigen Rekordjahr in der gesamten Reihe.

Abbildung 3 zeigt, dass 2023 mit  $+0,17^{\circ}\text{C}$  der größte Temperaturanstieg seit 153 Jahren zu verzeichnen war. Dieser Anstieg im Vergleich zu früheren Aufzeichnungen ist bemerkenswert, selbst für ein Jahr, das als das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen verzeichnet worden ist.

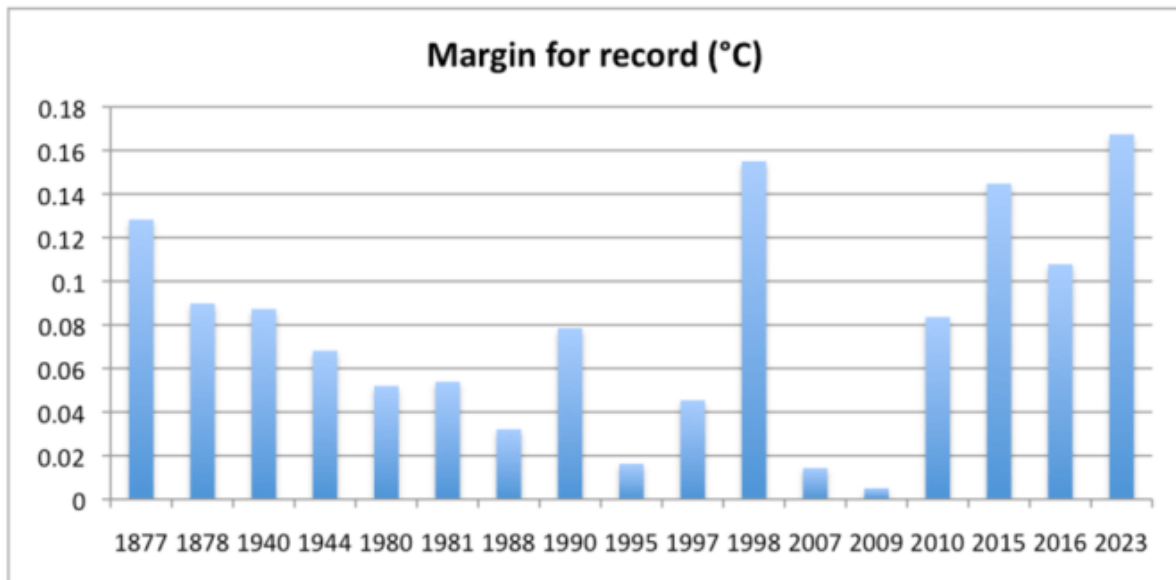


Abbildung 3. Die wärmsten Jahre im HadCRUT5-Datensatz seit 1870 mit dem Temperaturanstieg gegenüber dem vorherigen Rekord. Den größten Sprung gab es im Jahre 2023.

In den wärmsten Jahren stechen oft mehrere Monate als die wärmsten hervor (Abbildung 4, blaue Balken). Im Jahr 2023 gab es sieben solcher Monate, die nur 2016 hinter sich lassen und mit 2015 gleichziehen. Bemerkenswert ist, dass diese sieben wärmsten Monate aufeinander folgten und sich von Juni bis Dezember erstreckten. Die roten Balken in Abbildung 4 veranschaulichen die Anzahl der aufeinanderfolgenden Rekordmonate für jedes Rekordjahr. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Jahre im Datensatz mit fünf oder mehr aufeinanderfolgenden wärmsten Monaten mit sehr starken El-Niño-Jahren zusammenfallen: 1877-78, 1997-98 und 2015-2016.

