



KLIMA-ZUSTANDSBERICHT 2023

Ole Humlum



The State of the Climate 2023

Ole Humlum

Report 61, The Global Warming Policy Foundation

© Copyright 2024, The Global Warming Policy Foundation

Über den Autor

Ole Humlum ist ehemaliger Professor für physische Geographie am Universitätszentrum in Svalbard, Norwegen, und emeritierter Professor für physische Geographie an der Universität Oslo, Norwegen.



Inhalt

<i>Über den Autor</i>	ii
1. Einführung	1
2. Zehn Fakten zum Jahr 2023	3
3. Lufttemperaturen	4
4. Atmosphärische Treibhausgase	20
5. Ozean-Temperaturen	24
6. Ozeanische Oszillationen	34
7. Sea-level	37
8. Schnee und Eis	43
9. Niederschlag	48
10. Stürme und Wind	50
11. Sonstige Sturm- und Windbeobachtungen	52
12. Zusammenfassung für 2023	54
13. Schriftliche Referenzen	58
14. Links zu Datenquellen, abgerufen Januar-Februar 2024	58



KLIMA-ZUSTANDSBERICHT

2023

Ole Humlum



1. Einführung

Dieser Bericht richtet sich an Personen, die sich eine eigene Meinung zu Fragen des Klimas bilden wollen. Er konzentriert sich auf öffentlich zugängliche Beobachtungsdaten und nicht auf die Ergebnisse numerischer Modelle, obwohl es einige Ausnahmen gibt, wie z. B. die Abbildung 42. Referenzen und Datenquellen sind am Ende aufgeführt.

Die hier vorgestellten Beobachtungsdaten offenbaren eine grosse Anzahl natürlicher Schwankungen, von denen einige in mehr als einer Reihe auftreten. Das Vorhandensein solcher natürlicher

Klimaschwankungen wird nicht immer in vollem Umfang anerkannt und daher im Allgemeinen in der aktuellen Klimadiskussion nicht berücksichtigt. Die Triebkräfte der meisten dieser Klimaschwankungen sind noch nicht vollständig bekannt, sollten aber in Zukunft einen wichtigen Schwerpunkt der Klimaforschung darstellen.

In diesem Bericht werden die meteorologischen und klimatischen Beobachtungen gemäss der folgenden Gesamtstruktur beschrieben: Atmosphäre, Ozeane, Meeresspiegel, Meereis, Schneedecke, Niederschlag und Stürme. Im letzten Abschnitt werden die Beobachtungen für das Jahr 2023 kurz zusammengefasst.



2. Zehn Fakten zum Jahr 2023

1. Die Lufttemperaturen im Jahr 2023 waren die höchsten seit Beginn der Aufzeichnungen (seit 1850/1880/1979, je nach den jeweiligen Datenreihen). Die jüngste Erwärmung ist nicht symmetrisch, sondern ist hauptsächlich auf der Nordhemisphäre zu beobachten (Abbildungen 1 und 13).
2. Die arktischen Lufttemperaturen sind während der Satellitenära (seit 1979) angestiegen, die antarktischen Temperaturen bleiben jedoch im Wesentlichen stabil (Abbildung 14).
3. Seit 2004 haben sich die oberen 1'900 m der Ozeane weltweit netto um etwa 0,037 °C erwärmt. Die stärkste Erwärmung (etwa 0,2°C) findet in den obersten 100 m statt, und zwar hauptsächlich in Regionen in der Nähe des Äquators, wo die grösste Menge der Sonneneinstrahlung empfangen wird (Abbildung 28).
4. Seit 2004 haben die nördlichen Ozeane (55–65°N) im Durchschnitt eine deutliche Abkühlung bis in 1'400 m Tiefe und eine leichte Erwärmung unterhalb dieser Tiefe erfahren (Abbildung 29). Im selben Zeitraum haben die südlichen Ozeane (55–65°S) im Durchschnitt eine gewisse Erwärmung in den meisten Tiefen (über 1'900 m) erfahren, aber hauptsächlich in der Nähe der Oberfläche.
5. Der Meeresspiegel steigt laut Satelliten weltweit mit etwa 3,4 mm pro Jahr oder mehr, laut Küstenpegeln jedoch nur mit 1–2 mm pro Jahr (Abbildungen 39 und 41). Lokale und regionale Veränderungen des Meeresspiegels weichen in der Regel erheblich von diesen globalen Durchschnittswerten ab.
6. Die globale Meereisausdehnung liegt weiterhin deutlich unter dem Durchschnitt der Satellitenära (seit 1979). Seit 2018 ist sie jedoch quasistabil geblieben und hat vielleicht sogar leicht zugenommen (Abbildung 43).
7. Die globale Schneedecke ist während der gesamten Satellitenära im Wesentlichen stabil geblieben (Abbildung 47), wenn auch mit erheblichen regionalen und saisonalen Schwankungen.
8. Die weltweiten Niederschläge variieren zwischen mehr als 3'000 mm pro Jahr in feuchten Regionen und fast nichts in Wüsten. Der globale Durchschnittsniederschlag schwankt von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, aber seit 1901 gibt es keinen eindeutigen Gesamttrend (Abbildung 57).
9. Die Häufigkeit von Stürmen und Hurrikänen variiert im Laufe der Zeit, ohne dass jedoch ein klarer globaler Trend zu höheren oder niedrigeren Werten erkennbar ist (Abbildung 51).
10. Die Beobachtungen bestätigen die anhaltende langfristige Variabilität der durchschnittlichen meteorologischen und ozeanographischen Bedingungen, stützen aber nicht die Vorstellung einer anhaltenden Klimakrise.

3. Lufttemperaturen

Das räumliche Muster der globalen Oberflächenlufttemperaturen im Jahr 2023

Die globale durchschnittliche Oberflächenlufttemperatur im Jahr 2023 war die höchste seit Beginn der Aufzeichnungen für alle in diesem Bericht berücksichtigten Datenbanken (Abbildung 1). Das Jahr wurde von einer warmen El Niño-Episode beeinflusst (Pazifischer Ozean; siehe Abschnitt 5).

Die nördliche Hemisphäre war durch regionale Temperaturkontraste gekennzeichnet, insbesondere nördlich von 30°N. Die ausgeprägtesten Temperaturereignisse waren die hohen Durchschnittstemperaturen in Kanada und in Teilen des westlichen Russlands. Im Gegensatz dazu wiesen die westlichen USA, grosse Teile des Nordatlantiks, Nordeuropa, Sibirien und Alaska relativ niedrige Durchschnittstemperaturen auf (im Vergleich zu den letzten 10 Jahren).

In der Arktis waren die kanadischen und russischen Sektoren relativ warm, während die grönländischen, atlantischen und sibirischen Sektoren relativ kühl waren (Abbildung 2a).

In Äquatornähe lagen die Oberflächentemperaturen im Allgemeinen über dem Durchschnitt der letzten 10 Jahre, was auf die anhaltende El Niño-Episode im Pazifischen Ozean zurückzuführen

ist. Dies erklärt die hohe globale Durchschnittstemperatur im Jahr 2023; nicht weniger als 50 % der Erdoberfläche befindet sich zwischen 30°N und 30°S.

In der südlichen Hemisphäre lagen die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen nahe oder unter dem Durchschnitt der letzten 10 Jahre. Insbesondere Südamerika und der größte Teil des südlichen Afrikas und Australiens waren kühl.

Über den Ozeanen lagen die Temperaturen in der Nähe oder unter dem 10-Jahres-Durchschnitt, mit Ausnahme der südlichen Teile des Südatlantiks, die relativ warm waren.

Der Ozean um den antarktischen Kontinent war 2023 im Allgemeinen durch relativ hohe Oberflächenlufttemperaturen gekennzeichnet (Abbildung 2b). Nur der Ozean hinter Teilen der Westantarktis war relativ kalt. Der größte Teil des antarktischen Kontinents war relativ kalt. Nur Teile des atlantischen Sektors der Ostantarktis waren relativ warm.

Der Einfluss der Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption auf die meteorologischen Bedingungen im Jahr 2023 ist noch ungewiss. Die Eruption,

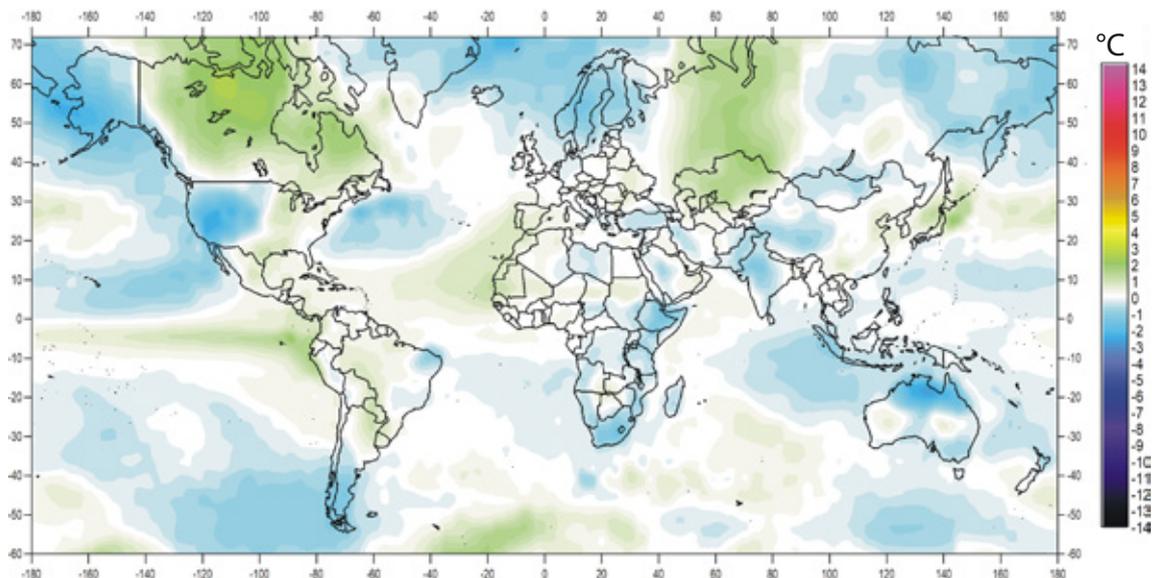


Abbildung 1: Lufttemperaturen an der Oberfläche im Jahr 2023 im Vergleich zum Durchschnitt der letzten 10 Jahre.

Grün-gelb-rote Farben zeigen Gebiete an, in denen die Temperatur über dem Durchschnitt liegt, während blaue Farben niedrigere Temperaturen als der Durchschnitt anzeigen. Datenquelle: Remote Sensed Surface Temperature Anomaly, AIRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval 1-degree x 1-degree V006 (<https://airs.jpl.nasa.gov/>), abgerufen vom GISS-Datenportal (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>).

die sich im Januar 2022 im südlichen Pazifischen Ozean ereignete, setzte eine enorme Wasserdampffahne in der Stratosphäre frei, aber es gibt wenig Hinweise darauf, dass dies einen Einfluss auf die atmosphärischen Temperaturen hatte (siehe auch Abbildung 16).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die globalen durchschnittlichen Oberflächentemperaturen im Jahr 2023 im Vergleich zu langen instrumentellen Aufzeichnungen (seit 1850) Rekordwerte erreichten, was auf die immer noch anhaltende El Niño-Episode zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu waren die beiden vorangegangenen Jahre 2021 und 2022 von einem kalten La Niña im Pazifischen Ozean beeinflusst. Somit wird die Aufzeichnung der globalen Oberflächentemperatur im Jahr 2023 weiterhin erheblich von ozeanographischen Phänomenen beeinflusst.

In den Karten in den Abbildungen 1 und 2 wird ein 10-jähriger Referenzzeitraum zum Vergleich herangezogen. Häufig wird für solche Vergleiche ein 30-jähriger Referenzzeitraum verwendet, der bis zum Ende jedes Jahrzehnts, das mit Null endet, aktualisiert werden soll (1951–1980, 1961–1990 usw.). Das Konzept des Normalklimas geht auf den ersten Teil des 20. Jahrhunderts zurück. Damals und bis etwa 1960 glaubte man allgemein, dass das Klima für alle praktischen Zwecke als konstant

angesehen werden könne, unabhängig davon, wie deutlich die Schwankungen von Jahr zu Jahr gewesen sein mögen. Die Meteorologen beschlossen daher, mit einem durchschnittlichen oder «normalen» Klima zu arbeiten, das durch einen 30-jährigen Zeitraum definiert war, der als «normaler» Zeitraum bezeichnet wurde, da man davon ausging, dass dieser Zeitraum lang genug war, um alle dazwischen liegenden Schwankungen auszugleichen. Tatsächlich ist eine 30-jährige Normalperiode eine unglückliche Wahl, denn mehrere Beobachtungsdaten zeigen, dass es globale Klimaparameter gibt, die von periodischen Veränderungen von 50–70 Jahren Dauer beeinflusst werden (siehe z. B. die Kommentare zu den Abbildungen 8–10 und 52). Der traditionelle 30-jährige Referenzzeitraum ist etwa die Hälfte dieses Zeitintervalls und ist daher als Referenzzeitraum höchst ungeeignet. Die Entscheidung über die optimale Länge eines Bezugszeitraums ist natürlich nicht einfach und erfordert die Kenntnis der in den Daten enthaltenen natürlichen Zyklen. Der dekadische Ansatz, der hier für die Karten gewählt wurde, entspricht der Gedächtnisspanne vieler Menschen und wird auch von anderen Institutionen wie dem Dänischen Meteorologischen Institut als Referenzzeitraum verwendet.

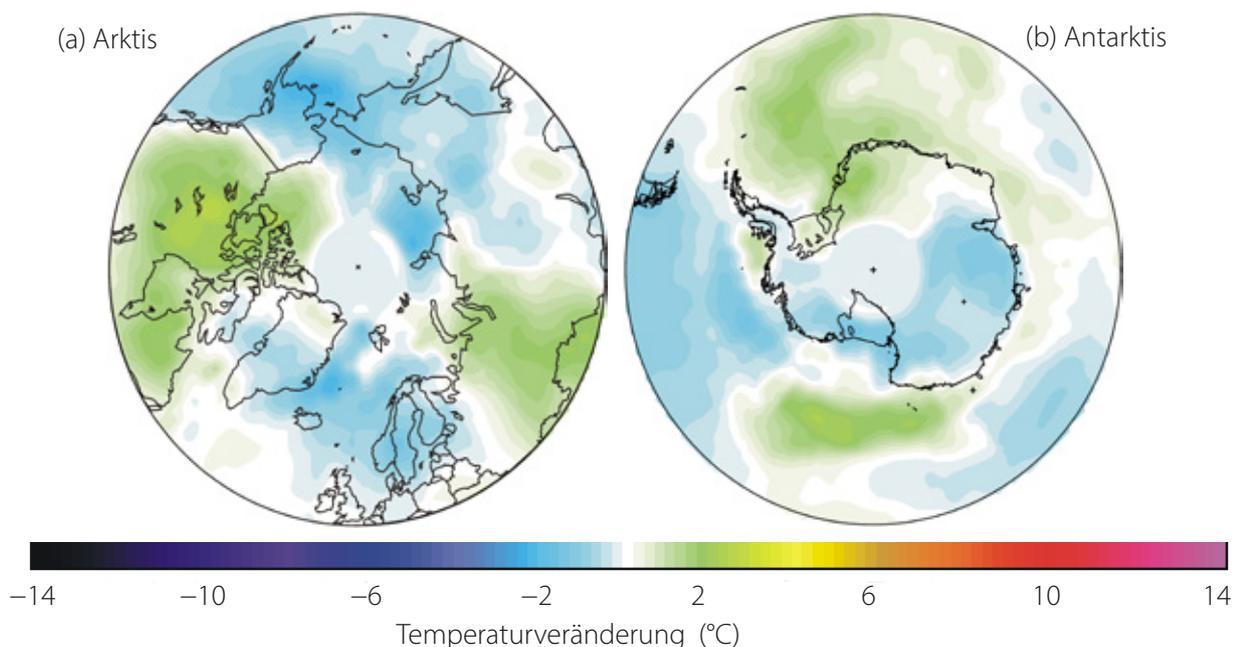


Abbildung 2: Polare Oberflächenlufttemperaturen 2023 im Vergleich zum Durchschnitt der letzten 10 Jahre.

Details wie in Abbildung 1.

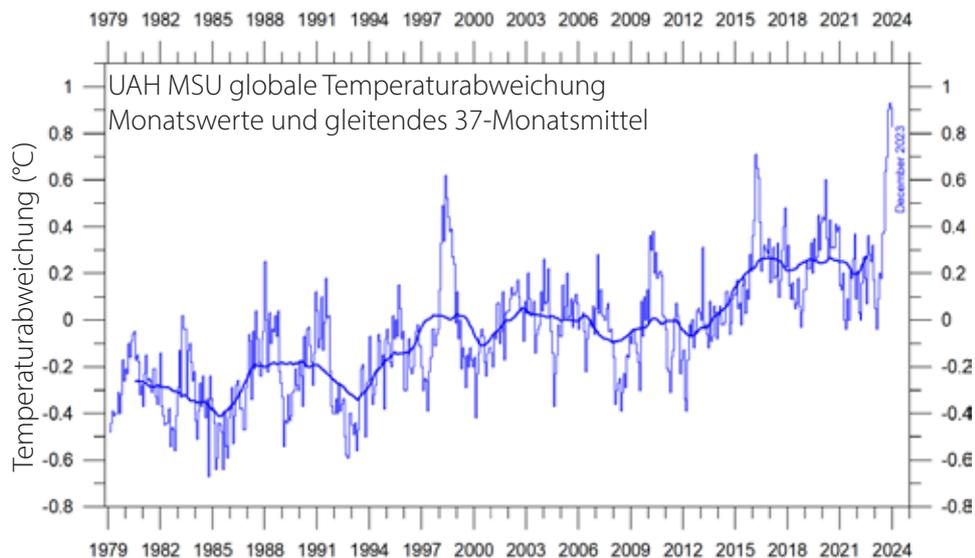
Globale monatliche Lufttemperatur in der unteren Troposphäre seit 1979

Die Satellitentemperaturaufzeichnungen für die untere Troposphäre zeigen Temperaturspitzen im Zusammenhang mit den El Niños 2015–16 und 2019–20, mit Temperaturrückgängen nach jedem El Niño aufgrund der darauf folgenden La Niñas (Abbildung 3). Die jüngste Entwicklung ist ein erneuter Temperaturanstieg seit Mai-Juni 2023, der auf einen neuen, noch andauernden El Niño zurückzuführen ist (Abbildung 29). Viele El Niños erreichen ihren Höhepunkt während des Winters auf der Nordhalbkugel. Aus den beiden Diagrammen in Abbildung 4 geht jedoch hervor, dass die gegenwärtige Episode etwas früher endete, nämlich im Herbst und Frühwinter 2023 auf der Nordhalbkugel.

Die Gesamttemperaturschwankungen in den Diagrammen (Abbildungen 3 und 4) sind für die beiden Datenreihen ähnlich, aber der Gesamttemperaturanstieg von 1979 bis 2023 ist für die RSS-Aufzeichnung größer als für die UAH-Aufzeichnung (Abbildung 5). Vor der recht umfangreichen Anpassung der RSS-Reihe im Jahr 2017 war der Temperaturanstieg bei beiden Datensätzen fast identisch. Abbildung 4 veranschaulicht die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen.

Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass sowohl die UAH- als auch die RSS-Aufzeichnungen eine signifikante 3,6-jährige Oszillation aufweisen

(a) UAH



(b) RSS

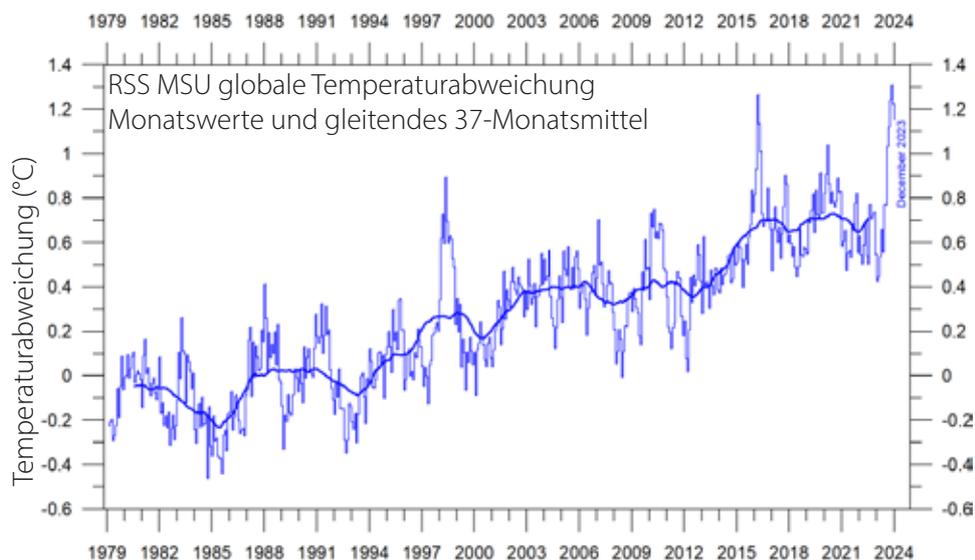


Abbildung 3: Globale monatliche Durchschnittstemperaturen der unteren Troposphäre seit 1979.

Die Grafik zeigt die Temperaturen in etwa 2 km Höhe. (a) UAH und (b) RSS. Die dicke Linie ist das einfache laufende 37-Monatsmittel, das ungefähr einem laufenden 3-Jahresmittel entspricht.

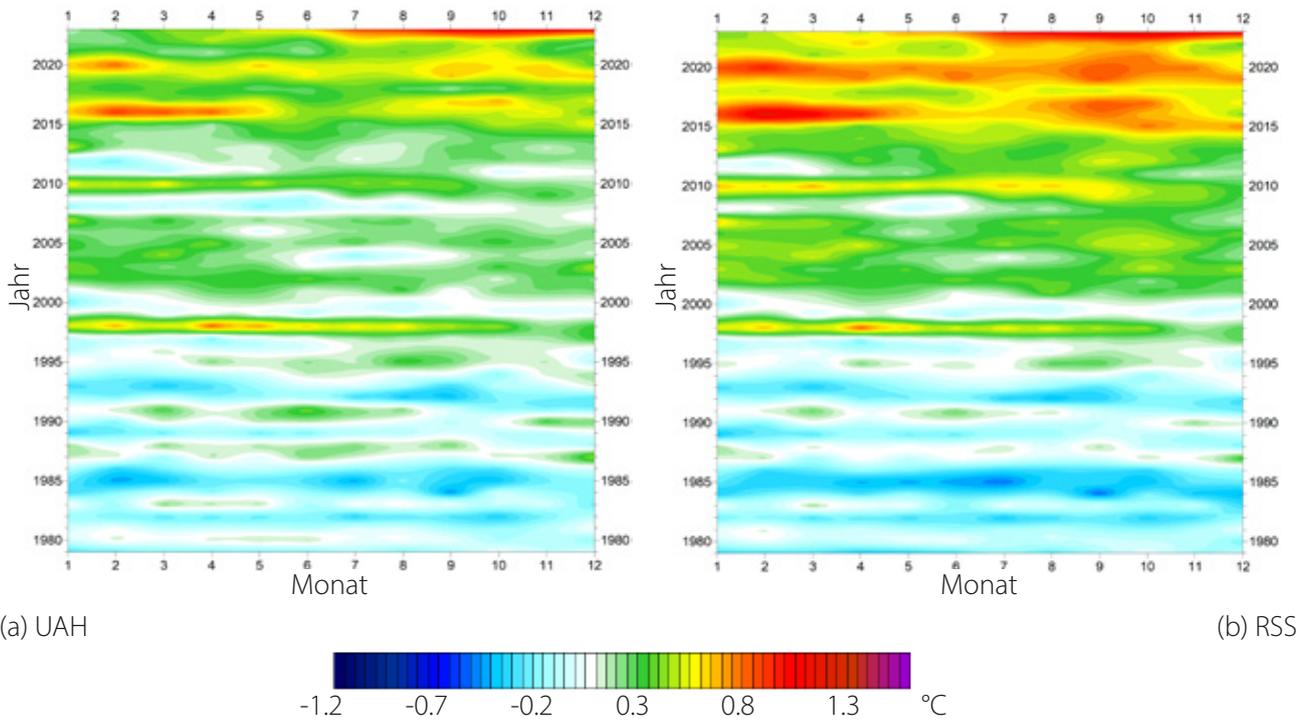


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der globalen Temperaturen in der unteren Troposphäre seit 1979.

Temperaturanomalie im Vergleich zu 1979–2008. Die Auswirkungen der El Niños von 1998, 2010, 2015–2016 und 2023 sind deutlich als «warme» Streifen zu erkennen, ebenso wie die Tendenz vieler El Niños, ihren Höhepunkt im Winter der nördlichen Hemisphäre zu erreichen. Da die verschiedenen Temperaturdatenbanken unterschiedliche Referenzzeiträume verwenden, wurden die Reihen vergleichbar gemacht, indem ihr jeweiliger 30-jähriger Durchschnitt für 1979–2008 auf null gesetzt wurde.

Untere Troposphäre: Jahresmittelwerte

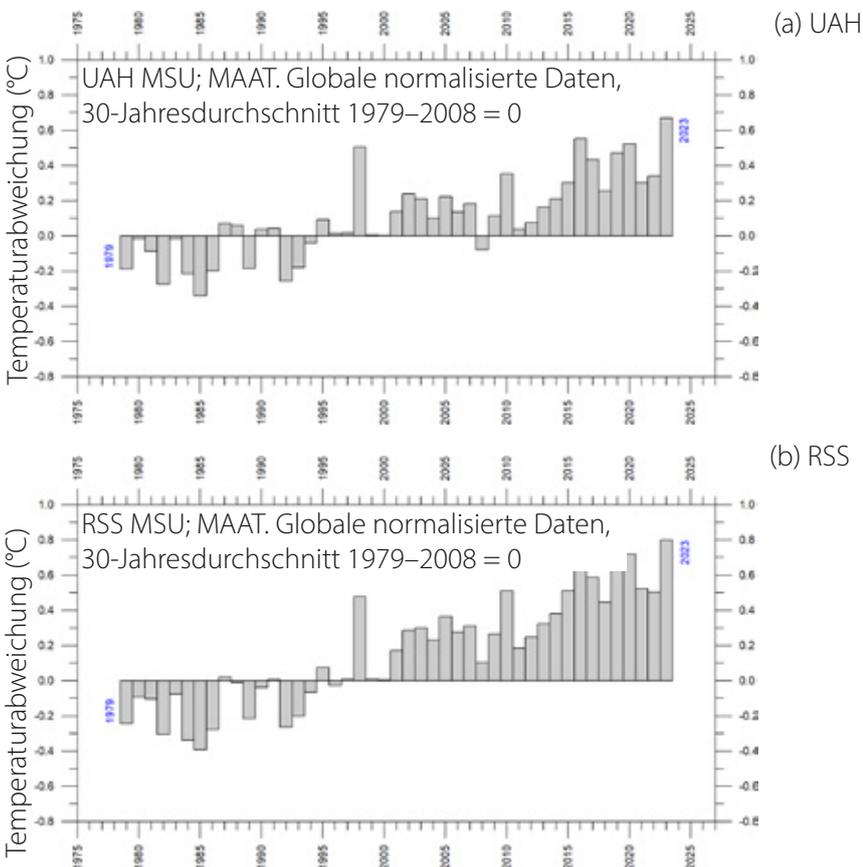


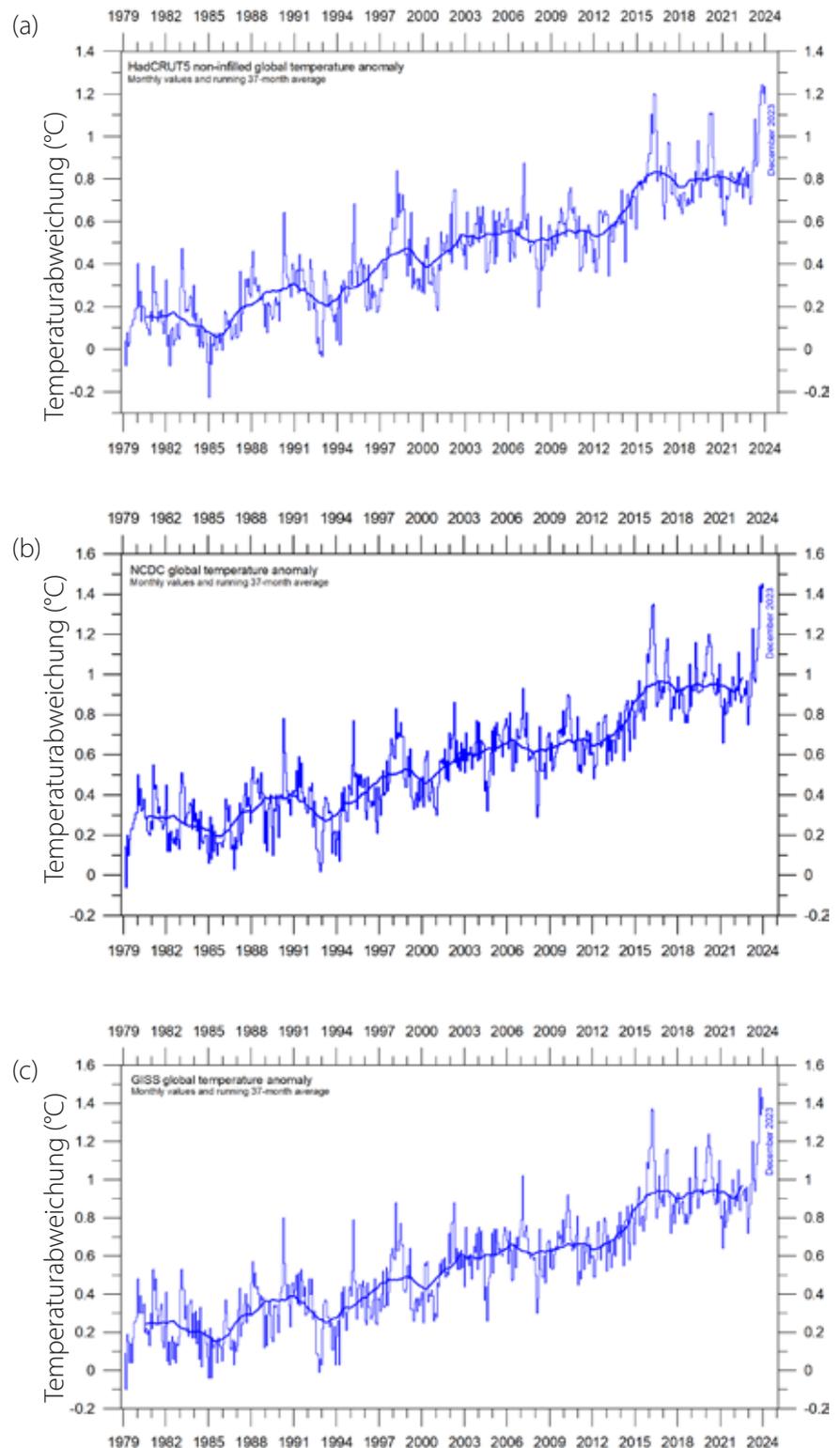
Abbildung 5: Globale mittlere jährliche Lufttemperaturen in der unteren Troposphäre seit 1979.

Satellitendaten, interpretiert von (a) der University of Alabama at Huntsville (UAH) und (b) Remote Sensing Systems (RSS), beide in den USA.

Globale mittlere jährliche Lufttemperatur der unteren Troposphäre seit 1979

Abbildung 6: Globale mittlere monatliche Oberflächenlufttemperaturen seit 1979.

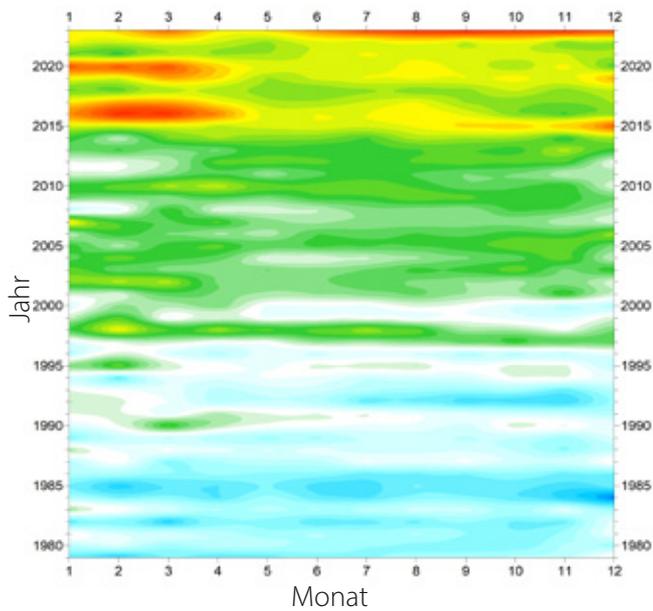
(a) HadCRUT5 (b) NCDC (c) GISS. Die dicke Linie ist das einfache gleitende 37-Monatsmittel, das fast einem gleitenden 3-Jahresmittel entspricht.



Globale monatliche Oberflächenlufttemperatur seit 1979

Alle drei Aufzeichnungen der Oberflächenlufttemperatur zeigen deutlich Schwankungen im Einklang mit El Niños und La Niñas, die sich im Pazifik abspielen (Abschnitt 5). Die jüngste Entwicklung ist ein erneuter Temperaturanstieg seit Mai-Juni 2023 aufgrund eines neuen und noch

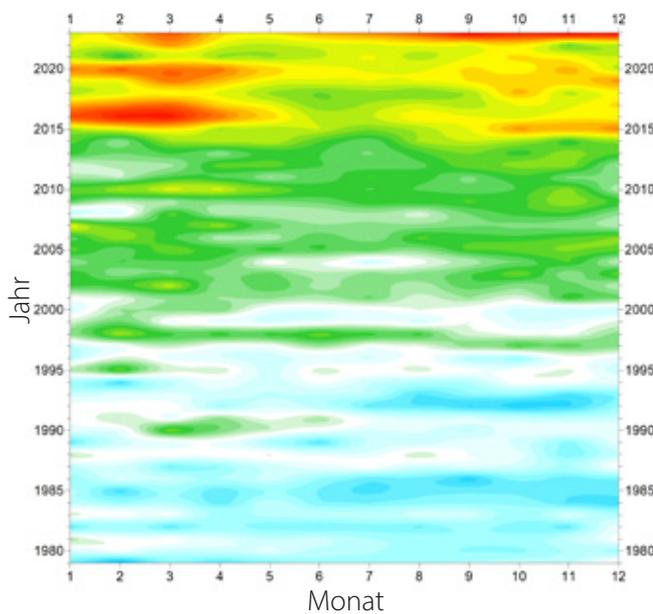
andauernden El Niño. Dieses ozeanografische Phänomen hat einen großen Einfluss auf die globale Oberflächentemperatur. Abbildung 7 veranschaulicht Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den drei Datenreihen.



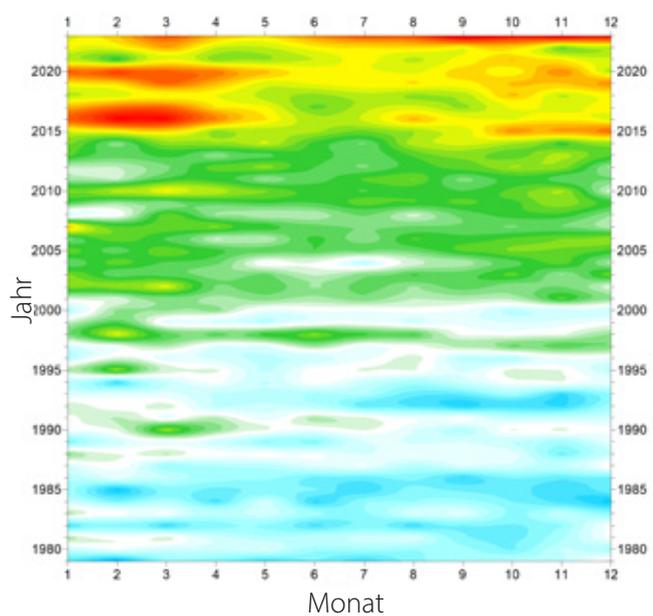
(a) HadCRUT

Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der globalen mittleren monatlichen Oberflächenlufttemperaturen.

(a) HadCRUT (b) NCDC (c) GISS. Temperaturanomalie (°C) im Vergleich zu 1979–2008. Da die verschiedenen Temperaturdatenbanken unterschiedliche Referenzzeiträume verwenden, wurden die Reihen vergleichbar gemacht, indem ihre individuellen 30-Jahres-Mittelwerte für 1979–2008 auf null gesetzt wurden..

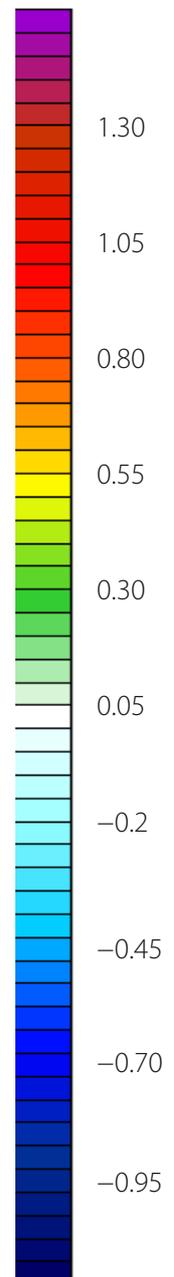


(b) NCDC



(c) GISS

Temperaturabweichung (°C)

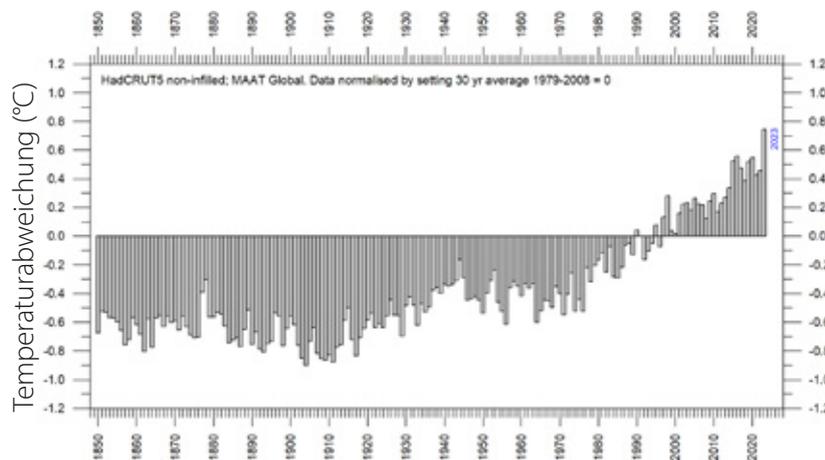


Globale mittlere jährliche Oberflächenlufttemperatur

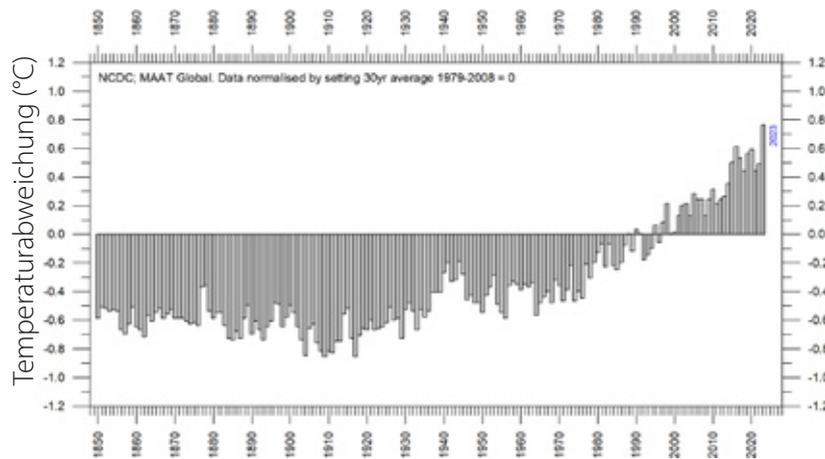
Alle drei Schätzungen der durchschnittlichen Oberflächenlufttemperatur zeigen, dass 2023 das wärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn war. Das Jahr wurde durch einen starken El Niño im Pazifischen Ozean beeinflusst (siehe Abschnitt 5).

Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt)

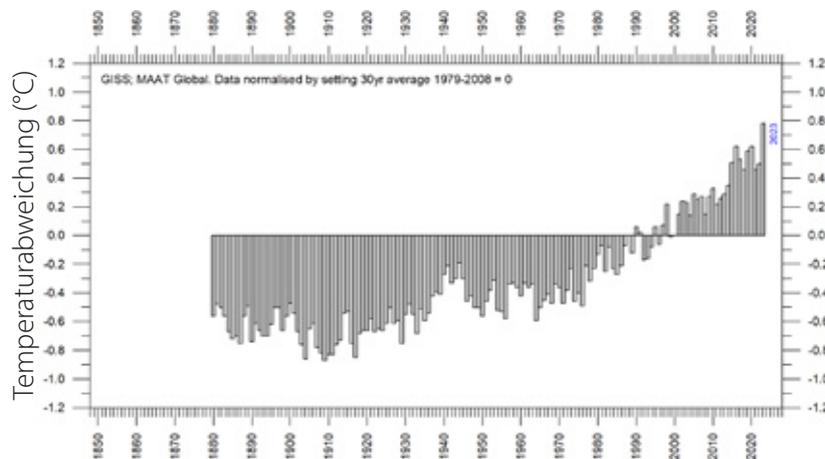
zeigt, dass sowohl die HadCRUT- als auch die NCDC-Aufzeichnungen eine signifikante 74-jährige Oszillation aufweisen, während der entsprechende Zeitraum in der GISS-Aufzeichnung 64 Jahre lang ist.



(a) HadCRUT



(b) NCDC



(c) GISS

Abbildung 8: Globale mittlere jährliche Oberflächenlufttemperaturen.

(a) HadCRUT (b) NCDC (c) GISS Temperaturanomalie (°C) gegenüber 1979–2008.

Überlegungen zur Fehlerspanne, Konstanz und Qualität von Temperaturaufzeichnungen

Die Aufzeichnungen der Oberflächentemperaturen sind eine Mischung aus Daten der Meeresoberfläche, die von Schiffen oder auf andere Weise gesammelt wurden, und Daten von Landstationen, deren Qualität und Repräsentativität für die jeweilige Region teilweise unbekannt ist. Viele der Landstationen wurden während ihrer Betriebszeit geografisch verlegt, die Instrumente wurden ausgetauscht, und die meisten wurden durch ständige Veränderungen in ihrer Umgebung (Vegetation, Gebäude usw.) beeinflusst.

Die Aufzeichnungen der Satellitentemperaturen haben ihre eigenen Probleme, die jedoch im Allgemeinen eher technischer Natur sind und daher wahrscheinlich leichter zu beheben sind. Außerdem werden die Temperaturen von den Satelliten weltweit regelmäßiger und vollständiger erfasst als bei den Oberflächenaufzeichnungen. Wichtig ist auch, dass die Sensoren der Satelliten die Temperatur direkt über die emittierte Strahlung messen, während die meisten modernen Messungen der Oberflächentemperatur indirekt über einen elektronischen Widerstand erfolgen.

Alle Temperaturaufzeichnungen sind mit mindestens drei verschiedenen Fehlerquellen behaftet, die sich zwischen den einzelnen Stationsaufzeichnungen unterscheiden, welche für die Berechnung einer globalen Durchschnittstemperaturschätzung verwendet werden. 1) Die Genauigkeit ist der Grad der Annäherung der Messungen an die tatsächlichen (wahren) Werte. 2) Die Präzision ist der Grad, in dem wiederholte Messungen unter unveränderten Bedingungen einen identischen Wert ergeben, ob er nun stimmt oder nicht. Hinzu kommt 3) die Messauflösung, d. h. die kleinste Temperaturänderung, die eine Reaktion des Messgeräts hervorruft. Diese drei Größen zusammen bilden die Fehlermarge für Temperaturaufzeichnungen. Die Fehlerspanne ist im Laufe der Zeit intensiv diskutiert worden und beträgt wahrscheinlich mindestens $\pm 0,1$ °C für die heutigen durchschnittlichen globalen Oberflächentemperaturen und ist bei älteren Daten möglicherweise höher. Dies macht es oft statistisch unmöglich, ein Jahr als globalen Temperaturrekord zu klassifizieren: mehrere andere

Jahre können innerhalb des Bereichs von $\pm 0,1$ °C des betrachteten Wertes liegen.

Darüber hinaus wurden zwei weitere Fragen im Zusammenhang mit der Fehlermarge für Oberflächenaufzeichnungen nicht ausführlich erörtert. Erstens wird es beispielsweise nicht möglich sein, viel über den tatsächlichen Wert der globalen Oberflächenlufttemperatur im Dezember 2023 zu sagen, bevor im März-April 2024 die noch nicht gemeldeten Daten (im Januar 2024) endgültig in die Datenbanken für die Oberflächenlufttemperatur aufgenommen werden. Dies könnte man als den Effekt der verspäteten Berichterstattung bezeichnen. Zweitens weisen die Aufzeichnungen der Oberflächenlufttemperatur im Laufe der Zeit häufig administrative Änderungen auf, was es noch schwieriger macht, Schlussfolgerungen über die Bedeutung der kürzlich gemeldeten Werte zu ziehen.

Das administrative Problem ergibt sich aus den scheinbar ständigen Anpassungen der Temperaturaufzeichnungen. Dies bedeutet, dass sich der Wert, der als globale Durchschnittstemperatur für einen bestimmten Zeitpunkt angegeben wird, in den Jahren nach der ersten Meldung allmählich ändert. Diese Anpassungen scheinen wenig oder nichts mit der verspäteten Meldung fehlender Daten zu tun zu haben. Besonders besorgniserregend sind die GISS- und NCDC-Datenbanken, bei denen Änderungen für weit zurückliegende Zeiträume vorgenommen wurden, sogar für die Zeit vor 1900, bei denen die Möglichkeit von Verzögerungen in der Berichterstattung äußerst gering ist. Höchstwahrscheinlich sind solche administrativen Änderungen das Ergebnis von Änderungen in der Art und Weise, wie monatliche Durchschnittswerte berechnet werden, im Bestreben, die resultierende Aufzeichnung zu verbessern.

Als Beispiel zeigt Abbildung 9 die kumulierten Auswirkungen solcher administrativen Änderungen seit Mai 2008 in der GISS-Aufzeichnung der globalen Oberflächenlufttemperatur, die bis 1880 zurückreicht. Dies ist nur ein Beispiel aus diesem speziellen Datensatz, um die Auswirkungen zu veranschaulichen; jeder andere

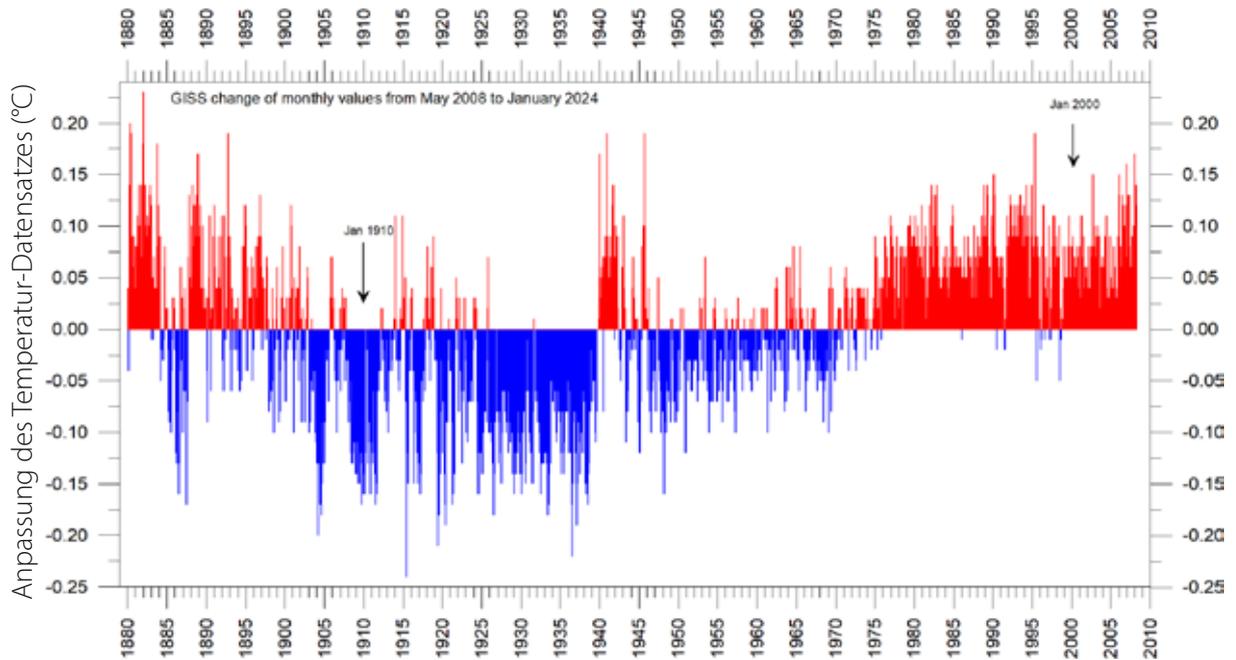


Abbildung 9: Anpassungen seit dem 17. Mai 2008 in der GISS-Oberflächentemp-
peraturaufzeichnung.