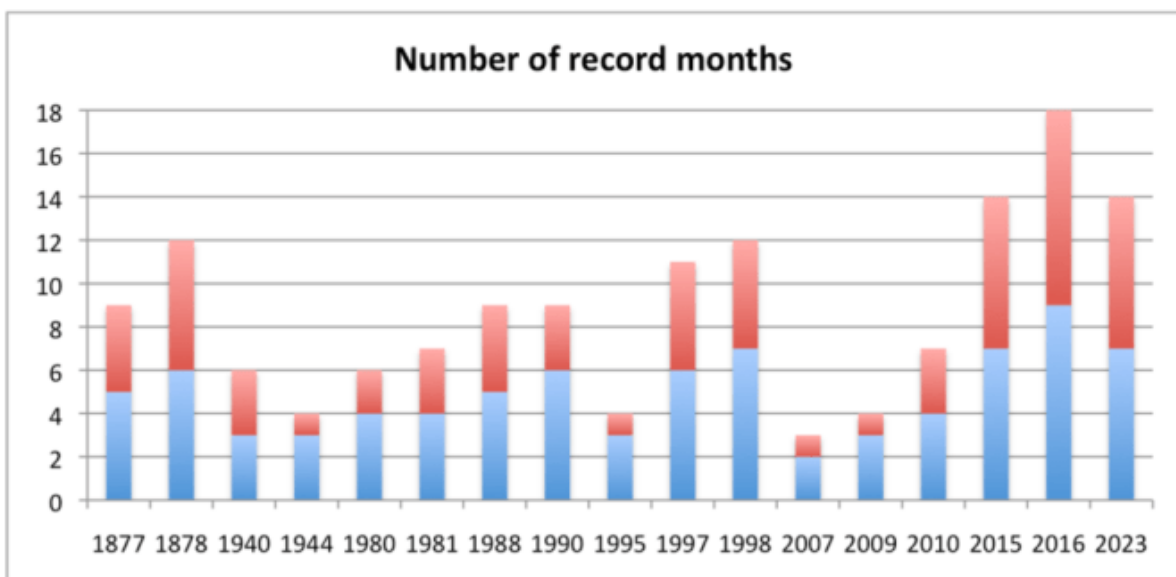


Abbildung 4. Die Anzahl der Rekordmonate in den Rekordjahren ist in blau, die Anzahl der aufeinanderfolgenden Rekordmonate in rot dargestellt.

Im Jahr 2023 reflektieren die Temperaturstatistiken ähnliche Bedingungen wie in den stärksten El-Niño-Jahren seit über einem Jahrhundert. Aber war dies wirklich der Fall? Es ist schwierig festzustellen, ob El Niño der Auslöser für den Wärmerekord im Jahr 2023 war. Sich allein auf die Temperatur des Pazifischen Ozeans als Kriterium für El Niño zu verlassen, würde zu einem Zirkelschluss führen. El Niño ist ein komplexes Phänomen, an dem sowohl die Atmosphäre als auch der Ozean beteiligt sind. Der Multivariate ENSO-Index ([MEI v2](#)) verwendet fünf Variablen – Luftdruck auf Meeresspiegel-Niveau, Temperatur der Meeresoberfläche, zonale Winde an der Oberfläche, meridionale Winde an der Oberfläche und ausgehende langwellige Strahlung – um eine Zeitreihe der ENSO-Bedingungen von 1979 bis heute zu erstellen.

Dieser Index zeigt, wenn er über das gesamte Jahr gemittelt wird, dass von allen Rekordjahren seit 1980 nur 1997-98 und 2015-16 das Ergebnis eines sehr starken El Niño waren. Das Jahr 2023 war sogar ein schwaches El-Niño-Jahr, trotz sehr hoher Meerestemperaturen.