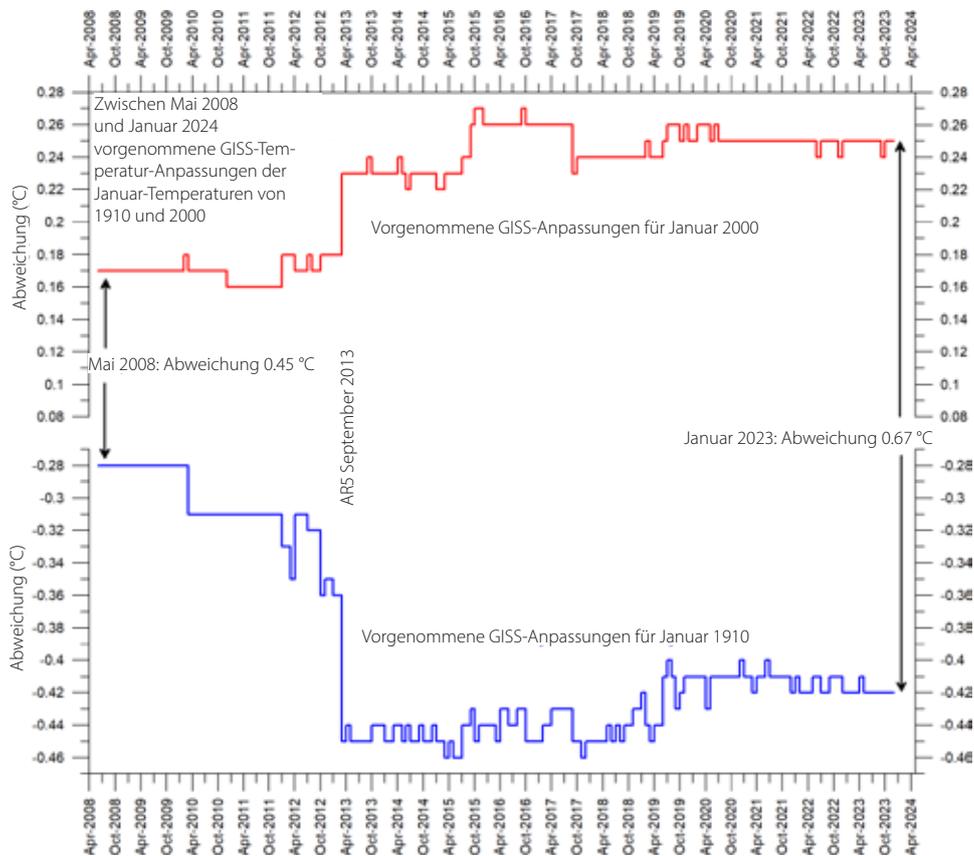


Abbildung 10: Seit Mai 2008 vorgenommene Anpassungen der GISS-Abweichungen für die beiden Monate Januar 1910 und Januar 2000.

Datensatz würde etwas Ähnliches zeigen. Der Gesamteffekt der Anpassungen, die seit Mai 2008 am GISS-Datensatz vorgenommen wurden, ist eine Erwärmung des frühen und des modernen Teils des Datensatzes und eine Abkühlung des dazwischen liegenden Zeitraums, etwa von 1900 bis 1970. Einige der seit 2008 vorgenommenen Nettoänderungen sind recht beträchtlich und reichen von etwa +0,20 bis -0,20 °C.

Um die Auswirkung administrativer Änderungen auf eine andere Art und Weise zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 10, wie sich die globale Oberflächenlufttemperatur für Januar 1910 und Januar 2000 (zwei ausgewählte Monate aus Abb. 15) seit Mai 2008 verändert hat, wiederum anhand der GISS-Aufzeichnungen.

Die administrative Erhöhung der globalen Oberflächenlufttemperatur (GISS) von Januar 1915 bis Januar 2000 ist von 0,45 °C (wie im Mai 2008 gemeldet) auf 0,67 °C (wie im Januar 2024 gemeldet) gestiegen. Dies entspricht einem Anstieg von etwa 49 %, was bedeutet, dass etwa die Hälfte des offensichtlichen globalen Temperaturanstiegs von Januar 1910 bis Januar 2000 (wie von GISS im Januar 2024 gemeldet) auf administrative Änderungen der ursprünglichen

Daten zurückzuführen ist. Solche Anpassungen sind natürlich wichtig, wenn es darum geht, die Gesamtqualität der verschiedenen Temperaturaufzeichnungen zu bewerten, ebenso wie andere Standardfehlerquellen.

Tatsächlich kann das Ausmaß der administrativen Änderungen oft die formale Fehlermarge übersteigen. Da sich die Vergangenheit nicht ändert, kann aus offensichtlichen Gründen eine Aufzeichnung, die ständigen Veränderungen unterliegt, die Vergangenheit nicht immer korrekt beschreiben. Häufige und umfangreiche Korrekturen in einer Datenbank deuten unweigerlich auf eine grundlegende Unsicherheit bezüglich der korrekten Werte hin.

Dennoch sollte jeder, der sich für die Klimawissenschaft interessiert, die Anstrengungen anerkennen, die für die Pflege der verschiedenen Temperaturdatenbanken, auf die in diesem Bericht Bezug genommen wird, unternommen werden. Gleichzeitig ist es aber auch wichtig zu erkennen, dass nicht alle Temperaturaufzeichnungen von gleicher wissenschaftlicher Qualität sein können. Die einfache Tatsache, dass sie alle bis zu einem gewissen Grad abweichen, zeigt, dass sie nicht alle völlig korrekt sein können.



Vergleich der Temperaturen an der Oberfläche und in der unteren Troposphäre

Im Allgemeinen besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den Aufzeichnungen an der Oberfläche und den Satellitenaufzeichnungen, wie Abbildung 11 zeigt. Vor einer größeren Anpassung der RSS-Satellitenaufzeichnungen im Jahr 2017 gab es jedoch eine signifikante Diskrepanz,

wobei der Durchschnitt der Oberflächenaufzeichnungen in eine wärmere Richtung driftete als der Durchschnitt der Satellitenaufzeichnungen. Dies verdeutlicht erneut die Bedeutung der laufenden administrativen Änderungen der einzelnen Temperatureaufzeichnungen.

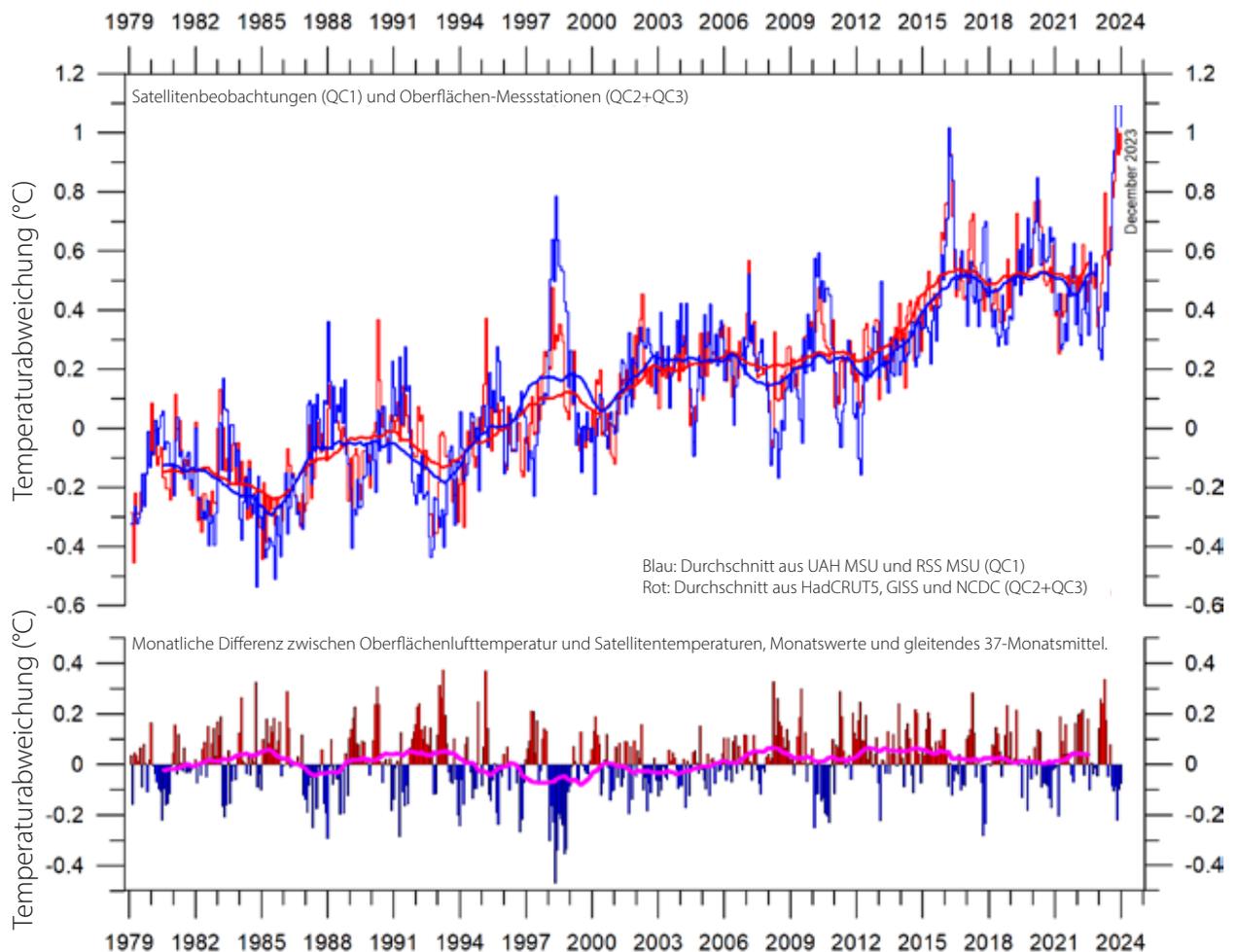


Abbildung 11: Oberflächentemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen der unteren Troposphäre.

Durchschnitt der monatlichen Schätzungen der globalen Oberflächenlufttemperatur (HadCRUT, NCDC und GISS) und der satellitengestützten Temperaturschätzungen der unteren Troposphäre (UAH und RSS). Die dünnen Linien zeigen den monatlichen Wert an, während die dicken Linien das einfache gleitende 37-Monatsmittel darstellen, das fast einem laufenden 3-Jahresmittel entspricht. Die untere Grafik zeigt die monatliche Abweichung zwischen der Lufttemperatur an der Oberfläche und den Satellitentemperaturen. Da der Basiszeitraum für die verschiedenen Temperaturschätzungen unterschiedlich ist, wurden sie alle durch einen Vergleich mit dem 30-Jahres-Mittelwert von Januar 1979 bis Dezember 2008 normalisiert.

Vergleich der Temperaturveränderungen über Land und Ozeanen; Lufttemperatur der unteren Troposphäre

Seit 1979 hat sich die untere Troposphäre über Land viel stärker als über den Ozeanen erwärmt (Abbildung 12). Dafür kann es mehrere Gründe geben, wie Unterschiede in der Wärmekapazität

der Oberflächen und Schwankungen in der einfallenden Sonnenstrahlung, der Wolkenbedeckung und der Landnutzung.

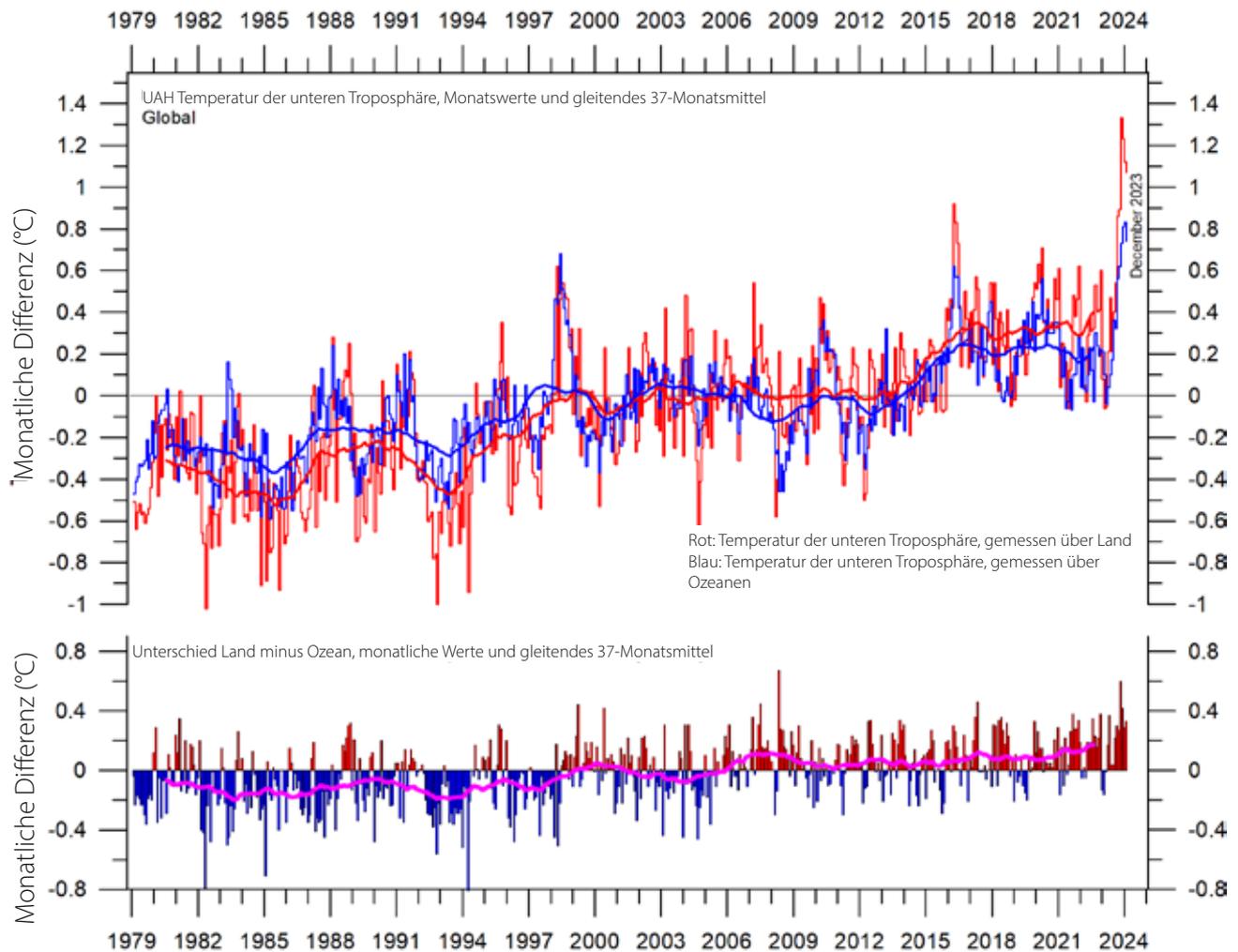


Abbildung 12: Temperaturen der unteren Troposphäre über Land und Ozean

Globale monatliche Durchschnittstemperatur der unteren Troposphäre seit 1979, gemessen über Land und Ozean, dargestellt in rot bzw. blau, nach Angaben der University of Alabama at Huntsville (UAH), USA. Die dünnen Linien stellen den monatlichen Durchschnitt dar, die dicke Linie das einfache gleitende 37-Monatsmittel, das fast einem laufenden 3-Jahresmittel entspricht.

Zonale Lufttemperaturen

Abbildung 13 zeigt, dass die seit 1980 beobachtete «globale» Erwärmung überwiegend ein Phänomen der nördlichen Hemisphäre war. Außerdem hat sie sich hauptsächlich in zwei Schritten vollzogen: 1994–1999 und 2015–2016. Die erste Veränderung wurde jedoch durch den Ausbruch des Mount Pinatubo 1992–93 und die El Niño-Episode 1997 beeinflusst.

Abbildung 13 zeigt auch, dass sich die Temperatureffekte der starken El Niños von 1997 und 2015–16 sowie des jüngsten El Niños von

2023 auf beiden Hemisphären auf höhere Breitengrade ausbreiteten, wenn auch mit einiger Verzögerung. Die Auswirkungen waren jedoch hauptsächlich auf der nördlichen Hemisphäre zu beobachten und nur in geringerem Maße auf der südlichen Hemisphäre. Dies gilt im Allgemeinen für die meisten Temperaturschwankungen in den Tropen, die daher für das Verständnis der meteorologischen und klimatischen Dynamik von großer Bedeutung sind.

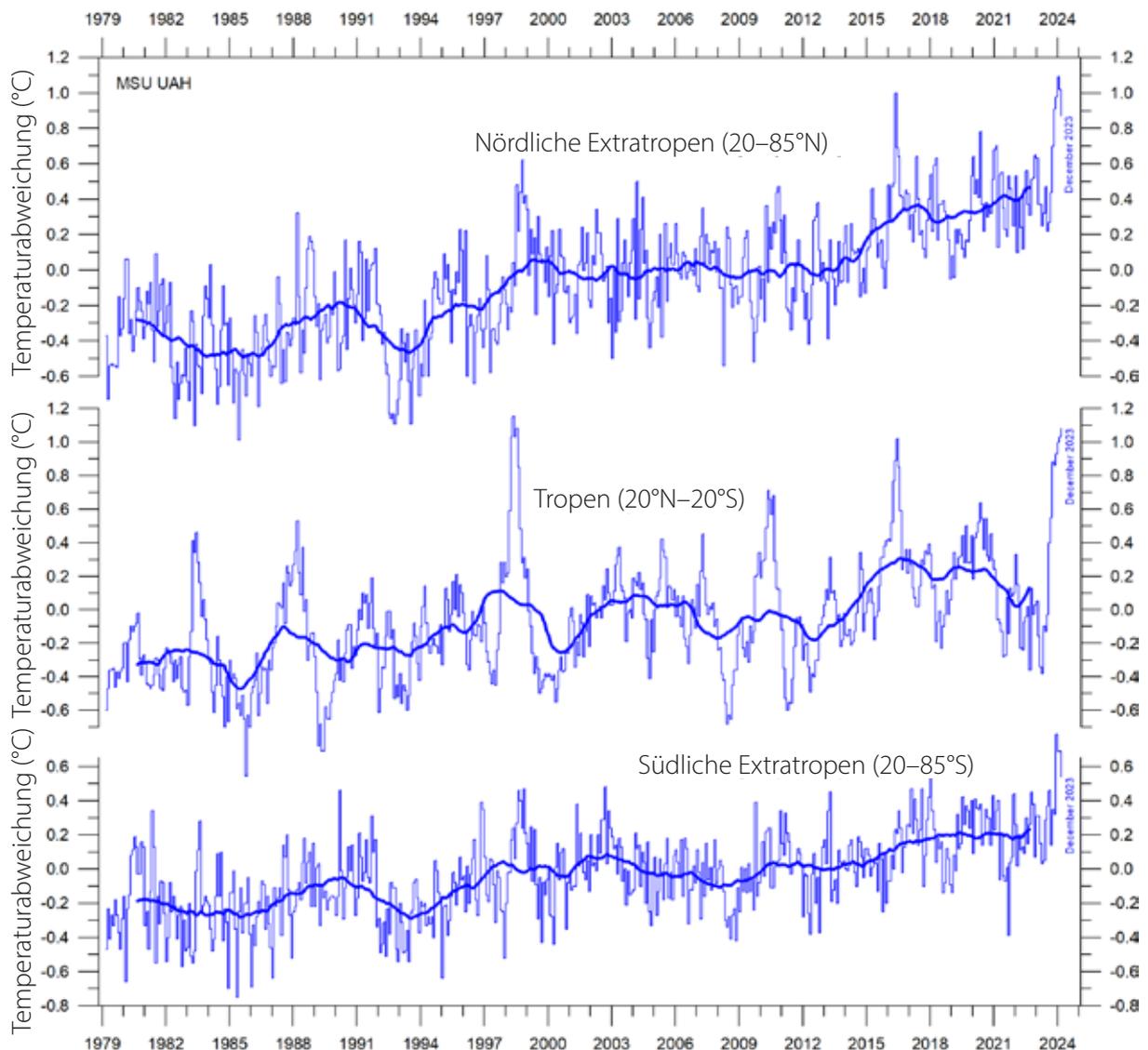


Abbildung 13: Zonale Lufttemperaturen.

Globale monatliche Durchschnittstemperatur der unteren Troposphäre seit 1979 für die Tropen und die nördlichen und südlichen Extratropen, nach Angaben der University of Alabama at Huntsville (UAH), USA. Dünne Linien: Monatswert; dicke Linien: Gleitendes 3-Jahresmittel.

Polare Lufttemperaturen

In der Arktis war die Erwärmung im Zeitraum 1994–96 schnell, danach aber langsamer (Abbildung 14). Im Jahr 2016 erreichten die Temperaturen jedoch für mehrere Monate einen Höchststand, was vermutlich auf die ozeanische Wärme zurückzuführen ist, die während des El Niño 2015–16 an die Atmosphäre abgegeben wurde (Abbildung 25) und anschließend teilweise in höhere Breiten vorgedrungen ist. Nach 2016 gab es einen kleinen Temperaturrückgang, aber 2023 wurde ein neuer Temperaturgipfel verzeichnet, der vermutlich auf den anhaltenden El Niño zurückzuführen ist.

In der Antarktis sind die Temperaturen seit Beginn der Satellitenaufzeichnungen im Jahr 1979 im Wesentlichen stabil geblieben. In den Jahren 2016–17 und 2023 ist in den monatlichen Aufzeichnungen eine kleine Temperaturspitze

zu erkennen, die als gedämpfte Wirkung von El-Niño-Episoden interpretiert werden könnte.

Die Temperaturspitzen in der Arktis und Antarktis, die, wie oben beschrieben, auf El Niño-Episoden beruhen, sind paradoxerweise darauf zurückzuführen, dass Wärme aus dem äquatornahen Pazifik abfließt. Polare Temperaturspitzen führen zu einem erhöhten Strahlungsverlust in den Weltraum und stellen daher in einem breiteren Kontext betrachtet Vorfälle dar, die mit einer Abkühlung der Erde verbunden sind.

Diese Entwicklungen werden durch die lange Reihe der polaren Oberflächentemperaturen bestätigt (Abbildung 15). Auf dieser Stationsebene werden jedoch die für jeden Standort spezifischen Bedingungen deutlich, was die große Variabilität der Temperaturen an beiden Polen zeigt.

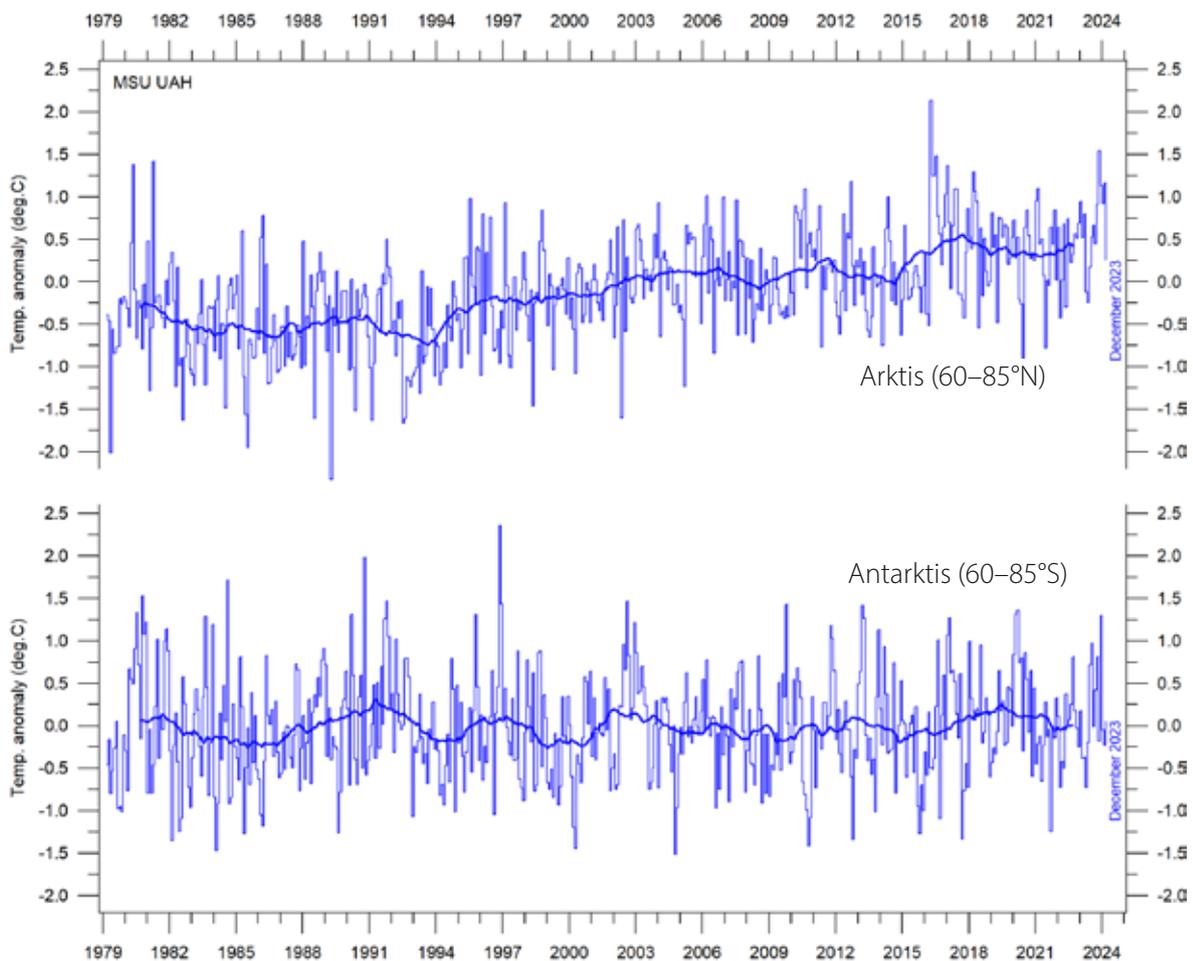


Abbildung 14: Polare Temperaturen

Globale monatliche Durchschnittstemperatur in der unteren Troposphäre seit 1979 für die Nord- und Südpolregionen, nach Angaben der University of Alabama at Huntsville (UAH), USA. Die dicken Linien sind das einfache gleitende 37-Monatsmittel.

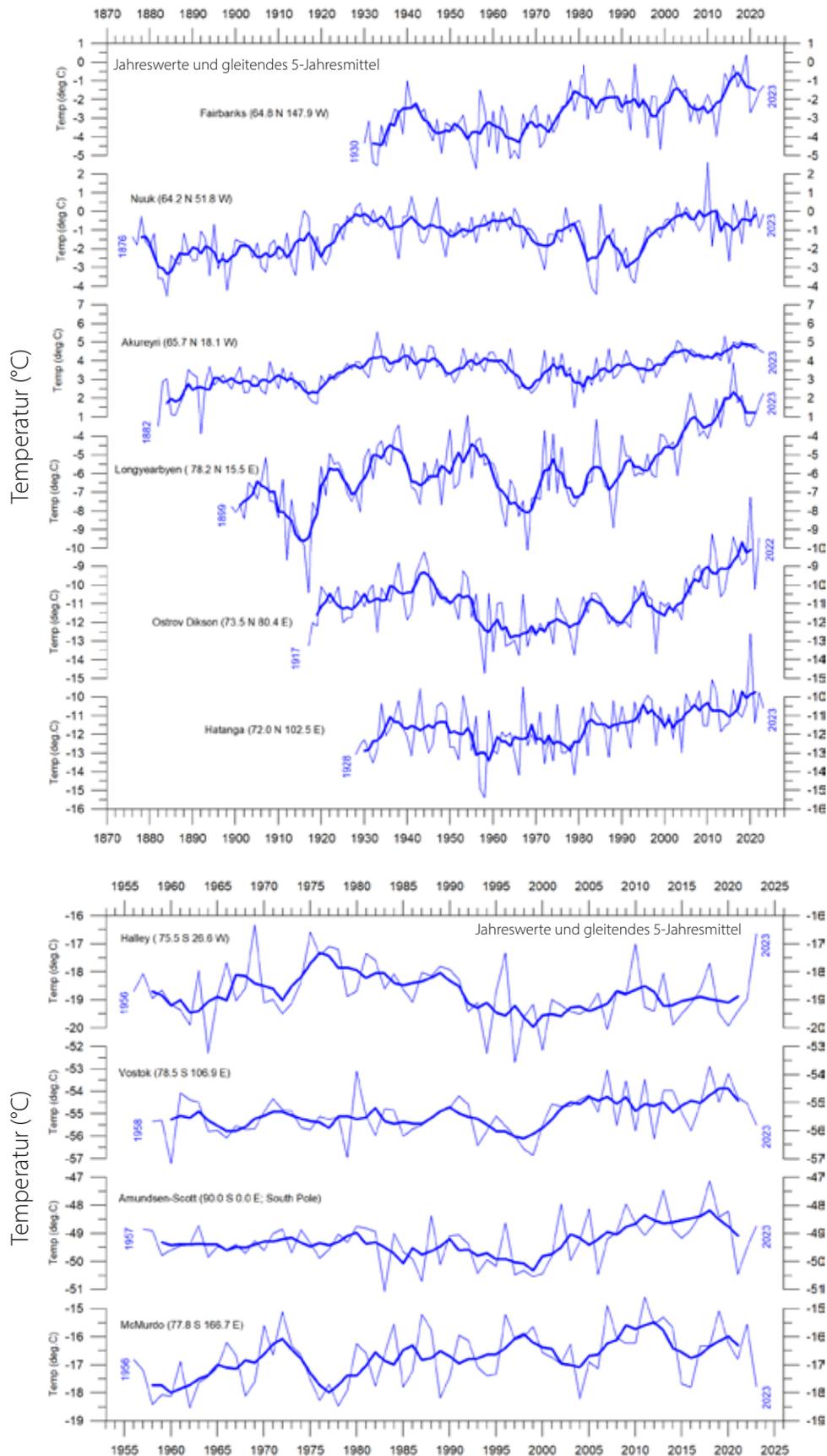


Abbildung 15: Langjährige Zeitreihen der polaren Oberflächenlufttemperatur

Die Jahreswerte wurden aus den monatlichen Durchschnittstemperaturen berechnet. Fast unvermeidlich war, dass in einigen Reihen gewisse Monatsdaten fehlten. In solchen Fällen wurden die fehlenden Werte entweder als 1) Durchschnitt des vorangegangenen und des folgenden Monatswertes oder 2) als Durchschnitt für den Monat, der im vorangegangenen und im folgenden Jahr registriert wurde, gebildet. Die dünne blaue Linie stellt die mittlere jährliche Lufttemperatur dar, und die dicke blaue Linie ist das gleitende 5-Jahresmittel. Datenquelle: Goddard Institute for Space Studies (GISS).

Temperaturen nach Höhe

Interessant sind die Veränderungen im vertikalen Temperaturverlauf der Atmosphäre (Abbildung 16). Ein Grund dafür ist, dass steigende Temperaturen in der Troposphäre und sinkende Temperaturen in der Stratosphäre zwei zentrale Ergebnisse der Hypothese sind, die die globale Erwärmung auf den vom Menschen verursachten Anstieg des

atmosphärischen CO₂ zurückführt.

Die in der untersten Troposphäre aufgezeichneten Temperaturschwankungen spiegeln sich im Allgemeinen in größeren Höhen wider, bis zu einer Höhe von etwa 10 km, einschließlich vieler einzelner Tiefs und Spitzen, wie der durch El Niño verursachte Temperaturanstieg von 2015–16 und

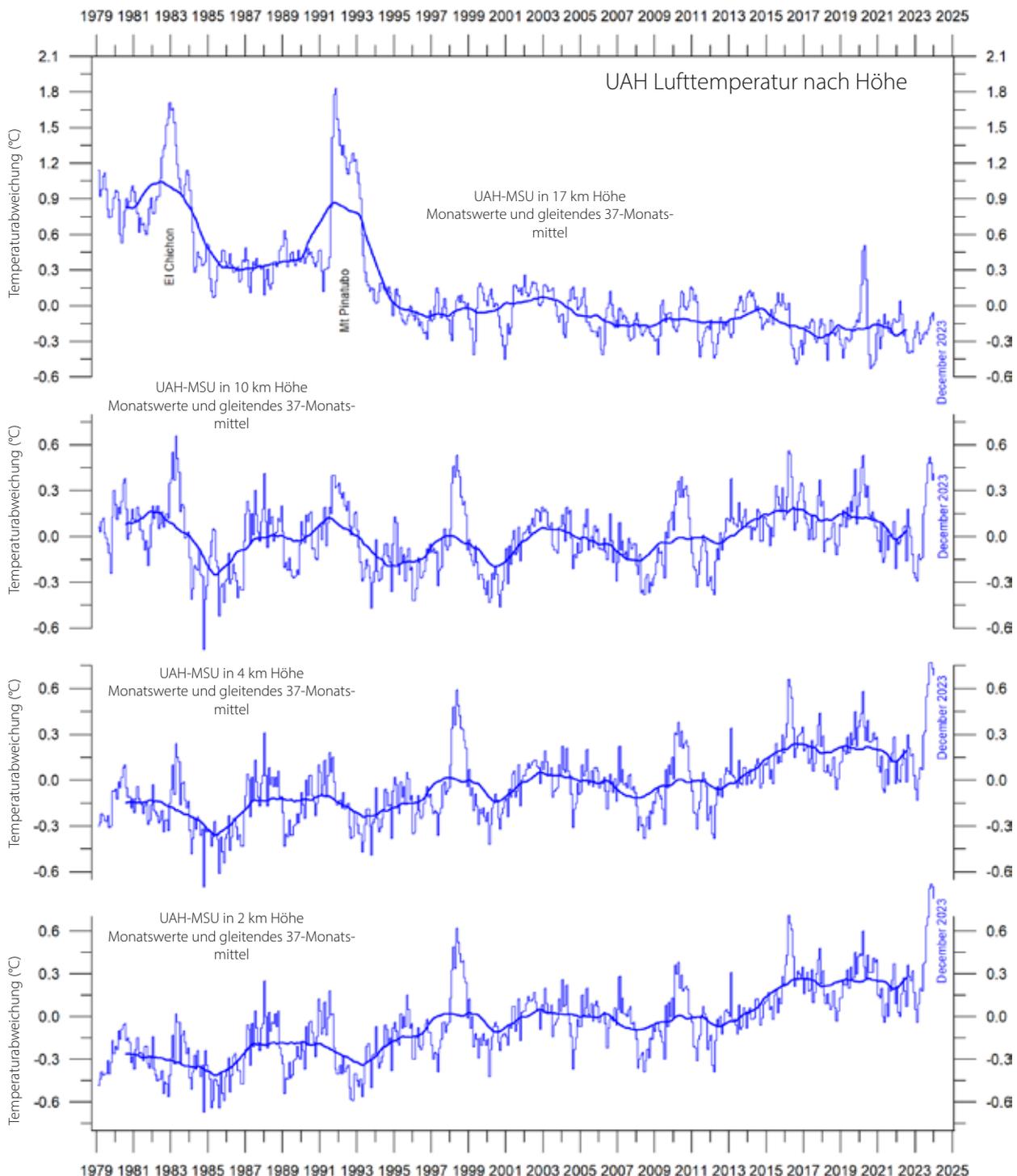


Abbildung 16: Globale monatliche Durchschnittstemperatur in verschiedenen Höhenlagen.

University of Alabama at Huntsville (UAH), USA. Die dünnen Linien stellen den monatlichen Durchschnitt dar, die dicke Linie das einfache gleitende 37-Monatsmittel, das fast einem gleitenden 3-Jahresmittel entspricht.

der neue El Niño ab 2023.

In großen Höhen, in der Nähe der Tropopause, ist das Muster der Schwankungen in der unteren Atmosphäre immer noch zu erkennen, aber während der gesamten Dauer der Aufzeichnung (seit 1979) gibt es keinen klaren Trend zu höheren oder niedrigeren Temperaturen.

Höher in der Atmosphäre, in der Stratosphäre, in 17 km Höhe, sind zwei ausgeprägte Temperaturspitzen vor der Jahrhundertwende zu erkennen. Beide können mit großen Vulkanausbrüchen in Verbindung gebracht werden, wie im Diagramm dargestellt. Die Spitze im Jahr 2020 fällt in eine Zeit, in der sich in Australien grossflächige Buschbrände ereigneten. Sieht man von solchen Ausschlägen ab, so zeigt die Aufzeichnung der Stratosphärentemperatur bis

etwa 1995 einen anhaltenden und deutlichen Rückgang, der von mehreren Wissenschaftlern auf den Effekt der durch CO₂ in der darunter liegenden Troposphäre eingeschlossener Wärme zurückgeführt wird. Der deutliche Temperaturrückgang in der Stratosphäre endet jedoch im Wesentlichen um 1995–96, und seit dieser Zeit ist die Stratosphäre durch ein langes Temperaturplateau gekennzeichnet.

Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die Temperaturen in der Troposphäre in etwa 2 und 4 km Höhe einen signifikanten 3,6-Jahres-Zyklus aufweisen. Die gleiche Periodizität ist auch an der Tropopause (~10 km Höhe) zu beobachten, jedoch nicht in der Stratosphäre in 17 km Höhe.

4. Atmosphärische Treibhausgase

Wasserdampf

Wasserdampf (H₂O) ist das wichtigste Treibhausgas in der Troposphäre. Die höchste Konzentration findet sich in einem Breitenbereich von 50°N bis

60°S. Die beiden Polarregionen der Troposphäre sind vergleichsweise trocken. Wasserdampf ist sowohl aufgrund seines Absorptionsspektrums

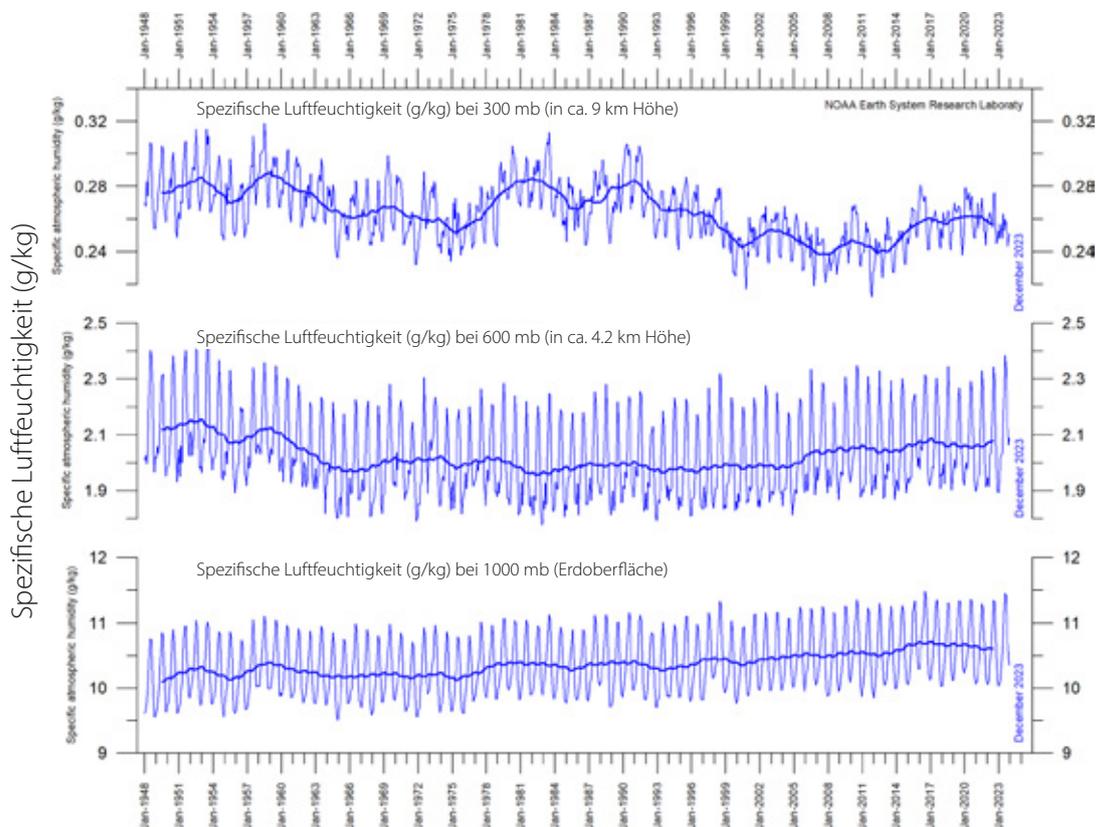


Abbildung 17: Spezifische atmosphärische Feuchtigkeit in der Troposphäre seit 1948

Die dünnen blauen Linien zeigen monatliche Werte, während die dicken blauen Linien das gleitende 37-Monatsmittel (etwa 3 Jahre) darstellen. Datenquelle: Earth System Research Laboratory (NOAA).

als auch aufgrund seiner höheren Konzentration ein viel wichtigeres Treibhausgas als Kohlendioxid.

Abbildung 17 zeigt, dass die spezifische Luftfeuchtigkeit bis zu einer Höhe von etwa 4–5 km stabil ist oder leicht zunimmt. In höheren Lagen der Troposphäre (ca. 9 km) ist die spezifische Luftfeuchtigkeit während der gesamten Dauer der Aufzeichnung rückläufig, allerdings mit kürzeren Schwankungen, die den fallenden Trend überlagern. Eine Fourier-Frequenzanalyse (hier nicht dargestellt) lässt vermuten, dass diese Verände-

rungen nicht nur durch die erheblichen jährlichen Schwankungen, sondern möglicherweise auch durch eine längere Schwankung von etwa 35 Jahren Dauer beeinflusst werden.

Der Gesamtrückgang der spezifischen Luftfeuchtigkeit seit 1948 in etwa 9 km Höhe ist bemerkenswert, da diese Höhe in etwa dem Niveau entspricht (dem so genannten «charakteristischen Emissionsniveau»), in dem die theoretische Temperaturwirkung des erhöhten atmosphärischen CO₂ am ehesten zu erwarten ist.

Kohlendioxid

Kohlendioxid (CO₂) ist ein wichtiges Treibhausgas, aber weniger wichtig als Wasserdampf. Seit 1958 steigt seine atmosphärische Konzentration an, wobei der Trend von einem jährlichen Zyklus überlagert wird. Ende 2023 lag die Konzentration bei fast 422 ppm (parts per million; Abbildung 18). Die jährliche Konzentrationsänderung (Abbildung 19) hat zugenommen, und zwar von etwa

+1 ppm/Jahr zu Beginn der Aufzeichnung auf etwa +2,5 ppm/Jahr zum Ende hin. Eine Fourier-Frequenzanalyse (nicht dargestellt) deutet darauf hin, dass die 12-Monats-Änderung des CO₂ einen signifikanten Zyklus von 3,6 Jahren aufweist. Es gibt keine sichtbaren Auswirkungen der globalen COVID-19-Lockdowns von 2020–22 in der Aufzeichnung. Die steigende CO₂-Konzen-

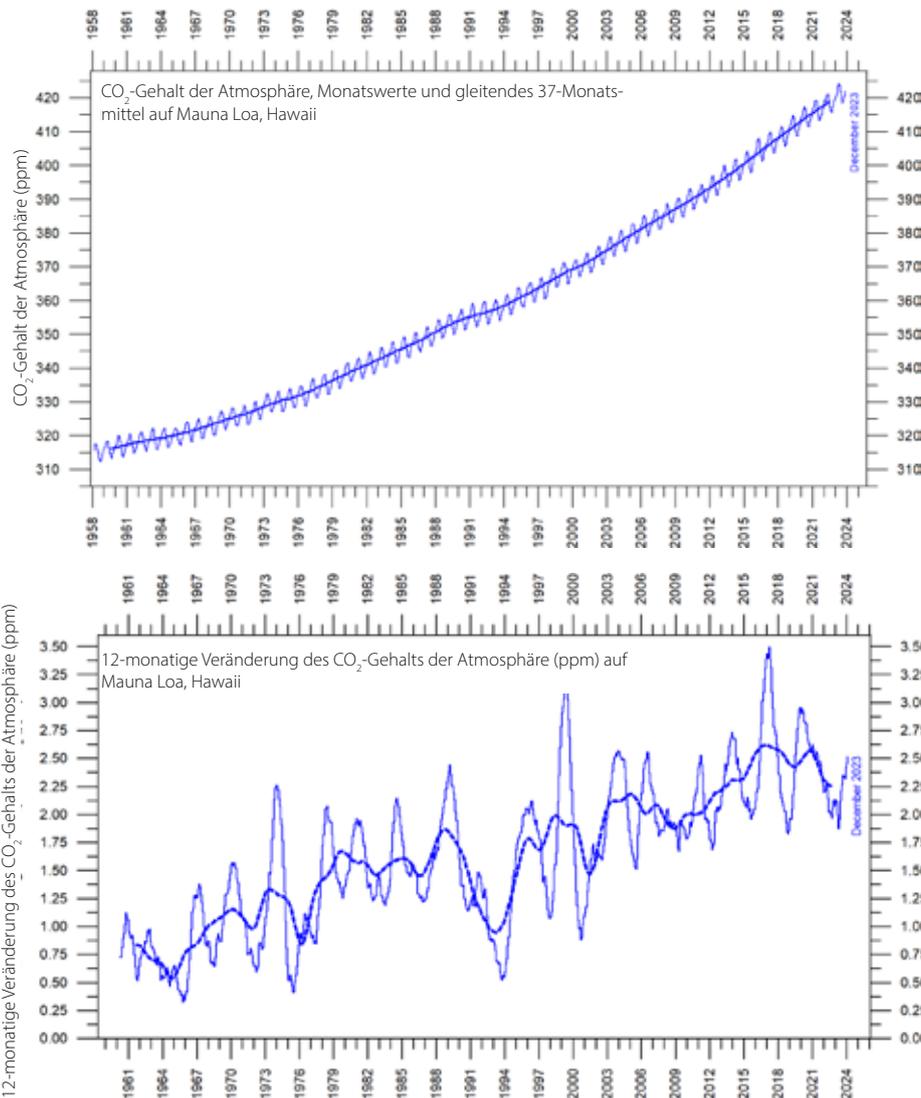


Abbildung 18: Mauna Loa CO₂-Aufzeichnung

Dünne Linien: Monatswerte; dicke Linien: Gleitendes 37-Monatsmittel

Abbildung 19: Jährliche CO₂ Veränderung

Differenz von zwei 12-Monats-Durchschnitten. Dünne Linie: Monatswerte; dicke Linie: Gleitendes 3-Jahresmittel.

tration erhöht die Photosynthese und damit die weltweiten Ernteerträge.

Es ist aufschlussreich, die Variation der jährlichen Änderungsrate des atmosphärischen CO₂ gegenüber den Änderungsraten der Luft- und Meeresoberflächentemperatur zu betrachten (Abbildung 20). Alle drei Raten schwanken gemeinsam, aber die Meeresoberflächentem-

peraturen sind den Lufttemperaturen um einige Monate und den Änderungen der CO₂-Konzentration um 11–12 Monate voraus (Humlum et al. 2012). Die Meeresoberfläche ist offensichtlich der Ausgangspunkt für viele wichtige klimabezogene Veränderungen.

Abbildung 21 zeigt den visuellen Zusammenhang zwischen der jährlichen Veränderung

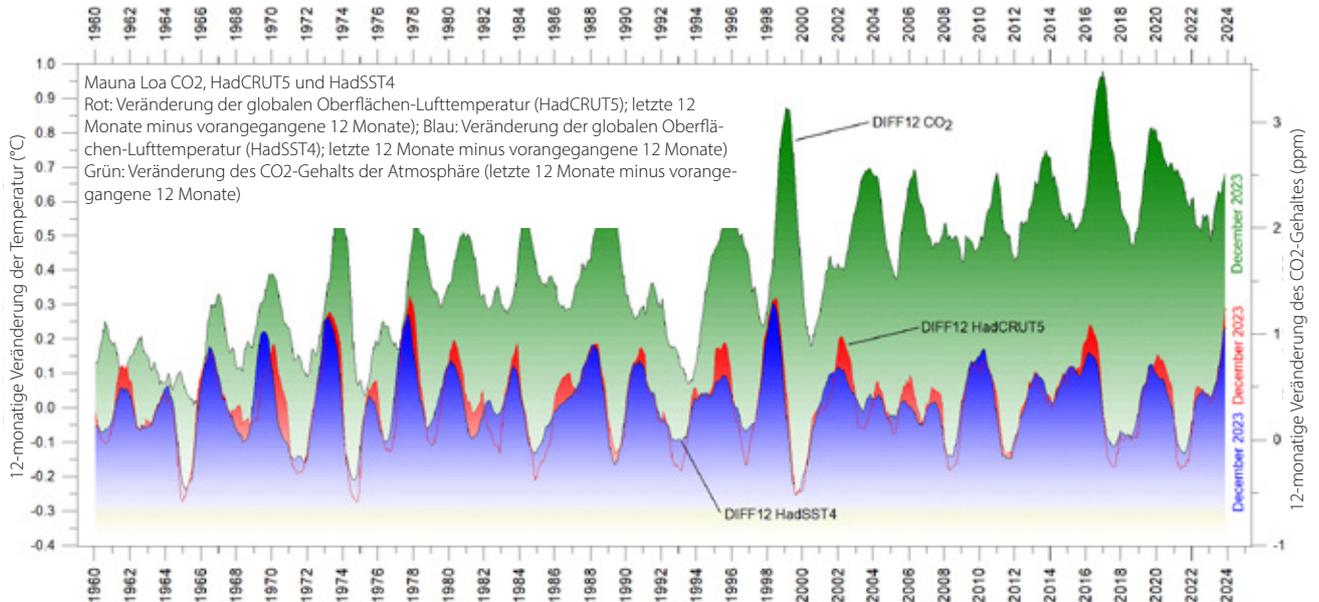


Abbildung 20: Korrelation von Kohlendioxidkonzentrationen und Temperaturaufzeichnungen.