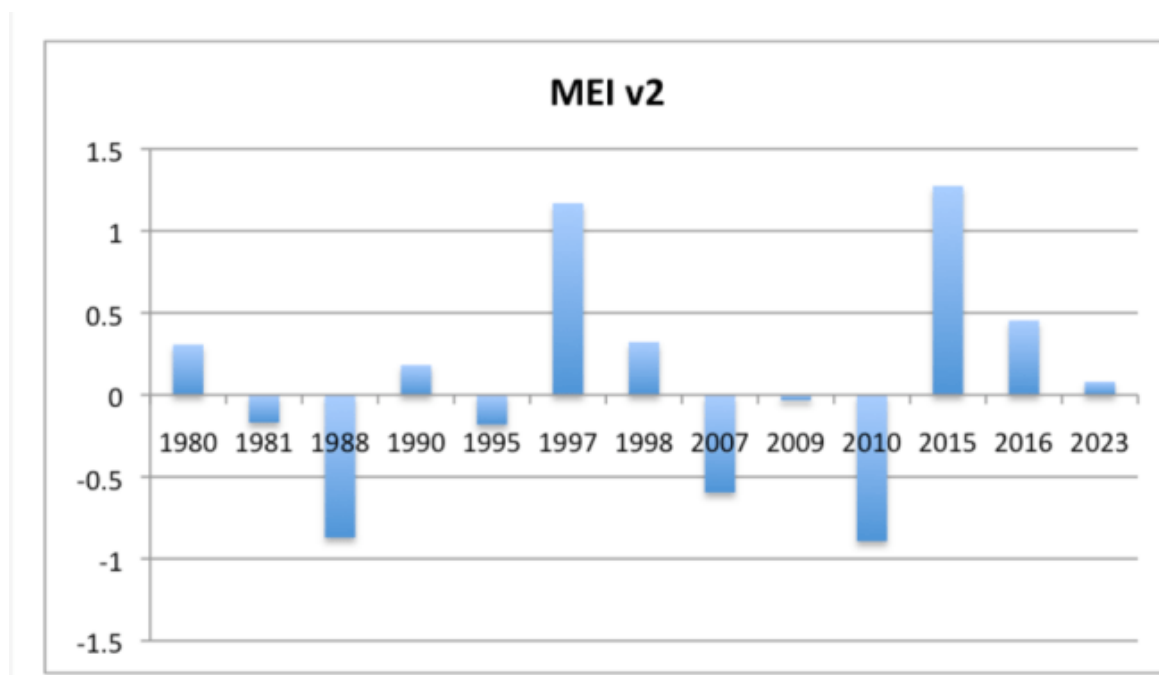


Abbildung 5. Jahresdurchschnittswerte des Multivariaten ENSO-Index für die wärmsten Rekordjahre.

Daraus lässt sich schließen, dass 2023 tatsächlich ein ungewöhnliches Jahr mit Rekordtemperaturen war. Obwohl es in Bezug auf die Überschreitung früherer Temperaturrekorde mit sehr starken El-Niño-Jahren konkurrierte, fiel es nicht wirklich in diese Kategorie.

Bemerkenswert ist, dass es trotz des Fehlens eines starken El Niño den höchsten Temperaturrekord in dem anderthalb Jahrhunderte umfassenden Datensatz aufstellte, und zwar mit dem größten Abstand.

In einem Artikel mit dem Titel „[State of the climate – summer 2023](#)“ zeigte Judith Curry, wie ungewöhnlich das Jahr 2023 in Bezug auf die globale Strahlungsbilanz am oberen Rand der Atmosphäre, die Komponenten der Oberflächen-Energiebilanz und die internen Modi der Klimavariabilität war, die durch atmosphärische und ozeanische Zirkulationsmuster bestimmt werden.

Das Ausmaß der Anomalien, die im Jahr 2023 in einem breiten Spektrum von Variablen auftraten, wurde noch nie zuvor aufgezeichnet. Es handelt sich um ein in unseren Aufzeichnungen bisher nicht dagewesenes Wetter-Ereignis.

### **3. Januar-März 2024, der Zusammenbruch des Polswirbels**

Der Polarwirbel ist ein kreisförmiges Windmuster, das sich auf rotierenden Planeten mit einer Atmosphäre entwickelt. Er resultiert aus der Erhaltung der potenziellen Wirbelstärke, einer Eigenschaft, die von der Corioliskraft und dem potenziellen Temperaturgradienten abhängt. Die potenzielle Temperatur bezieht sich auf den Teil der Temperatur eines Luftpakets, der nicht von seiner potenziellen Energie beeinflusst wird, und wird oft als die Temperatur definiert, die das Paket hätte, wenn es an die Oberfläche gebracht werden würde (1000 hPa).

In der nördlichen Hemisphäre kommt es gegen Ende des Sommers in der Arktis zu einem starken Temperaturabfall, wenn die Tage kürzer werden. Um die potenzielle Wirbelstärke aufrechtzuerhalten, verstärkt sich der Wind um die Polarregionen in west-östlicher Richtung. Die Bildung des Polarwirbels in der Stratosphäre erfolgt, wenn die vorherrschenden Ostwinde auf Westwinde umschlagen. Diese Verschiebung ist an der zonalen Windgeschwindigkeit zu erkennen, die um den September herum von negativ auf positiv wechselt (siehe Abbildung 6). Schließlich löst sich der Wirbel gegen April auf.