Jährliche (12-monatige) Veränderung der globalen atmosphärischen CO₂-Konzentration (Mauna Loa; grün), der globalen Meeresoberflächentemperatur (HadSST4; blau) und der globalen Oberflächenlufttemperatur (HadCRUT5; rot). Alle Diagramme zeigen die monatlichen Werte von DIFF12, der Differenz zwischen dem Durchschnitt der letzten 12 Monate und dem Durchschnitt der vorangegangenen 12 Monate für jede Datenreihe.

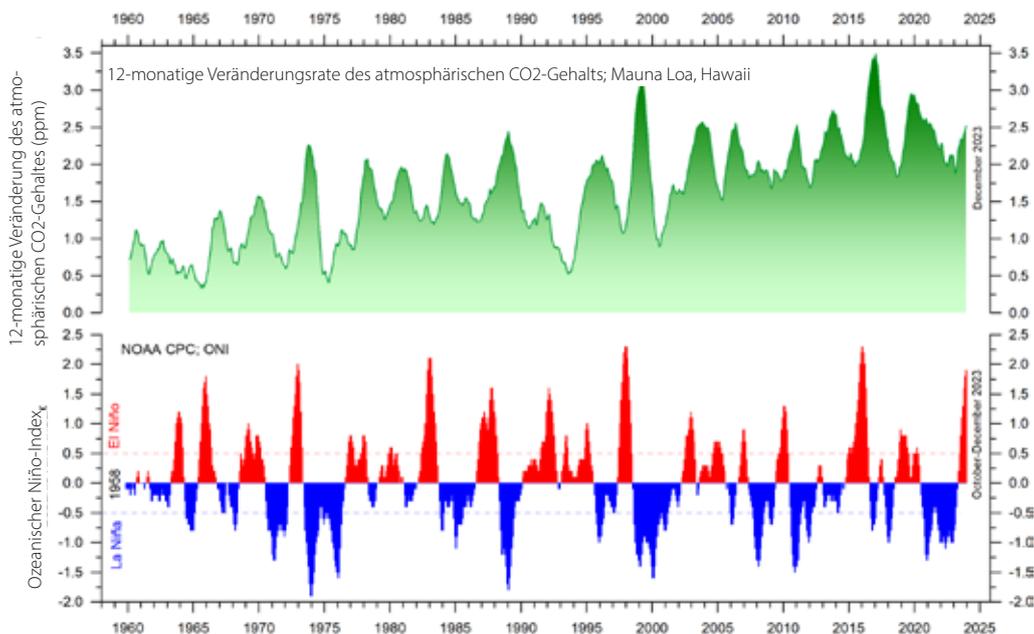


Abbildung 21: CO₂-Wachstum und El Niño- und La Niña-Episoden.

Visueller Zusammenhang zwischen der jährlichen Wachstumsrate des atmosphärischen CO₂ (obere Grafik) und dem Ozeanischen Niño Index (untere Grafik)

des atmosphärischen CO₂ und den La Niña- und El Niño-Episoden, was die Bedeutung der ozeanografischen Dynamik für das Verständnis der

Veränderungen des atmosphärischen CO₂ unterstreicht.



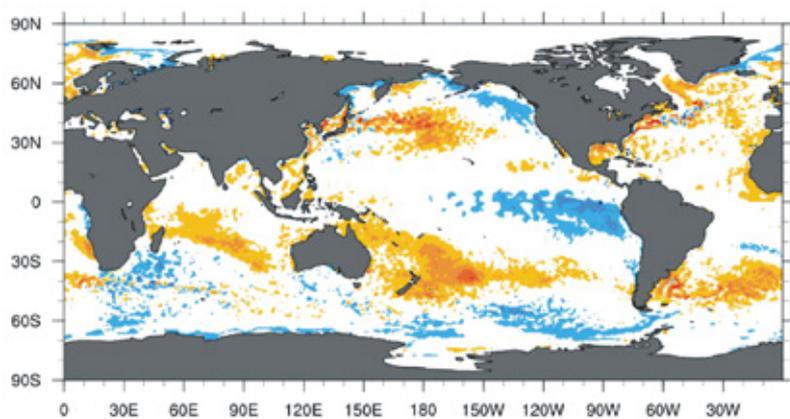
5. Ozean-Temperaturen

Jüngste Anomalien der Meeresoberflächentemperatur

Im Pazifischen Ozean wehen die Passatwinde in der Regel westlich entlang des Äquators und treiben warmes Wasser aus Südamerika nach Asien. Um dieses warme Wasser zu ersetzen, steigt kaltes Wasser aus den Tiefen nahe Südamerika auf. Während El Niño-Episoden sind die Passatwinde schwächer als sonst, und das warme Wasser breitet sich wieder nach Osten aus, in Richtung Südamerika. Im Gegensatz dazu sind die Passatwinde während einer La Niña-Periode

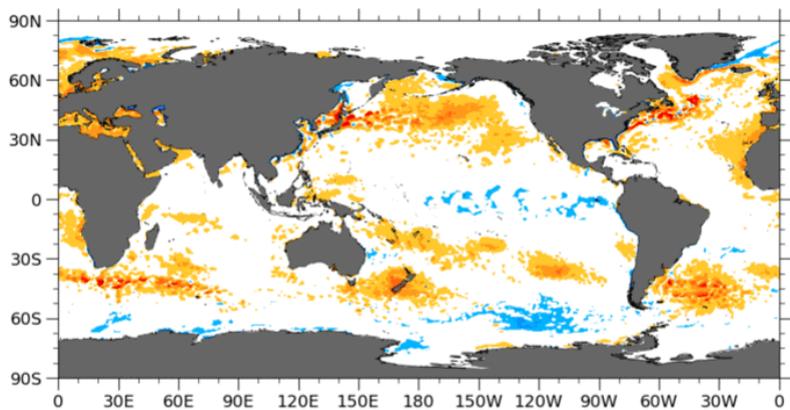
stärker als gewöhnlich und treiben mehr warmes Wasser als üblich in Richtung Asien, so dass der Auftrieb von kaltem Wasser in der Nähe von Südamerika zunimmt.

Die drei Karten in Abbildung 22 zeigen die mäßige La Niña-Periode, die einen Großteil der Jahre 2021 und 2022 prägte, und die anhaltende starke El Niño-Periode Ende 2023. Siehe auch die damit verbundenen Änderungen der globalen Ozeantemperatur in den Abbildungen 23 und

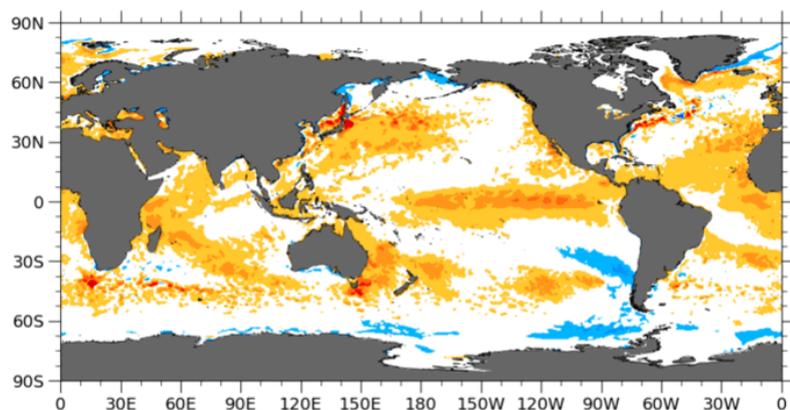


2021 **Abbildung 22: Anomalien der Meeresoberflächentemperatur.**

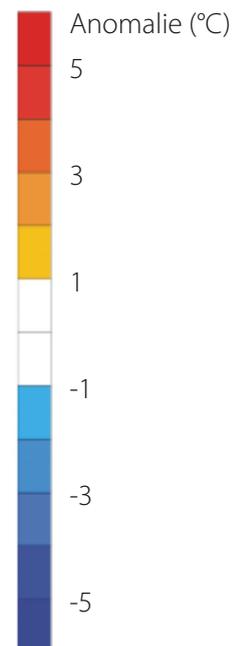
Anomalien der Meeresoberflächentemperatur im Dezember 2021, 2022 und 2023 (°C). Referenzperiode: 1977–1991. Dunkelgrau stellt Landgebiete dar. Quelle der Karte: Plymouth State Weather Center.



2022



2023



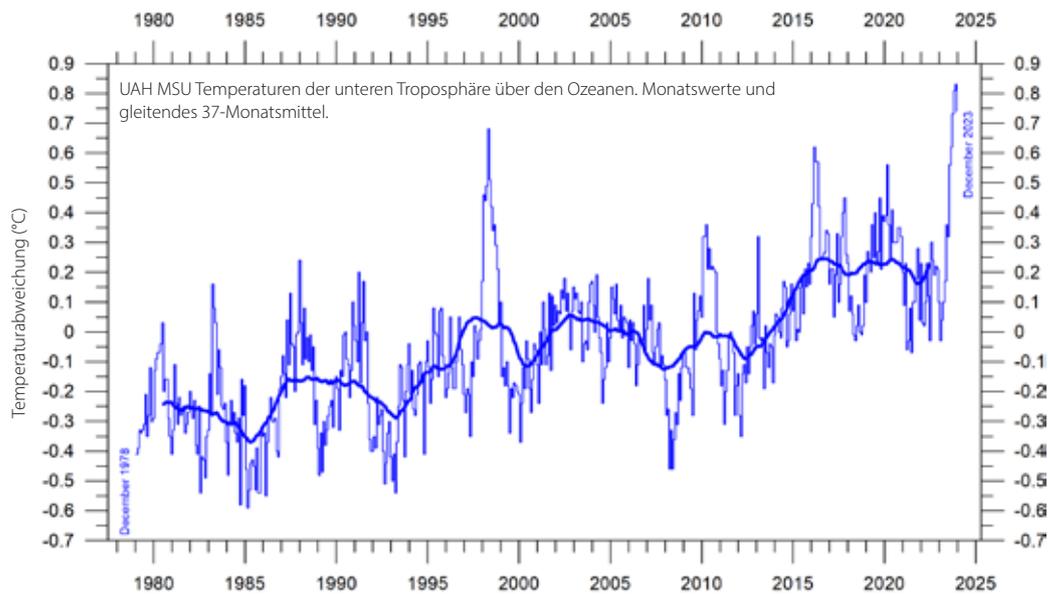


Abbildung 23: Temperaturen der unteren Troposphäre über den Ozeanen

Globaler monatlicher Durchschnitt seit 1979, der die Bedingungen in etwa 2 km Höhe wiedergibt. Satellitendaten, interpretiert von der University of Alabama at Huntsville (UAH), USA. Basiszeitraum 1981–2010. Die dicke Linie ist das einfache gleitende 37-Monatsmittel, das fast einem gleitenden 3-Jahresmittel entspricht.

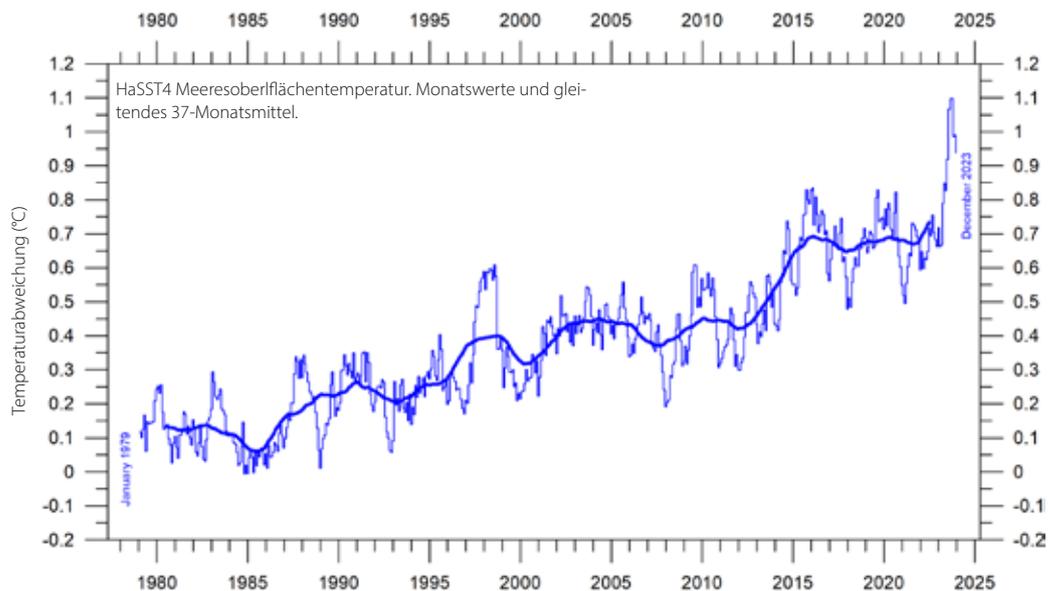


Abbildung 24: Anomalien der Meeresoberflächentemperatur

Globaler monatlicher Durchschnitt seit 1979, nach Angaben der University of East Anglia's Climatic Research Unit (CRU), UK. Basiszeitraum: 1961–1990. Die dicke Linie ist das einfache gleitende 37-Monatsmittel, das fast einem gleitenden 3-Jahresmittel entspricht.

24 sowie Abbildung 25, in der alle El Niño- und La Niña-Episoden seit 1950 dargestellt sind.

Die El Niños von 2015–16 und der laufende von 2023 gehören zu den stärksten seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1950 und korrespondieren mit den jüngsten globalen Lufttemperaturspitzen von 2016 und 2023 (Abbildungen 5 und 8). Betrachtet man jedoch die gesamte Aufzeichnung (Abbildung 25), so scheinen die jüngsten Schwankungen

zwischen El Niño- und La Niña-Episoden recht normal zu sein.

Eine Fourier-Frequenzanalyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die Aufzeichnung von El Niño- und La Niña-Episoden seit 1950 von einem bedeutenden 3,6-Jahres-Zyklus und möglicherweise auch von einem längeren Zyklus von 5,6 Jahren Dauer beeinflusst wird.

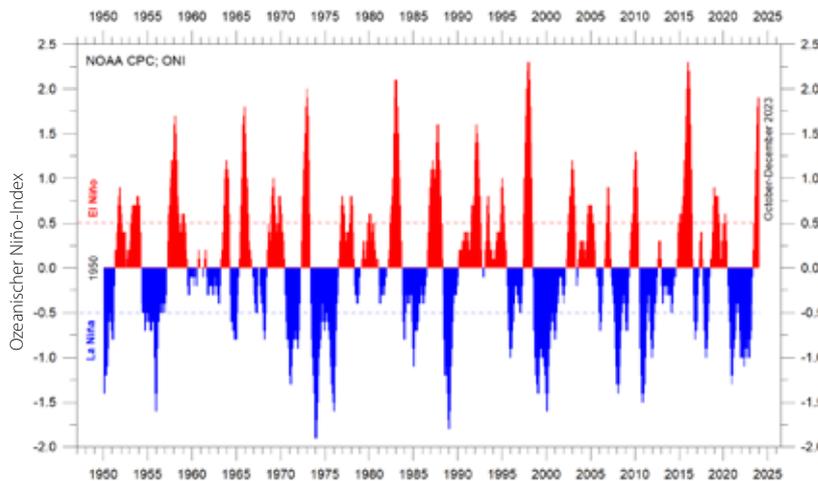


Abbildung 25: Der El Niño-Index

Warme und kalte Episoden für den Ozeanischen Niño-Index (ONI), definiert als 3-monatiges gleitendes Mittel der ERSST.v5 SST-Anomalien in der Niño 3.4 Region (5°N-5°S, 120°-170°W). Die Anomalien sind auf 30-jährige Basisperioden zentriert, die alle 5 Jahre aktualisiert werden.



Durchschnittliche globale Meerestemperaturen in 1'900 m Tiefe

Abbildung 26 basiert auf Beobachtungen von Argo-Floats (Roemmich und Gilson 2009) und zeigt, dass die Temperatur der Weltmeere im Durchschnitt bis in 1'900 m Tiefe seit etwa 2010 ansteigt. Es ist auch zu erkennen, dass dieser Anstieg seit 2013 hauptsächlich durch Veränderungen in der Nähe des Äquators, zwischen 30°N und 30°S, verursacht wird. In den zirkumarktischen Ozeanen, nördlich von 55°N, sind die tiefenintegrierten Ozeantemperaturen dagegen seit 2011 rückläufig. In der Nähe der Antarktis, südlich von

55°S, sind die Temperaturen weitgehend stabil geblieben. In den meisten Breitengraden ist ein klarer Jahresrhythmus zu erkennen.

Ab etwa 2020 deuten die verfügbaren Messungen auf den Beginn eines neuen Regimes hin, mit sinkenden Temperaturen am Äquator und steigenden Temperaturen in der Arktis. Es sind jedoch weitere Messungen erforderlich, bevor endgültige Schlussfolgerungen gezogen werden können.

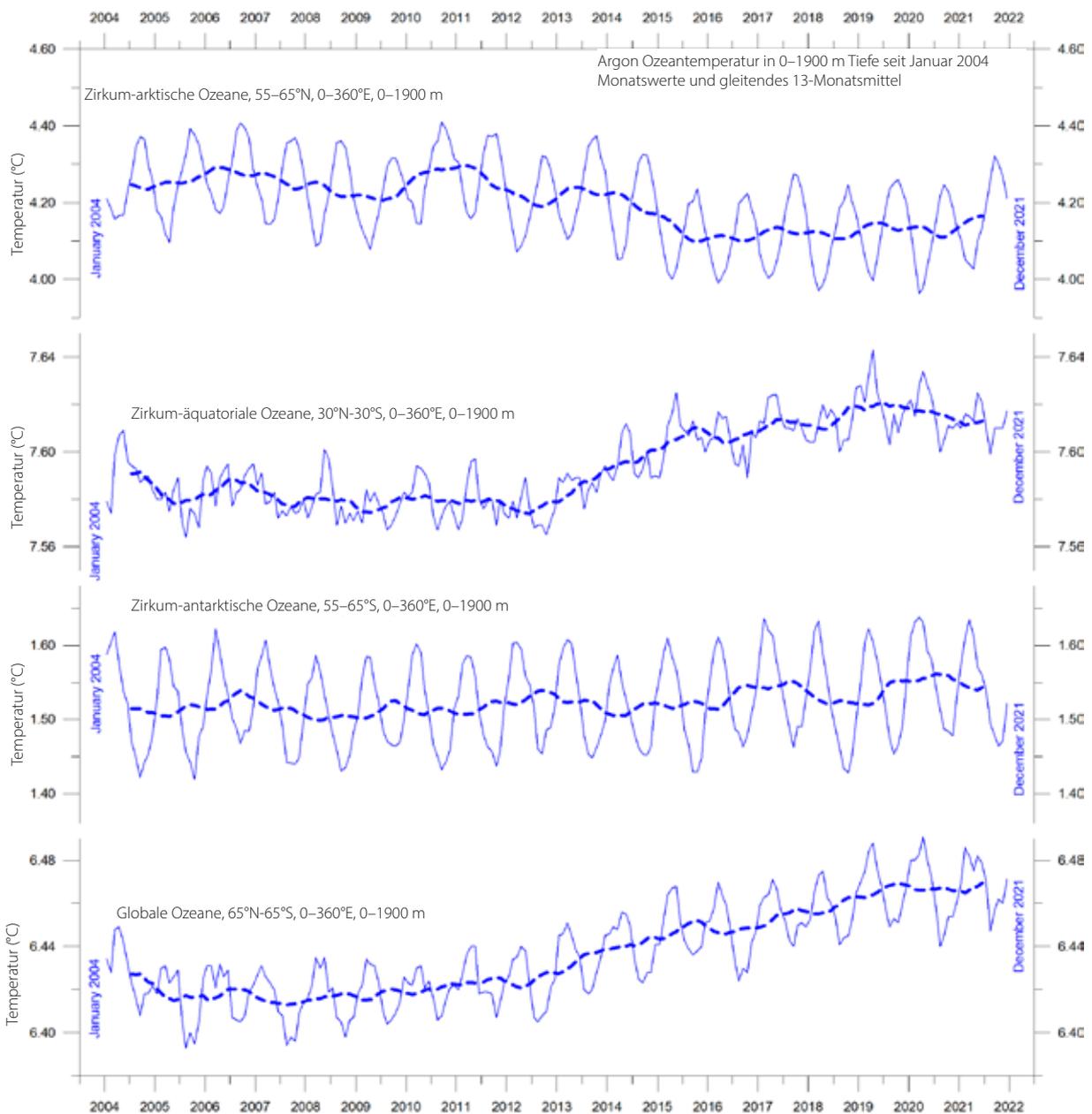


Abbildung 26: Meerestemperaturen bis 1'900 m

Durchschnittliche Ozeantemperaturen Januar 2004-Dezember 2021 in 0–1'900 m Tiefe in ausgewählten Breitengraden, unter Verwendung von Argo-Daten. Die dünne Linie zeigt die monatlichen Werte, die dicke gepunktete Linie zeigt das gleitende 13-Monatsmittel. Quelle: Global Marine Argo Atlas.

Globale Ozeantemperaturen in verschiedenen Wassertiefen

Abbildung 27 zeigt die globalen durchschnittlichen Meerestemperaturen in verschiedenen Tiefen. Bis zu einer Tiefe von etwa 100 m ist ein jährlicher Rhythmus zu erkennen. In den obersten 100 m haben die Temperaturen seit etwa 2011 zugenommen. In 200–400 m haben sich die Temperaturen während des Beobachtungszeitraums kaum verändert.