Die Winde im stratosphärischen Polarwirbel können bis zu 180 km/h erreichen und bilden eine gewaltige Barriere für den Wärmetransport aus den Tropen. Infolgedessen werden die Atmosphäre und die Oberfläche innerhalb des Wirbels sehr kalt und trocken, was den Energieverlust für den Planeten verringert, da kalte Oberflächen weniger Wärme abstrahlen.

In der Atmosphäre treten wie in jeder Flüssigkeit Wellen auf, planetarische Wellen genannt. Eine Ursache der Bildung dieser planetarischen Wellen sind große Gebirgsketten und Temperaturunterschiede zwischen Ozeanen und Land. Nach der [Rossby-Formel](#) verlagern sich diese Wellen umso schneller, je kürzer deren Wellenlänge und je stärker der sog. Zonale Grundstrom [= der Westwind-Impuls] ist. Schwächt sich der zonale Grundstrom ab, wird der Polarwirbel geschwächt,



so dass wärmere Luft einströmen kann, welche kalte Luft nach außen drückt. Dieser Austausch führt zu kälteren Winterbedingungen in den mittleren Breitengraden.

*[Ohne dem Autor zu nahe treten zu wollen – obiger Absatz ist keine direkte Übersetzung, denn es entsteht der Eindruck, dass der Autor – anders als der Übersetzer – nicht wirklich mit der Rossby-Theorie planetarischer Wellen vertraut ist. Wer mehr dazu wissen will, kann den Link anklicken. A. d. Übers.]*

Wenn sich die Winde so weit abschwächen, dass sie ihre Richtung ändern, zerfällt der Polarwirbel in zwei oder drei kleinere Wirbel, die sich voneinander entfernen. Die Luft in der Stratosphäre, die in das Gebiet eindringt, das zuvor von dem Wirbel eingenommen wurde, sinkt ab und erwärmt sich dabei erheblich. Dieses Phänomen, das als plötzliche Stratosphärenenerwärmung (SSW) bezeichnet wird, kann die Temperaturen in der polaren Stratosphäre innerhalb weniger Tage bis zu 40 °C ansteigen lassen. SSWs sind in der nördlichen Hemisphäre relativ häufig und treten in der Regel etwa alle zwei Jahre auf. In den folgenden Wochen führen sie in bestimmten Regionen, insbesondere im östlichen Nordamerika und im östlichen Eurasien, oft zu härteren Winterbedingungen.

El-Niño-Jahre begünstigen in der Regel SSW-Ereignisse und Zusammenbrüche des Polarwirbels.

Dies könnte auf die erhöhten Temperaturkontraste im Ozean während El Niño zurückzuführen sein, die planetarische Wellen mit größerer Amplitude erzeugen. Gelegentlich, etwa alle 10-20 Jahre, treten zwei SSW-Ereignisse im gleichen Winter auf. Die lange Periode dieses Winters (November bis März) markiert jedoch das erste Mal seit Beginn der Aufzeichnungen in den 1950er Jahren, dass drei SSW-Ereignisse beobachtet wurden. Der Zusammenbruch des Polarwirbels ereignete sich im Januar, Februar und März, wie in Abbildung 6 der [SSW-Überwachung der NOAA](#) dargestellt. Jedes Mal fiel die rote Linie, die die Westwindgeschwindigkeit darstellt, auf die Nulllinie. Zu dieser Jahreszeit ist es möglich, dass sich der stratosphärische Polarwirbel nicht neu bildet.