In Tiefen unter 400 m sind die globalen durchschnittlichen Ozeantemperaturen während des Beobachtungszeitraums jedoch angestiegen. Interessanterweise deuten die Daten darauf hin, dass dieser Anstieg etwa 2009 in 1'900 m Tiefe begann und sich von dort aus allmählich nach oben ausgebreitet hat. In 600 m Tiefe begann der derzeitige Temperaturanstieg um 2012, also etwa

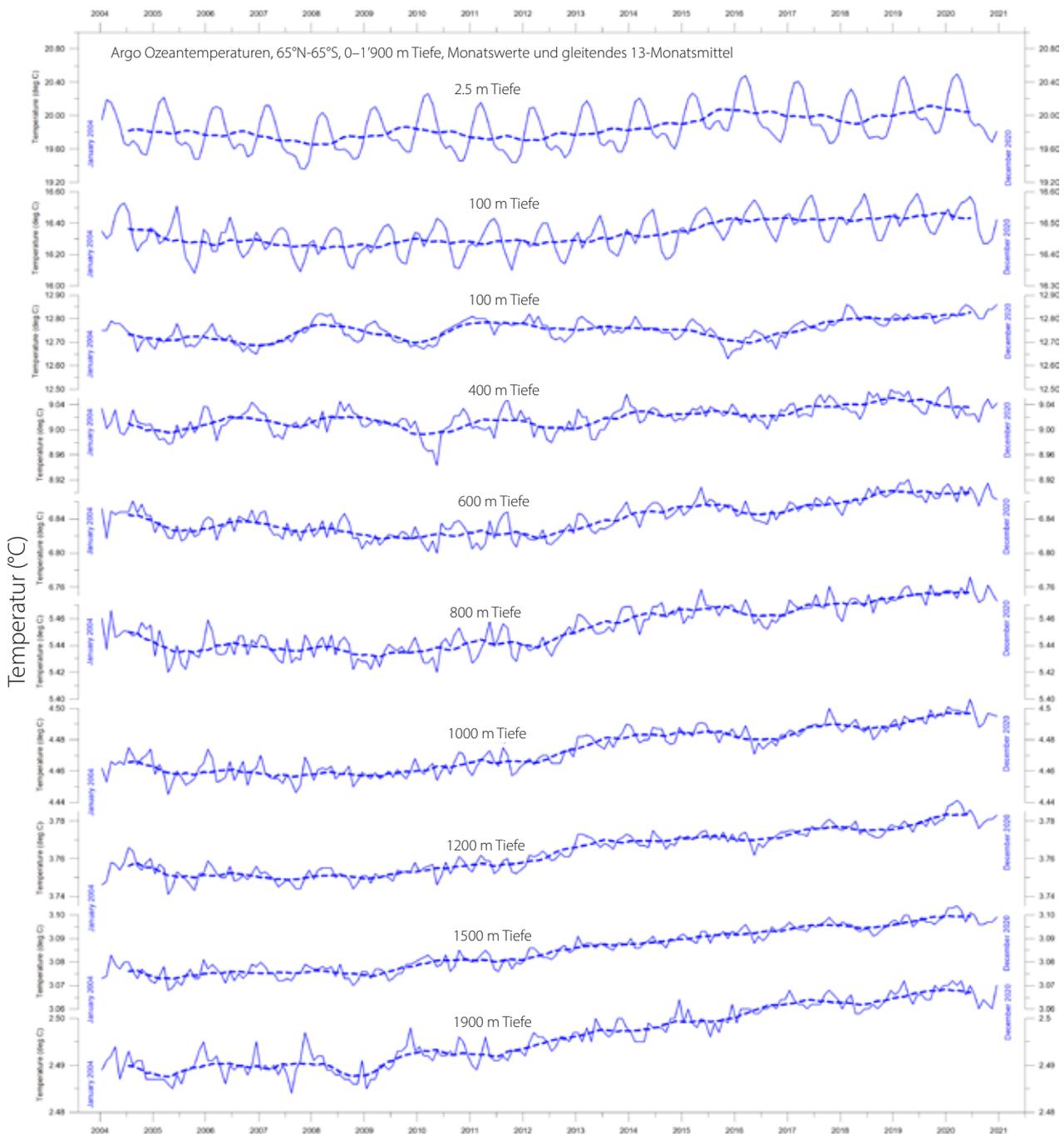


Abbildung 27: Meerestemperaturen in verschiedenen Tiefen

Ozeantemperaturen Januar 2004-Dezember 2021 in verschiedenen Tiefen zwischen 65°N und 65°S, unter Verwendung von Argo-Daten. Die dünne Linie zeigt die monatlichen Werte, die gepunktete Linie das gleitende 13-Monatsmittel. Quelle: Global Marine Argo Atlas.

drei Jahre später als in 1'900 m Tiefe. Der zeitliche Verlauf dieser Veränderungen zeigt, dass die Durchschnittstemperaturen in den oberen 1'900 m der Ozeane nicht nur von den Bedingungen an oder nahe der Meeresoberfläche beeinflusst werden, sondern auch von Prozessen, die in Tiefen unter-

halb von 1'900 m ablaufen; mit anderen Worten, ein Teil der jüngsten Erwärmung resultiert aus Veränderungen der Zirkulation und steht daher nicht in direktem Zusammenhang mit Prozessen, die an oder nahe der Oberfläche ablaufen.

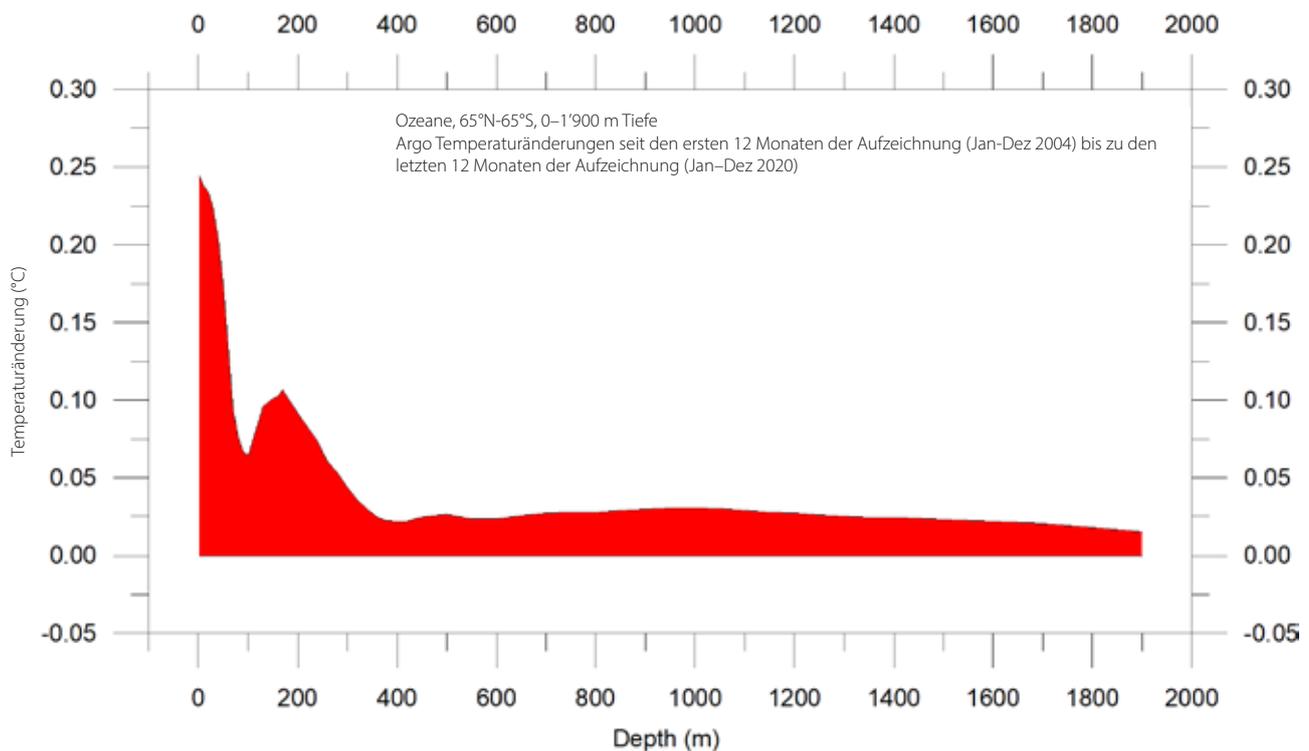


Abbildung 28: Temperaturänderungen 0–1'900 m

Nettoveränderung der globalen Ozeantemperatur seit 2004 von der Oberfläche bis in 1'900 m Tiefe, unter Verwendung von Argo-Daten. Quelle: Global Marine Argo Atlas.

Regionale Änderungen der Ozeantemperatur in 0–1'900 m Tiefe

Abbildung 29 zeigt die Nettoveränderung der ozeanischen Temperatur zwischen denselben zwei 12-Monats-Zeiträumen wie im letzten Abschnitt, für verschiedene Tiefen und für drei verschiedene Breitengrade, die die arktischen Ozeane (55–65°N), die äquatorialen Ozeane (30°N-30°S) und die antarktischen Ozeane (55–65°S) repräsentieren. Die globale Netto-Oberflächenerwärmung wirkt sich auf die äquatorialen und die antarktischen, nicht aber auf die arktischen Ozeane aus, wo die Nettoabkühlung bis zu einer Tiefe von 1'400 m Tiefe ausgeprägt ist. Ein Großteil der Landfläche der Erde liegt jedoch auf der Nordhalbkugel, so dass die Oberfläche (und das Volumen) der arktischen Ozeane viel kleiner ist als die der antarktischen

Ozeane, die wiederum kleiner sind als die der äquatorialen Ozeane. Tatsächlich befindet sich die Hälfte der Erdoberfläche (Land und Ozean) zwischen 30°N und 30°S.

Dennoch ist der Kontrast zwischen den Netto-Temperaturveränderungen in den verschiedenen Breitengraden aufschlussreich. Für die beiden polaren Ozeane scheinen die Argo-Daten auf die Existenz einer bipolaren Wippe hinzudeuten, wie sie von Chylek et al. (2010) beschrieben wurde. Nicht weniger interessant ist, dass die oberflächennahe Ozeantemperatur in den beiden polaren Ozeanen mit der Gesamtentwicklung des Meereseises in den beiden Polarregionen kontrastiert (siehe Abschnitt 8).

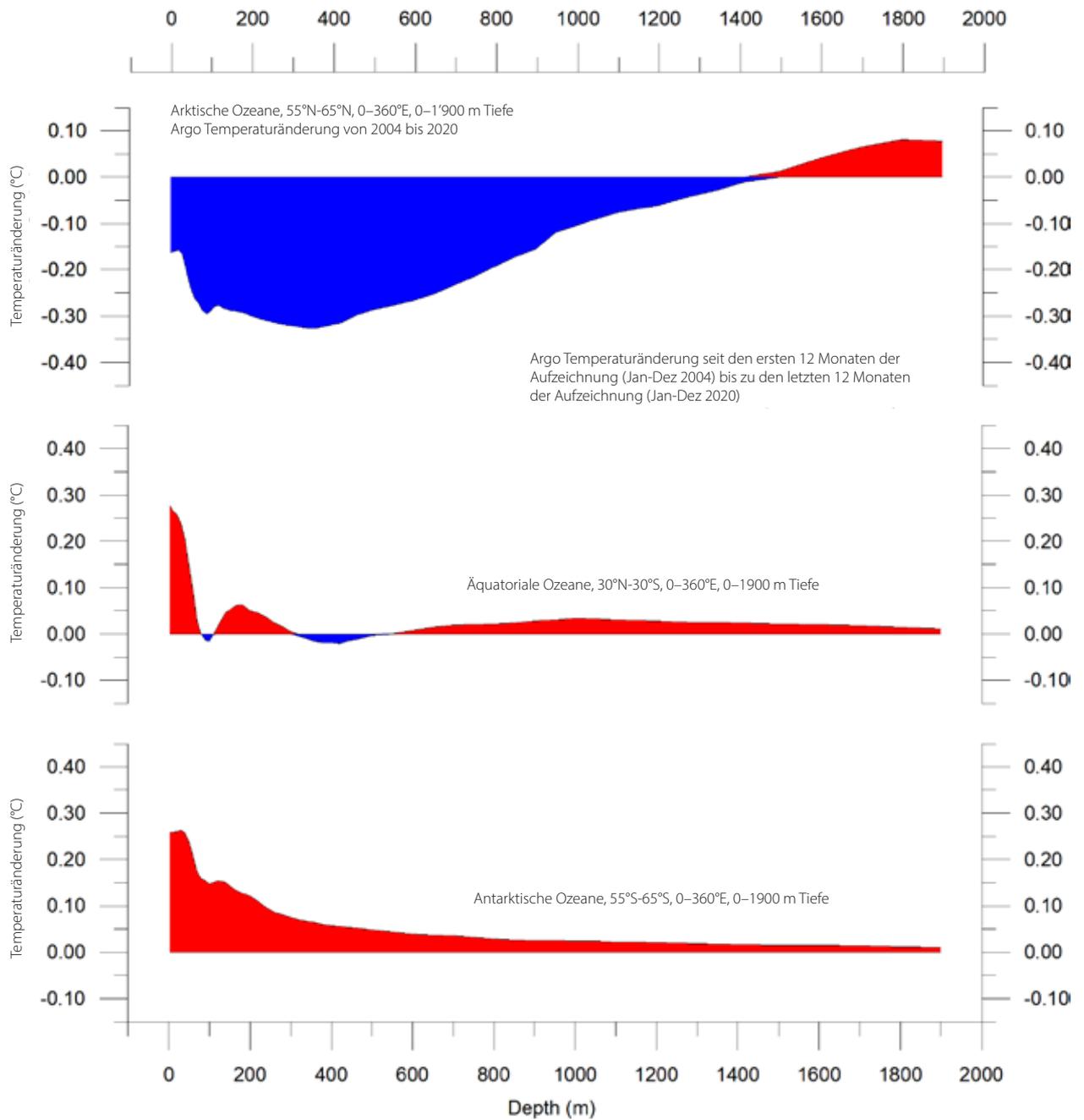


Abbildung 29: Temperature changes 0–1900 m

Global ocean net temperature change since 2004 from surface to 1900 m depth. Source: Global Marine Argo Atlas.

Nettoveränderung der Meerestemperatur 2004–2021 in ausgewählten Sektoren

Abbildung 30 zeigt die Netto-Temperaturänderungen für den Zeitraum 2004–21 entlang 20°W (siehe Abbildung 31), was den Atlantischen Ozean darstellt. Zur Erstellung des Diagramms wurden die 12-Monats-Durchschnittstemperaturen des Ozeans für 2021 mit den Jahresdurchschnittstemperaturen für 2004 verglichen, was die ersten 12 Monate der Argo-Aufzeichnungen darstellt. Um auch einen Einblick in die jüngsten Veränderungen zu geben, ist in Abbildung 30b die entsprechende 12-monatige Nettoveränderung von Januar 2021 bis Dezember 2021 dargestellt.

Warme Farben stehen für eine Nettoerwärmung und blaue Farben für eine Abkühlung. Aufgrund der Kugelform der Erde sind die Ozeanvolumina in hohen Breiten kleiner als in niedrigeren Breiten in Äquatornähe. Unter diesem Vorbehalt zeigen die Daten entlang des Atlantikprofils dennoch einige interessante Merkmale auf.

Das auffälligste Merkmal im Profil 2004–21 (Abbildung 30a) ist eine deutliche Nettoabkühlung nördlich von 35–40°N, die sich auf Tiefen bis zu 1'500–1'600 m auswirkt. Im Gegensatz dazu ist die Erwärmung in südlicheren Breiten, insbesondere zwischen 20–50°S, bis in etwa 1'100 m Tiefe zu beobachten. In 100–150 m Tiefe dominiert die Abkühlung zwischen 10°N und 40°S.

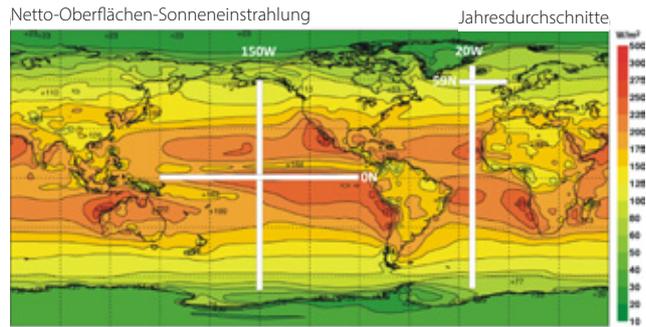


Abbildung 31: Lage der vier Profile

Mittlere jährliche Netto-Oberflächen-Sonneneinstrahlung (W/m^2) und die Lage der weiter unten erörterten Profile.

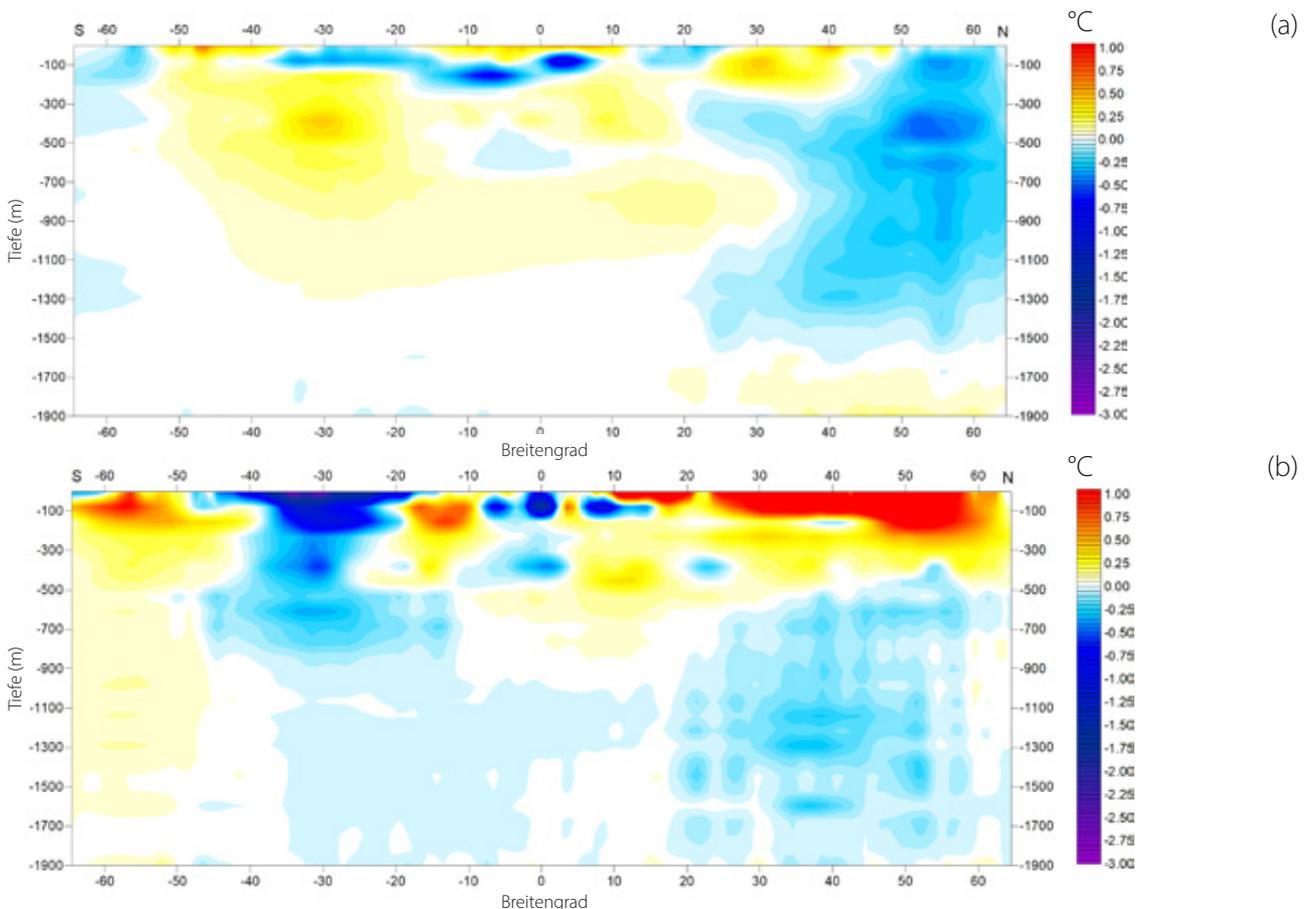


Abbildung 30: Temperaturänderung entlang des Atlantikprofils, 0–1'900 m

(a) 2004–2021 und (b) Jan-Dez 2021. Siehe Abbildung 31 für die geografische Lage des Profils. Datenquelle: Global Marine Argo Atlas

Die Temperaturentwicklung in den letzten 12 Monaten der Aufzeichnung (Abbildung 30b) zeigt ein komplizierteres Muster, insbesondere in Oberflächennähe. Ein Großteil des Südatlantiks, der in den Jahren 2004–21 eine Nettoerwärmung aufwies, erfährt derzeit eine Abkühlung, insbesondere zwischen 20°S und 40°S. Im Nordatlantik ist in den letzten 12 Monaten nördlich von 10°N eine Erwärmung zu beobachten, die sich auf Tiefen bis zu 200 m auswirkt, während in größeren Tiefen weiterhin eine Abkühlung vorherrscht.

Von besonderem Interesse für Europa sind die ozeanischen Temperaturveränderungen, die sich innerhalb eines Profils von 59°N durch den Nordatlantikstrom abspielen (siehe Abbildung 31), direkt südlich der Färöer Inseln. Diese Region ist für Wetter und Klima in weiten Teilen Europas von Bedeutung. Abbildung 32 zeigt eine Zeitreihe auf 59°N, von 30°W bis 0°W und von der Ober-

fläche bis 800 m Tiefe. Dies stellt im Wesentlichen einen Schnitt durch die von der nordatlantischen Strömung beeinflussten Wassermassen dar. Ozeantemperaturen von mehr als 9°C sind durch rote Farben gekennzeichnet.

Diese Zeitreihe ist zwar noch relativ kurz, zeigt aber eine bemerkenswerte Dynamik. Das Auftreten von warmem Wasser (über 9°C) erreichte offenbar Anfang 2006 seinen Höhepunkt, woraufhin die Temperaturen bis 2016 allmählich zurückgingen. Seitdem hat eine teilweise Erholung der Temperaturen stattgefunden. Die beobachtete Veränderung von einem Höhepunkt zu einem Tiefpunkt, die sich über etwa 11 Jahre erstreckt, könnte auf einen 22-jährigen Temperaturzyklus hindeuten, aber wir müssen abwarten, bis die Argo-Serie länger ist, bevor wir Schlussfolgerungen ziehen.

Abbildung 33 zeigt die identischen Zeitreihendaten (59°N, 330–0°W, 0–800 m Tiefe, 2004–2021),

Abbildung 32: Temperaturänderung entlang des Profils des Nordatlantikstroms, 0–800 m

Siehe Abbildung 31 für die geografische Lage des Profils. Datenquelle: Global Marine Argo Atlas.

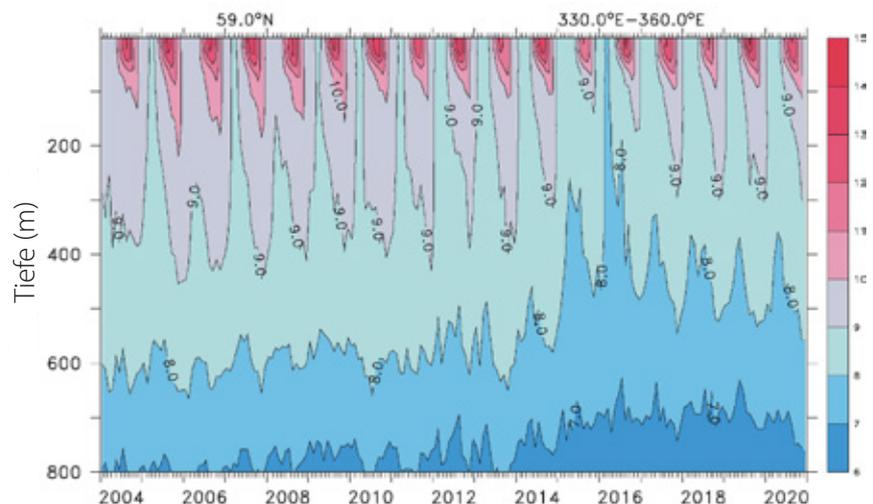
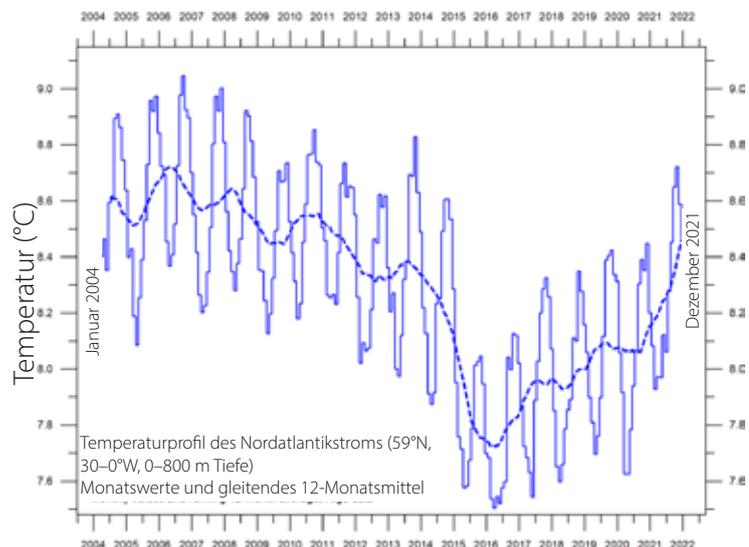


Abbildung 33: Tiefenintegrierte Temperatur für das Profil des Nordatlantikstroms.

Siehe Abbildung 31 für die geografische Lage des Profils. Datenquelle: Global Marine Argo Atlas.



jedoch als tiefenintegrierte durchschnittliche Meerestemperatur.

Abbildung 34 zeigt die beiden äquivalenten Diagramme für den Pazifischen Ozean, welche die Nettoveränderungen für 2004–21 und 2021 entlang 150°W darstellen. Auch hier werden Argo-Daten verwendet, die auf die gleiche Weise wie die beiden Atlantik-Diagramme in Abbildung 30 erstellt wurden. Es sei auch daran erinnert, dass die nördlichen und südlichen Breitengrade im Vergleich zu den äquatornahen Breitengraden nur relativ kleine Ozeanvolumina darstellen.