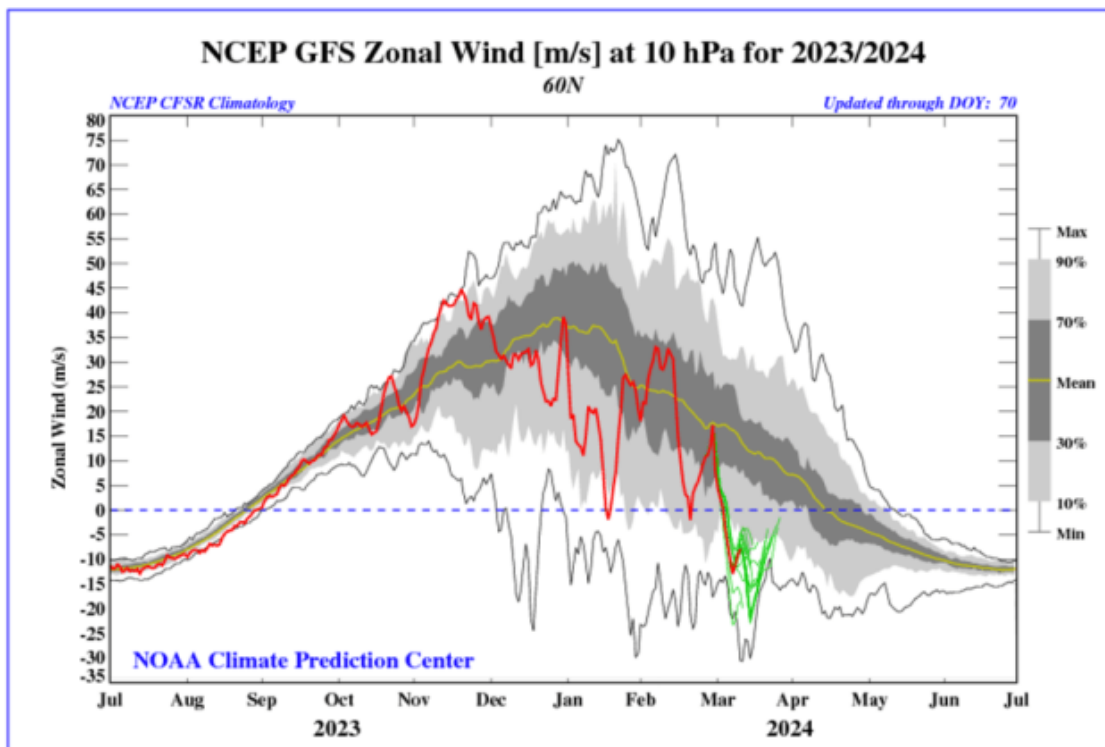


Abbildung 6. Die westlichen (positiven) stratosphärischen zonalen Winde bei 60°N (rote Linie) erreichten in diesem Jahr dreimal die Null-Geschwindigkeits-Linie, was jedes Mal auf eine plötzliche Erwärmung der Stratosphäre und den Zusammenbruch des Polarwirbels hindeutet.

Laut Adam Scaife vom britischen Met Office ist dieses Ereignis nicht nur beispiellos, sondern könnte auch [nur einmal in 250 Jahren auftreten](#). Dies geht aus einer aktuellen [statistischen Studie über SSW-Ereignisse](#) hervor, die mit einem saisonalen Vorhersagesystem innerhalb eines Klimamodells durchgeführt wurde. Es ist jedoch wichtig, einen Vorbehalt anzumerken: Klimamodelle haben immer noch Schwierigkeiten, die Stratosphäre genau abzubilden, und können das beobachtete Phänomen nicht reproduzieren, dass La-Niña-Jahre auch die Wahrscheinlichkeit von SSW-Ereignissen erhöhen.

Die Auswirkungen der drei SSW-Ereignisse in diesem Winter sind nicht besonders dramatisch. Zwar können sich normale Wettermuster verschieben und in einigen Gebieten zu ungewöhnlichen Temperaturen und Niederschlägen führen, doch sind die Auswirkungen nur vorübergehend. Allerdings wirken sich diese Ereignisse auf die Temperaturen in der Arktis und damit auf die Energiemenge aus, die den Planeten verlässt. Die Abschwächung des Polarwirbels, wie in Abbildung 6 dargestellt, führt in diesem Winter zu einem verstärkten Wärmetransport in die Arktis und damit zu höheren Temperaturen in dieser Region.

Abbildung 7 veranschaulicht diesen Trend, wobei die orangefarbene Linie die Temperaturen in der Arktis im Jahr 2023 nach Angaben des Dänischen Meteorologischen Instituts und die grüne Linie die Temperaturen in

diesem Jahr darstellt. Da der Treibhauseffekt während des arktischen Winters aufgrund des geringen Wasserdampfs in der Atmosphäre relativ schwach ist, entweicht aufgrund des geschwächten Wirbels mehr Energie vom Planeten. Dadurch wird die ungewöhnliche Erwärmung in der zweiten Hälfte des Jahres 2023 abgeschwächt und reduziert, die dazu beigetragen hat, dass es das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen war.

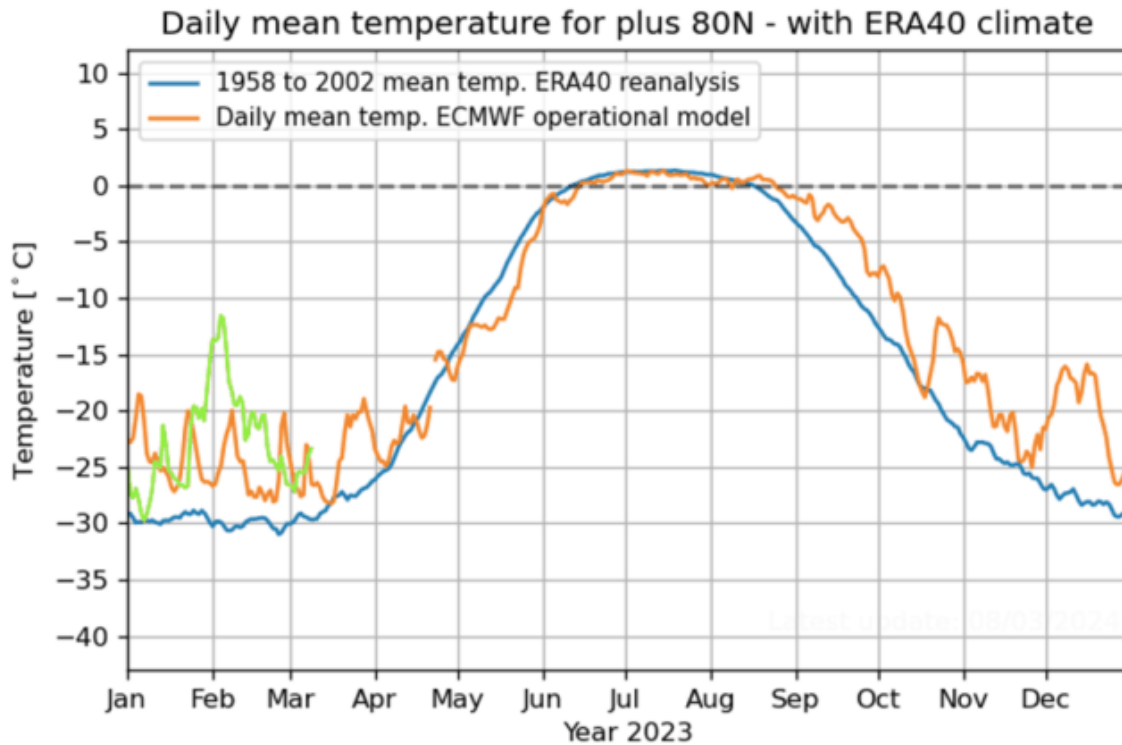


Abbildung 7. Oberflächentemperatur in der Arktis für die Jahre 2023 (orange) und 2024 (grün), verglichen mit dem Durchschnitt von 1958-2002 (blau).

Trotz der zusätzlichen Wärme, die in die Arktis transportiert wird und zu einem Temperaturanstieg führt, ist die Ausdehnung des arktischen Meereises nicht entsprechend zurückgegangen. Tatsächlich übersteigt die Meereisausdehnung in diesem Winter den Durchschnitt für 2010-2020. Es scheint, dass das arktische Eis entgegen den weit verbreiteten Befürchtungen über sein Verschwinden widerstandsfähig und stabil bleibt.