Ein interessantes Merkmal für 2004–21 (Abbildung 34a) ist die Nettoabkühlung in Äquatornähe (15°S–20°N) bis in etwa 700 m Tiefe. Im Gegensatz dazu sind zwei Bereiche (20–40°S und 30–45°N) durch eine Nettoerwärmung bis in 800–900 m

Tiefe gekennzeichnet. In den letzten 12 Monaten (Abbildung 34b) war die Nettoabkühlung besonders ausgeprägt, abgesehen vom Oberflächenwasser in 5°S–50°N, das eine Erwärmung bis in 100–200 m Tiefe aufweist.

Die jüngste Erwärmung (2021) an der Oberfläche in Äquatornähe ist wahrscheinlich das Ergebnis einer kurzen Abschwächung des La Niña, das zu diesem Zeitpunkt herrschte (Abbildung 25).

Weder aus den atlantischen noch aus den pazifischen Längsdiagrammen geht hervor, inwieweit die angezeigten Nettoveränderungen durch die Ozeandynamik östlich und westlich der beiden betrachteten Profile verursacht werden. Aus diesem Grund sollten sie nicht überinterpretiert werden. Sie zeigen jedoch einen interessanten Kontrast, wobei der Atlantik seit 2004 eine dyna-

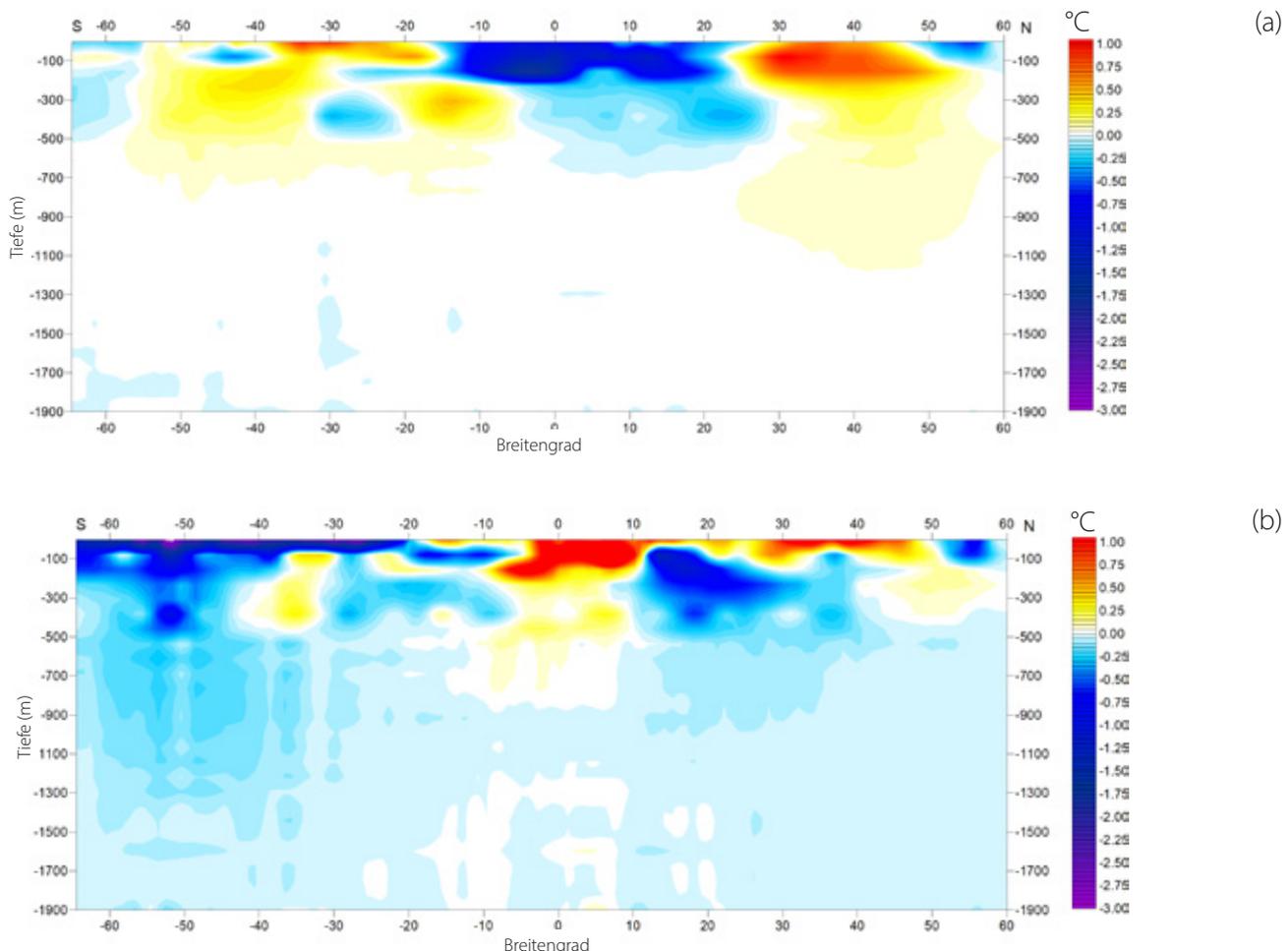


Abbildung 34: Temperaturänderung entlang des Pazifikprofils, 0–1'900 m

(a) 2004–2021 und (b) Januar–Dezember 2021. Siehe Abbildung 31 für die geografische Lage des Profils. Datenquelle: Global Marine Argo Atlas.

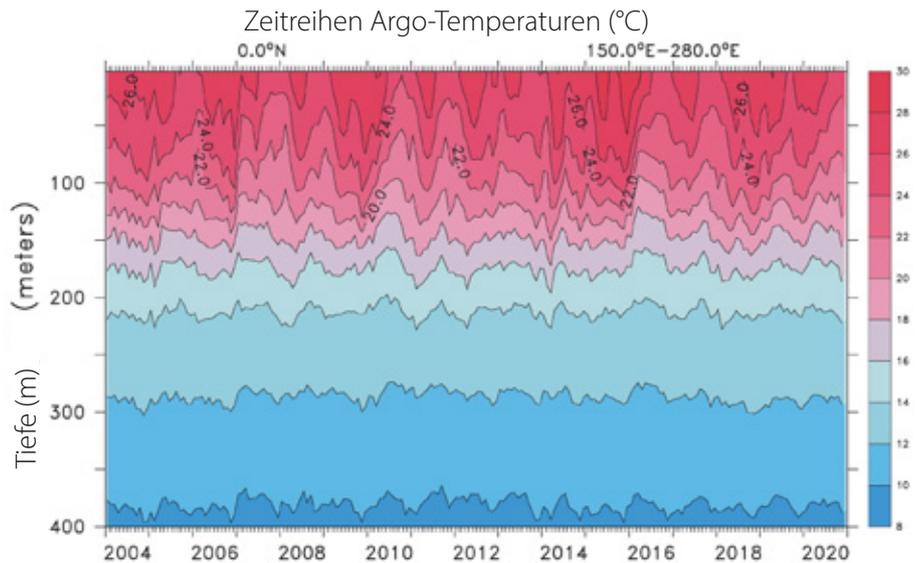
mischere Temperaturentwicklung aufweist als der Pazifik, mit Ausnahme der Tiefen und Breiten, die von El Niño- und La Niña-Episoden im Pazifik betroffen sind.

Abbildung 35 zeigt eine Zeitreihe der Meerestemperaturen von der Oberfläche bis in 400 m Tiefe in der El Niño/La Niña-Region (Pazifischer Ozean). Im Vergleich zu Abbildung 32 sind die einzelnen Episoden deutlich als Temperaturschwankungen in den oberen 150–200 m des Ozeans zu

erkennen. Unterhalb von 200–250 m sind die Temperaturen im Wesentlichen konstant, was zeigt, dass El Niño- und La Niña-Episoden Phänomene sind, die hauptsächlich durch Schwankungen der Oberflächenbedingungen angetrieben werden, mit geringem oder keinem Einfluss aus größeren Tiefen. Siehe auch die Kommentare zu den Abbildungen 22 und 25 für allgemeine Informationen über El Niño- und La Niña-Episoden.

Abbildung 35: Temperature change along Pacific profile, 0–400 m

Sea temperature variations with depth January 2004–December 2020 in the El Niño and La Niña region along the Equator in the Pacific Ocean. See Figure 31 for geographical location of transect. Data source: Global Marine Argo Atlas.



6. Ozeanische Oszillationen

Index der Südlichen Oszillation

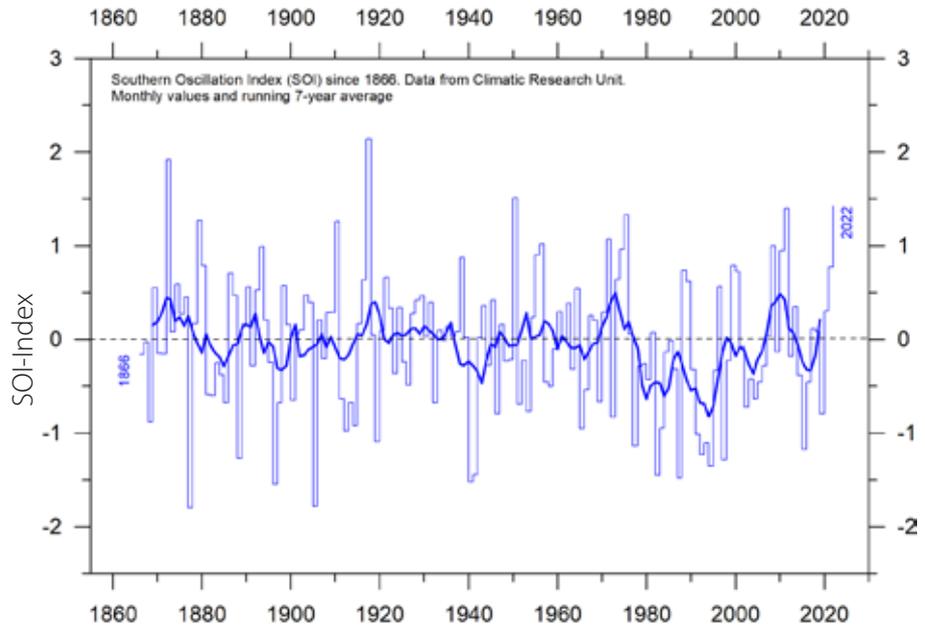
Die Südliche Oszillation (SOI) kann als die atmosphärische Komponente von El Niño/La Niña-Episoden betrachtet werden. Es handelt sich um einen standardisierten Index, der auf den beobachteten Druckunterschieden auf dem Meeresspiegel zwischen Tahiti (Französisch-Polynesien) und Darwin (Australien) basiert. Geglättete Zeitreihen des SOI korrespondieren häufig mit Änderungen der Meerestemperaturen im östlichen tropischen Pazifik. Der SOI steht im Zusammenhang mit der El Niño-Südlichen Oszillation (ENSO), die koordinierte, jahreszeitlich bedingte Veränderungen der Meeresoberflächentemperaturen und der atmosphärischen Zirkulation im tropischen Pazifik mit sich bringt. Er verfolgt den atmosphärischen Teil des Musters, während der Ozeanische Niño Index (Abbildung 25) den ozeanischen Teil abdeckt. Anhaltend negative Werte des SOI (Abbildung 36)

weisen häufig auf El Niño-Episoden hin. Solche negativen Werte gehen in der Regel mit einer anhaltenden Erwärmung des zentralen und östlichen tropischen Pazifiks, einer Abnahme der Stärke der pazifischen Passatwinde und einem Rückgang der Niederschläge über Ost- und Nordaustralien einher.

Positive Werte des SOI sind in der Regel mit stärkeren pazifischen Passatwinden und höheren Meeresoberflächentemperaturen nördlich von Australien verbunden, was auf La Niña-Episoden hinweist. Das Wasser im zentralen und östlichen tropischen Pazifik wird in dieser Zeit kühler, und in Ost- und Nordaustralien fallen in der Regel mehr Niederschläge. Eine Fourier-Frequenzanalyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die SOI-Aufzeichnung von einem 3,6-jährigen Zyklus beeinflusst wird.

Abbildung 36: Jährliche SOI-Anomalie seit 1866.

Die dünne Linie stellt Jahreswerte dar, während die dicke Linie das gleitende 5-Jahresmittel angibt. Quelle: Climatic Research Unit, University of East Anglia



Pacific Decadal Oscillation

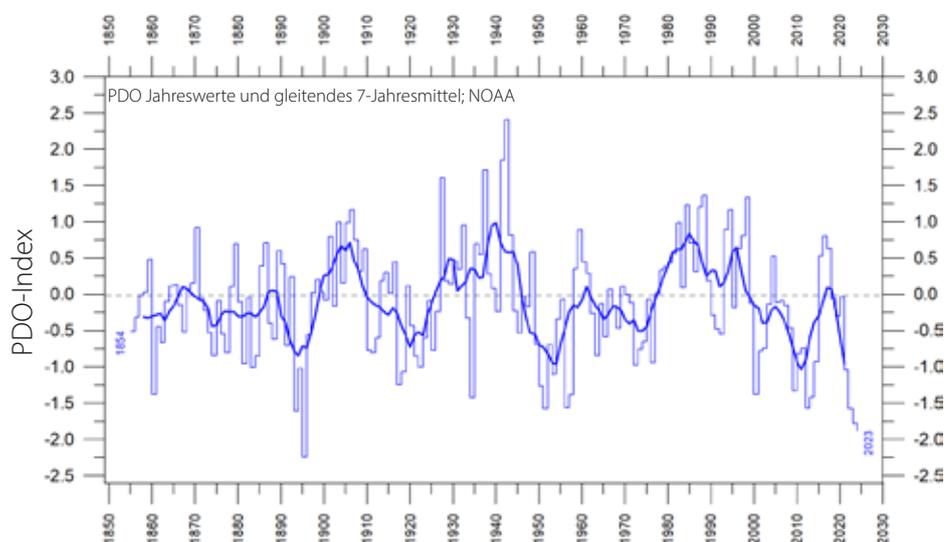
Die PDO (Abbildung 37) ist ein langlebiges El Niño-ähnliches Muster der pazifischen Klimavariabilität, dessen Daten bis zum Januar 1854 zurückreichen. Wenn die Meeresoberflächentemperaturen (SST) im Inneren des Nordpazifiks niedrig und an der nordamerikanischen Küste hoch sind, und wenn der Meeresspiegeldruck über dem Nordpazifik unter dem Durchschnitt liegt, hat die PDO einen positiven Wert. Wenn sich dieses Muster umkehrt, d. h. wenn die SST-Anomalien im Inneren des Nordpazifiks hoch und an der nordamerikanischen Küste niedrig sind,

oder wenn der Luftdruck über dem Nordpazifik über dem Durchschnitt liegt, hat die PDO einen negativen Wert.

Die Ursprünge der PDO sind derzeit nicht bekannt, aber selbst ohne einen theoretischen Rahmen verbessert das Verständnis ihrer Variabilität die Klimavorhersagen für Nordamerika von Saison zu Saison und von Jahr zu Jahr, da sie stark dazu neigt, über mehrere Jahreszeiten und Jahre hinweg zu bestehen. Die PDO scheint auch in etwa mit den globalen Temperaturveränderungen übereinzustimmen. Daher ist sie aus Sicht

Abbildung 37: Jahreswerte der Pazifischen Dekadischen Oszillation nach Angaben des Physical Sciences Laboratory, NOAA

Die dünne Linie zeigt die jährlichen PDO-Werte, die dicke Linie ist das gleitende 7-Jahresmittel. Quelle: PDO-Werte vom NOAA Physical Sciences Laboratory: ERSST V5 <https://psl.noaa.gov/pdo/>.



der gesellschaftlichen Auswirkungen wichtig, da sie zeigt, dass «normale» Klimabedingungen über Zeiträume variieren können, die mit der Länge eines Menschenlebens vergleichbar sind.

Die PDO veranschaulicht sehr schön, wie die globalen Temperaturen - manchmal, aber nicht immer - mit den Meeresoberflächentemperaturen im Pazifik, dem größten Ozean der Erde, verbunden sind. Wenn die Meeresoberflächentemperaturen relativ niedrig sind (negative PDO-Phase), wie es von 1945 bis 1977 der Fall war, sinkt die globale

Lufttemperatur. Wenn die Meeresoberflächentemperaturen hoch sind (positive PDO-Phase), wie in den Jahren 1977 bis 1998, steigt die globale Lufttemperatur (Abbildung 8).

Eine Fourier-Frequenzanalyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die PDO-Aufzeichnung durch einen signifikanten 5,6-Jahres-Zyklus beeinflusst wird, und möglicherweise auch durch eine längere 18,6-jährige Periode, die der Länge der Mondpräzession entspricht.

Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO)

Die Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO) ist ein Variabilitätsmodus, der in der Oberflächentemperatur des Nordatlantiks auftritt (Abbildung 38). Sie ist ein Index für die Meeresoberflächentemperaturen (SST) des Nordatlantiks. Der AMO-Index scheint mit den Lufttemperaturen und Niederschlägen in weiten Teilen der nördlichen Hemisphäre korreliert zu sein. Dieser Zusammenhang scheint für die Niederschläge im Nordosten Brasiliens und in der afrikanischen Sahelzone sowie für das nordamerikanische und europäische Sommerklima besonders ausgeprägt zu sein. Der AMO-Index scheint auch mit Veränderungen in der Häufigkeit nordamerikanischer Dürren und der Häufigkeit schwerer atlantischer Wirbelstürme verbunden zu sein.

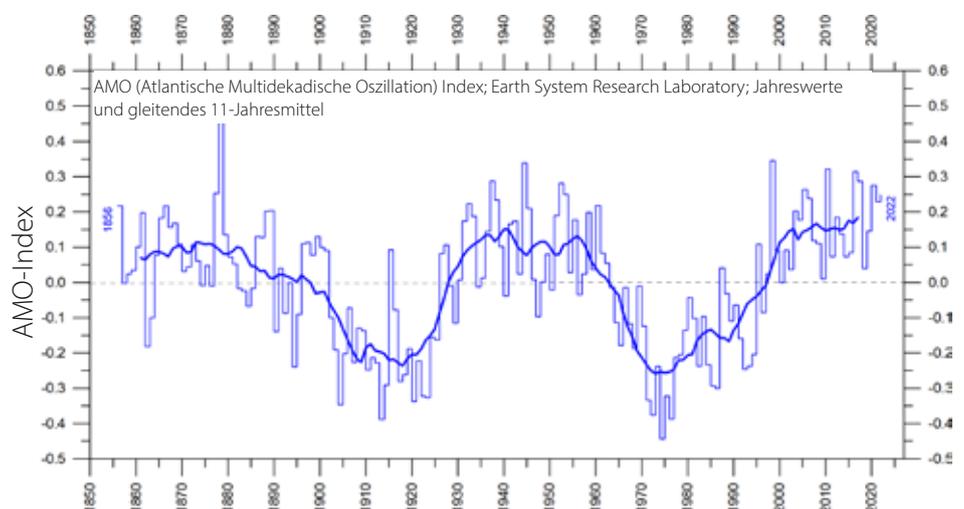
So kann der AMO-Index beispielsweise mit dem Auftreten großer Dürren im Mittleren Westen und Südwesten der USA in der Vergangenheit in

Verbindung gebracht werden. Wenn die AMO hoch ist, treten diese Dürren tendenziell häufiger auf oder dauern länger an, und umgekehrt bei niedrigen Werten. Zwei der schwersten Dürren des 20. Jahrhunderts in den USA - in den 1950er Jahren und die «Dust Bowl» der 1930er Jahre - fielen in die Zeit der höchsten AMO-Werte, die von 1925 bis 1965 dauerten. In Florida und im Pazifischen Nordwesten hingegen ist der Effekt eher umgekehrt, da eine hohe AMO in diesen Gebieten mit relativ hohen Niederschlägen einhergeht.

Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) deutet darauf hin, dass die AMO-Aufzeichnungen durch einen Zyklus von etwa 70 Jahren Dauer beeinflusst werden. Diese Periodizität findet sich auch in den HadCRUT- und NCDC-Aufzeichnungen der globalen Oberflächenlufttemperatur (Abbildungen 12 und 13).

Abbildung 38: Die Atlantische Multidekadische Oszillation

Jährliche Indexwerte der Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO), trendbereinigt und ungeglättet, seit 1856. Die dünne blaue Linie zeigt die Jahreswerte, die dicke Linie ist das gleitende 11-Jahresmittel. Daten Quelle: Earth System Research Laboratorium, NOAA, USA.



7. Sea-level

Der globale, regionale und lokale Meeresspiegel ändert sich ständig. Beim letzten glazialen Maximum vor etwa 20–25'000 Jahren lag der durchschnittliche globale Meeresspiegel etwa 120 m niedriger als heute. Seit dem Ende der so genannten Kleinen Eiszeit vor etwa 100–150 Jahren ist der Meeresspiegel laut Gezeitenmessdaten weltweit im Durchschnitt um 1–2 mm pro Jahr gestiegen.

Es ist bekannt, dass Wind (Stürme) ein wichtiger Faktor bei Flut-Katastrophen ist und auf Zeitskalen von Stunden bis Tagen wirkt. In diesem Abschnitt geht es jedoch in erster Linie um Prozesse, die auf längeren Zeitskalen von Jahren bis Jahrhunderten und länger ablaufen.

Die globale Meeresspiegelveränderung wird im Verhältnis zu einem idealisierten Referenzniveau, dem Geoid, gemessen, das ein mathematisches Modell der Erdoberfläche darstellt (Carter et al. 2014). Der globale Meeresspiegel ist eine Funktion des Volumens der Ozeanbecken an der Erdoberfläche und des darin enthaltenen Wasservolumens. Änderungen des globalen Meeresspiegels werden durch vier Hauptmechanismen (und möglicherweise weitere) verursacht:

1. Änderungen des lokalen und regionalen Luftdrucks und Windes sowie durch den Mond verursachte Gezeitenänderungen;
2. Veränderungen des Volumens der Ozeanbecken durch tektonische (geologische) Kräfte;
3. Änderungen der Dichte des Ozeanwassers, die durch Schwankungen der Strömungen, der Wassertemperatur und des Salzgehalts verursacht werden;
4. Veränderungen des Wasservolumens, die durch Schwankungen in der Massenbilanz der terrestrischen Gletscher verursacht werden.

Darüber hinaus gibt es noch einige andere Mechanismen, die den Meeresspiegel beeinflussen: Speicherung von Grundwasser, Speicherung in Seen und Flüssen, Verdunstung und so weiter.

Abgesehen von den Regionen, die von der quartären Vergletscherung betroffen waren, treten Änderungen des Volumens der Ozeanbecken zu langsam auf, um über die Lebenszeit des Menschen

hinweg von Bedeutung zu sein. Nach Ansicht des Autors sind es daher vor allem die Mechanismen 3 und 4, die für die gegenwärtigen Sorgen über den Meeresspiegelanstieg verantwortlich sind, obwohl auf lokaler Ebene auch Mechanismus 2 in Form von Erdbeben eine Rolle spielen kann, wie weiter unten erläutert wird.

Die höhere Temperatur des Ozeanwassers ist nur einer von mehreren Faktoren, die zum globalen Meeresspiegelanstieg beitragen, weil das Meerwasser einen relativ kleinen Ausdehnungskoeffizienten hat und weil sich die Erwärmung über die interessierenden Zeiträume weitgehend auf die oberen paar hundert Meter beschränkt (siehe z. B. Abbildung 28).

Das Wachstum oder der Zerfall von Meereis und Schelfeis hat keinen Einfluss auf den Meeresspiegel. Das Abschmelzen von Landeis - sowohl von Gebirgsgletschern als auch von den Eisschilden Grönlands und der Antarktis - ist jedoch ein wichtiger Faktor. Wie bereits erwähnt, lag der Meeresspiegel während des letzten glazialen Maximums um etwa 120 m niedriger, und während der letzten Zwischeneiszeit vor etwa 120'000 Jahren waren die globalen Temperaturen und damit der Meeresspiegel höher als heute, weil damals große Teile des grönländischen Eisschildes geschmolzen waren.

Auf regionaler und lokaler Ebene müssen jedoch auch Faktoren berücksichtigt werden, die sich auf Veränderungen des Luftdrucks, des Windes und des Geoids beziehen. So wirken sich zum Beispiel Volumenänderungen des grönländischen Eisschildes auf das Geoid in den an Grönland angrenzenden Regionen aus. Sollte die Gesamtmasse Grönlands abnehmen, wird sich die Geoidoberfläche zum Erdmittelpunkt hin verschieben, und der Meeresspiegel in der Region wird entsprechend sinken. Dies würde geschehen, obwohl die Gesamtwassermenge in den Weltmeeren durch den Verlust des Gletschereises zugenommen hätte.