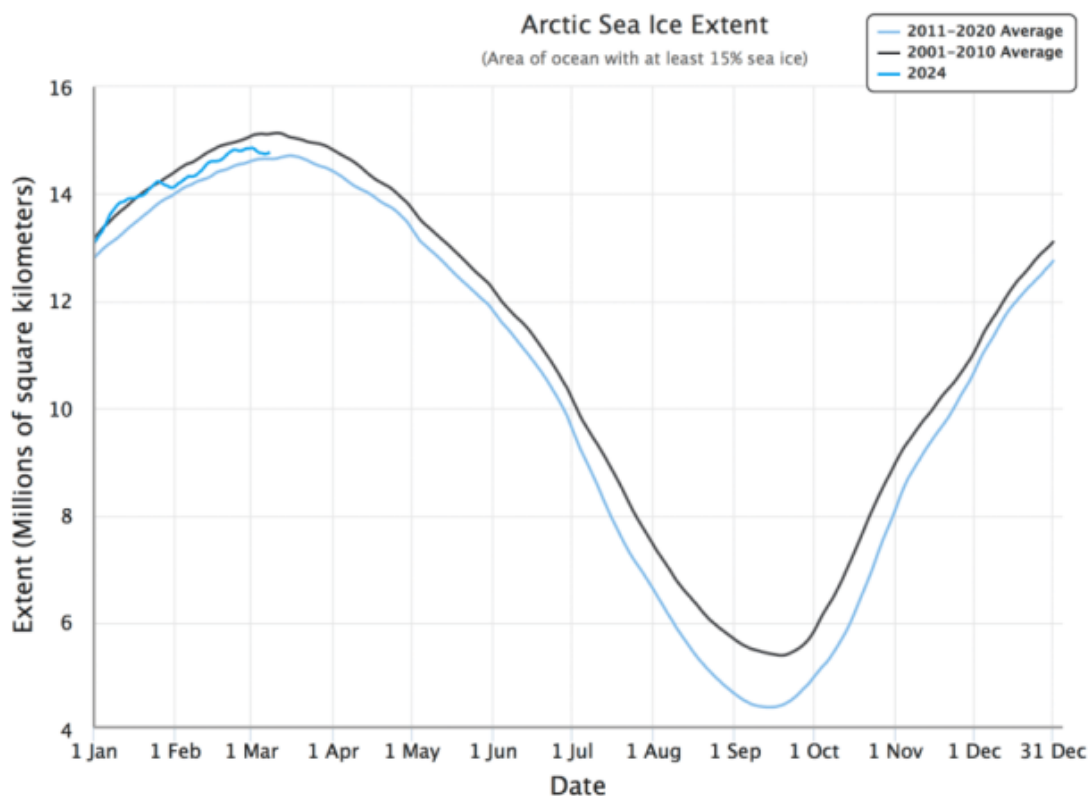


Abbildung 8. Ausdehnung des arktischen Meereises im Jahr 2024 im Vergleich zu den dekadischen Durchschnittswerten für 2001-10 und 2011-20 des National Snow and Ice Data Center.

#### 4. Was ist in naher Zukunft zu erwarten?

Der unwahrscheinliche Vulkanausbruch ist die wahrscheinliche Ursache für die außergewöhnliche Erwärmung, die wiederum zum Auftreten der beispiellosen drei SSW-Ereignisse führte.

Unser Verständnis der Auswirkungen dieser Ereignisse unterstützt diese Interpretation.

Historische Daten über die wärmsten Jahre deuten darauf hin, dass das Jahr 2024 mit hoher Wahrscheinlichkeit erneut den Temperaturrekord brechen wird, ähnlich wie die Jahre 1877-78, 1980-81, 1997-98 und 2015-16. Wenn wir jedoch die Hunga-Tonga-Eruption als Hauptursache für die Erwärmung identifiziert haben, können wir davon ausgehen, dass der überschüssige Wasserdampf, wenn er die Stratosphäre verlässt, zu einer Abkühlung an der Oberfläche führt, was die Temperaturen in den nächsten drei bis vier Jahren senken könnte. Studien wie [Solomon et al. \(2010\)](#) haben bereits die negativen Auswirkungen der Austrocknung der Stratosphäre auf die globale Erwärmung aufgezeigt. Die durch den Hunga-Tonga-Vulkan verursachte Erwärmung dürfte sich wieder umkehren.

Darüber hinaus könnten andere Faktoren, die sich auf die Temperaturen auswirken, wie der Rückgang der Sonnenaktivität nach dem Maximum des Sonnenzyklus 25 und ein künftiger Wechsel der atlantischen

multidekadischen Oszillation in ihre kalte Phase zu einer großen Pause bei der globalen Erwärmung beitragen. Nimmt man die Temperatur von 2023-24 als Bezugspunkt, könnte es in den kommenden Jahren sogar zu einer gewissen Abkühlung kommen. Es sind in der Tat interessante Zeiten, was die Klimadynamik betrifft.

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2024/03/25/the-extraordinary-climate-events-of-2022-24/>

Übersetzt und teils modifiziert von Christian Freuer für das EIKE