In Nordeuropa und in bedeutenden Teilen Nordamerikas muss bei der Abschätzung des künftigen Meeresspiegels noch ein weiterer Faktor berücksichtigt werden. So waren beispielsweise Norwegen, Schweden, Finnland und Dänemark

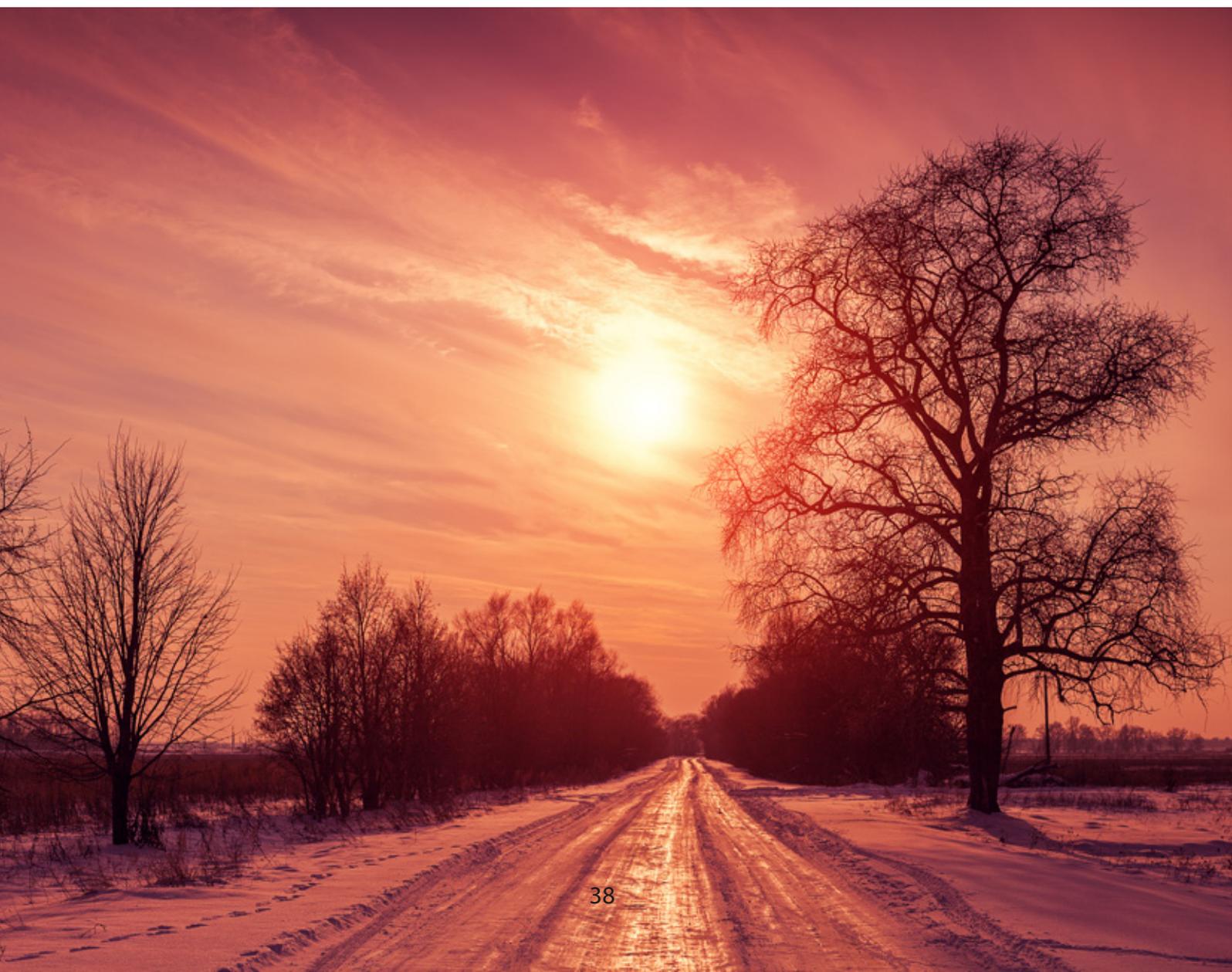
vor 20–25'000 Jahren ganz oder teilweise vom europäischen Eisschild bedeckt. Noch heute ist in diesen Gebieten die Auswirkung dieser Eislast an der anhaltenden isostatischen Landhebung von mehreren Millimetern pro Jahr zu erkennen. An vielen Orten gleicht dies den langsamen globalen Meeresspiegelanstieg mehr als aus, so dass ein Netto-Sinken des Meeresspiegels gegenüber dem Land zu verzeichnen ist.

Der enorme Massentransfer, der mit den wachsenden Eisschilden in Nordamerika und Europa während der letzten Eiszeit einherging, führte zu viskoelastischem Mantelfluss und elastischen Effekten in der oberen Kruste. So wölbte sich die Oberfläche des Planeten dort, wo kein Eis war, nach oben, während das Land unter den Eisschilden zusammengedrückt wurde. Heute, da das Eis verschwunden ist, sinken die letztgenannten Regionen langsam wieder ab, was zu einem offenbar überdurchschnittlichen Anstieg

des Meeresspiegels führt. An mehreren Orten entlang der Ostküste der USA und der Westküste Europas ist dieser Prozess zu beobachten.

Die viskoelastische Mantelströmung beeinflusst nicht nur die Landoberfläche, sondern auch das Volumen der angrenzenden Ozeanbecken. Auf diese Weise kann sich der Meeresspiegel in den betroffenen Regionen und darüber hinaus verändern. Dies ist jedoch ein langsamer Prozess, der in der Regel in menschlichen Zeiträumen keine Rolle spielt. Andererseits können schnelle tektonische Bewegungen in Verbindung mit Erdbeben zu plötzlichen Veränderungen des lokalen Meeresspiegels im Verhältnis zum Land führen.

Die relative Bewegung des Meeresspiegels im Verhältnis zum Land ist für die Küstenplanung von Bedeutung und wird als «relative Meeresspiegeländerung» bezeichnet. Diese wird von den Gezeitenmessern aufgezeichnet.



Meeresspiegel aus Satellitenaltimetrie

Die Satellitenaltimetrie ist eine relativ neue Messmethode, die einzigartige und wertvolle Einblicke in die Veränderungen der detaillierten Oberflächentopografie der Ozeane mit nahezu globaler Abdeckung bietet. Aufgrund von Interpretationsproblemen im Zusammenhang mit den Originaldaten ist sie jedoch wahrscheinlich kein präzises Instrument zur Schätzung absoluter Veränderungen des globalen Meeresspiegels.

Das wichtigste Problem ist die Glaziale Isostatische Anpassung (GIA), eine Korrektur des großräumigen, langfristigen Massentransfers von den Ozeanen auf das Land, der durch das Wachsen und Schwinden der großen quartären Eisschilde in Nordamerika und Nordeuropa entsteht. Dieser enorme Massentransfer führt zu Veränderungen in der Oberflächenbelastung, die, wie bereits

erwähnt, viskoelastische Mantelströmungen und elastische Effekte in der oberen Kruste zur Folge haben. Es ist schwierig, die Satellitendaten um diesen Effekt zu korrigieren, da keine einzelne Technik oder kein Beobachtungsnetz genügend Informationen liefern kann. Die Wissenschaftler müssen daher auf Modellierungen zurückgreifen, und die Antwort, die sie erhalten, hängt von der Art des Modells ab, das zur Simulation der letzten Eiszeit verwendet wird, und von der Art des angenommenen Krusten-Mantel-Modells. Aus diesem Grund (und wegen anderer Faktoren) schwanken die Schätzungen der globalen Meeresspiegelveränderung auf der Grundlage von Satellitenaltimetern etwas.

In Abbildung 39 wird der globale Meeresspiegelanstieg auf etwa 3,4 mm/Jahr (seit 1992)

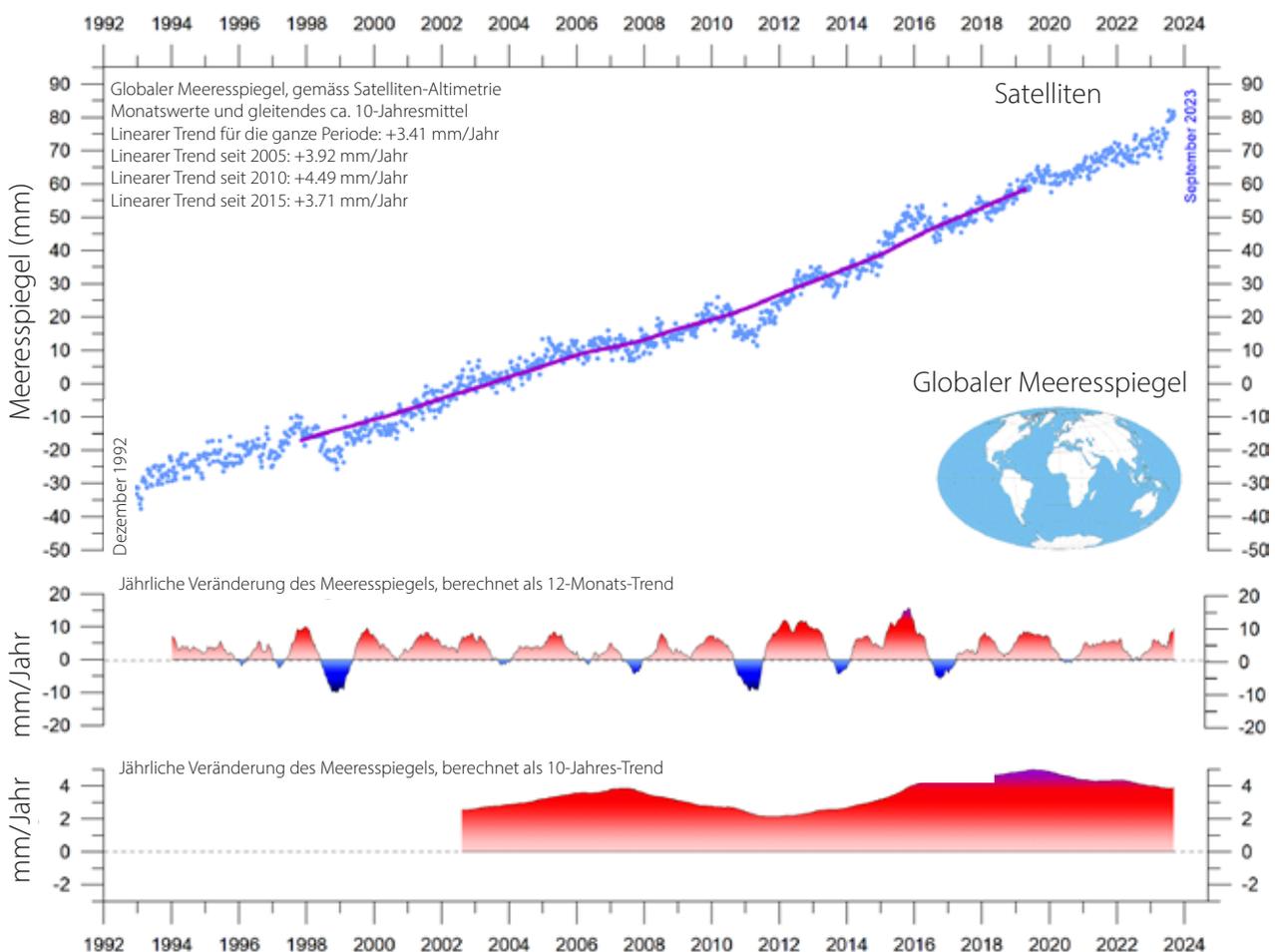


Abbildung 39: Veränderung des globalen Meeresspiegels seit Dezember 1992

Die beiden unteren Grafiken zeigen die jährliche Veränderung des Meeresspiegels, berechnet für 1- bzw. 10-Jahres-Zeitfenster. Diese Werte sind am Ende des betrachteten Intervalls aufgetragen. Quelle: Colorado Center for Astrodynamics Research at University at Boulder. Die blauen Punkte sind die einzelnen Beobachtungen (ohne den berechneten GIA-Effekt), und die violette Linie stellt das gleitende 121-Monatsmittel (ca. 10 Jahre) dar.

geschätzt, wobei der geschätzte GIA-Effekt entfernt wurde. Die seit 2005, 2010 und 2015 berechneten linearen Trends deuten nicht auf eine Beschleunigung in jüngster Zeit hin, und die untere Grafik

in Abbildung 39 deutet stattdessen darauf hin, dass der Höhepunkt des Meeresspiegelanstiegs um das Jahr 2020 herum überschritten worden sein könnte. Auch hier wird die Zeit es zeigen.

Meeresspiegel von Gezeitenpegeln

Gezeitenpegel befinden sich an Küstenstandorten und zeichnen die Nettobewegung der lokalen Meeresoberfläche im Verhältnis zum Land auf. Diese Messungen sind - im Gegensatz zur Satellitenaltimetrie - wichtige Informationen für die Planung von Küstenanlagen (Parker und Ollier, 2016 und Voortman 2023).

An einem bestimmten Küstenstandort setzt sich die gemessene Nettoveränderung des lokalen Meeresspiegels aus zwei Komponenten zusammen:

- die vertikale Veränderung der Meeresoberfläche
- die vertikale Veränderung der Landoberfläche

Ein Gezeitenpegel kann zum Beispiel einen scheinbaren Anstieg des Meeresspiegels von 3 mm/Jahr aufzeichnen. Wenn geodätische Messungen zeigen, dass das Land um 2 mm/Jahr sinkt, beträgt der tatsächliche Meeresspiegelanstieg nur 1 mm/Jahr (3 minus 2 mm/Jahr). In einem globalen Kontext des Meeresspiegels ist der Wert von 1 mm/Jahr relevant, aber in einem lokalen Kontext der Küstenplanung ist der Wert von 3 mm/Jahr derjenige, der für die lokalen Behörden nützlich ist.

Um eine Zeitreihe von Meeresspiegelmessungen an jedem Messpunkt zusammenzustellen, müssen die monatlichen und jährlichen Mittelwerte auf einen gemeinsamen Bezugspunkt reduziert

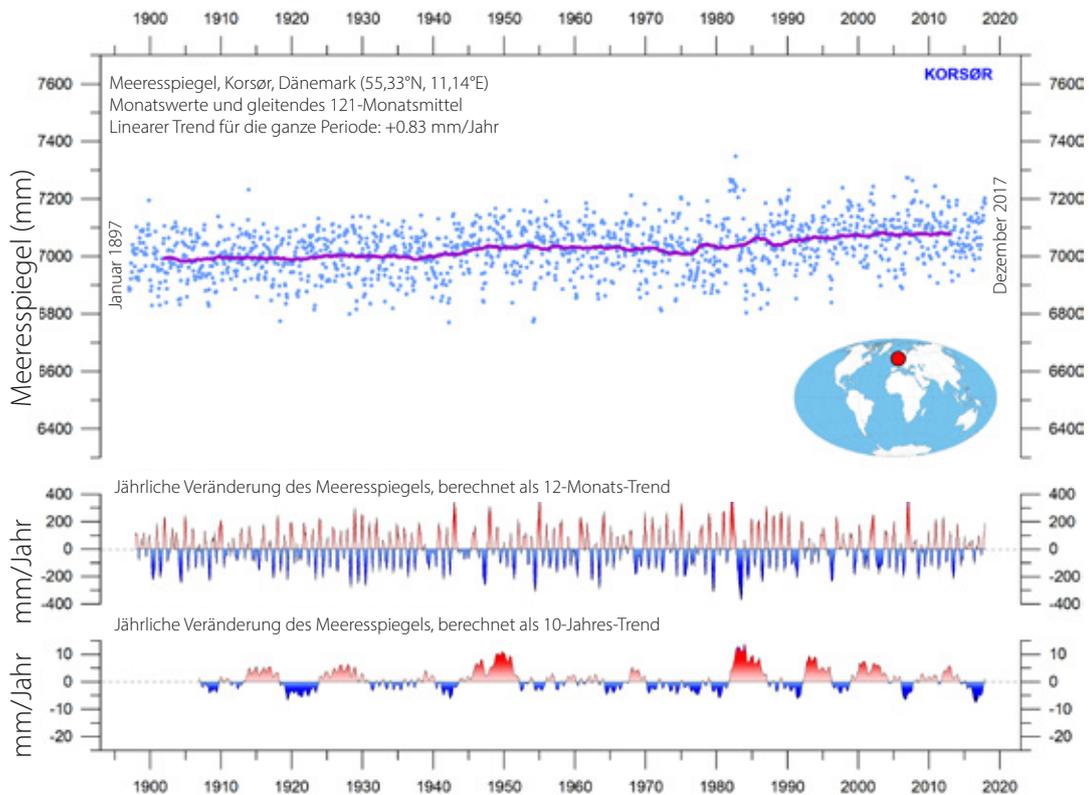


Abbildung 40: Monatliche Pegeldata von Korsør (Dänemark)

Aus dem PSMSL Data Explorer. Die blauen Punkte sind die einzelnen monatlichen Beobachtungen, und die violette Linie stellt das gleitende 121-Monatsmittel (ca. 10 Jahre) dar. Die beiden unteren Grafiken zeigen die jährliche Veränderung des Meeresspiegels, berechnet für 1- bzw. 10-Jahres-Zeitfenster. Diese Werte sind am Ende des betrachteten Intervalls aufgetragen.

werden. Der revidierte örtliche Bezugspunkt liegt an jeder Station bei etwa 7'000 mm unter dem mittleren Meeresspiegel. Diese willkürliche Wahl wurde vor vielen Jahren getroffen, um negative Zahlen in den resultierenden Mittelwerten zu vermeiden.

Nur wenige Orte auf der Erde sind völlig stabil, und die meisten Gezeitenpegel befinden sich an Orten, die tektonischen Hebungen oder Senkungen (vertikale Veränderungen der Landoberfläche) ausgesetzt sind. Diese weit verbreitete vertikale Instabilität hat mehrere Ursachen und beeinträchtigt die Interpretation der Daten der einzelnen Pegelstationen. Daher werden große Anstrengungen unternommen, um lokale tekto-

nische Bewegungen zu korrigieren.

Daher sind Daten von Pegeln, die an tektonisch stabilen Standorten liegen, von besonderem Interesse. Ein Beispiel für eine lange, kontinuierliche Aufzeichnung an einem solchen stabilen Standort stammt aus Korsør, Dänemark (Abbildung 40). Diese Aufzeichnung zeigt einen stabilen Anstieg des Meeresspiegels von 0,83 mm pro Jahr seit 1897, ohne Anzeichen einer Beschleunigung in jüngster Zeit. Da die tektonische Korrektur für diese spezielle Station gleich Null ist, ist der aufgezeichnete Anstieg des Meeresspiegels von 0,83 mm pro Jahr der relevante Wert für die lokalen Planungsbehörden.

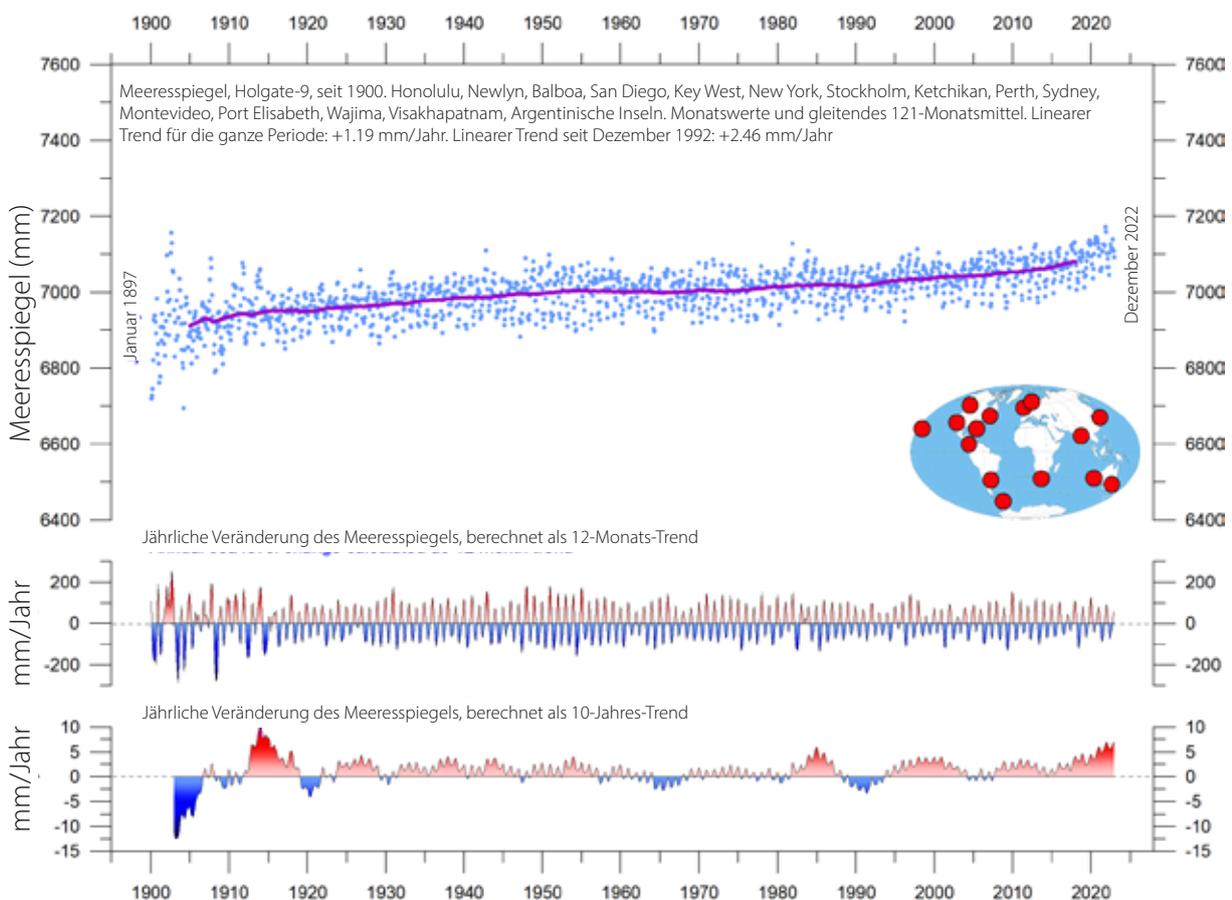


Abbildung 41: Monatliche Holgate-9 Pegeldata aus dem PSMSL Data Explorer

Bei Holgate-9 handelt es sich um eine Reihe von Gezeitenpegeln an geologisch stabilen Standorten. Die beiden unteren Grafiken zeigen die jährliche Veränderung des Meeresspiegels, berechnet für 1- bzw. 10-Jahres-Zeitfenster. Diese Werte sind am Ende des betrachteten Intervalls aufgetragen. Quelle: Colorado Center for Astrodynamics Research at University of Colorado at Boulder. Die blauen Punkte sind die einzelnen Beobachtungen, und die violette Linie stellt das gleitende 121-Monatsmittel (ca. 10 Jahre) dar.

Modellierung des Meeresspiegels für die Zukunft

Die Frage des Meeresspiegelanstiegs und insbesondere die Identifizierung eines hypothetischen Beitrags des Menschen zu diesem Anstieg ist ein komplexes Thema. Angesichts der damit einhergehenden wissenschaftlichen und politischen Kontroverse ist das grosse öffentliche Interesse an diesem Thema durchaus verständlich. Eine aktuelle Veröffentlichung des IPCC, der Sechste Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I, wurde am 9. August 2021 publiziert. Es wurden modellierte globale und regionale Meeresspiegelprojektionen für 2020–2150 veröffentlicht, die über das IPCC AR6 Sea Level Projection Tool (Link am Ende dieses Berichts) abgerufen werden können. Der IPCC modelliert die künftige Entwicklung mehrerer Faktoren: Gletschermassenveränderung, vertikale Landbewegung sowie Wassertemperatur und

-speicherung. Die Meeresspiegelprojektionen für verschiedene Emissionsszenarien wurden im Verhältnis zu einer Basislinie berechnet, die durch die Beobachtungen für den Zeitraum 1995–2014 festgelegt wurde.

Es ist aufschlussreich, die modellierten Daten mit den beobachteten Meeresspiegeldaten zu vergleichen. Abbildung 42 zeigt dies für einen Ort, nämlich Oslo, in Norwegen. Nordeuropa war vor 20–25'000 Jahren vom Europäischen Eisschild bedeckt, wobei sich zum Zeitpunkt der maximalen Vergletscherung mehr als 2 km Eis über dem Gebiet der heutigen Stadt befanden. Die Auswirkungen dieser Eislast sind heute deutlich daran zu erkennen, dass Südnorwegen eine kontinuierliche isostatische Landhebung von mehreren Millimetern pro Jahr erfährt. An vielen Orten in

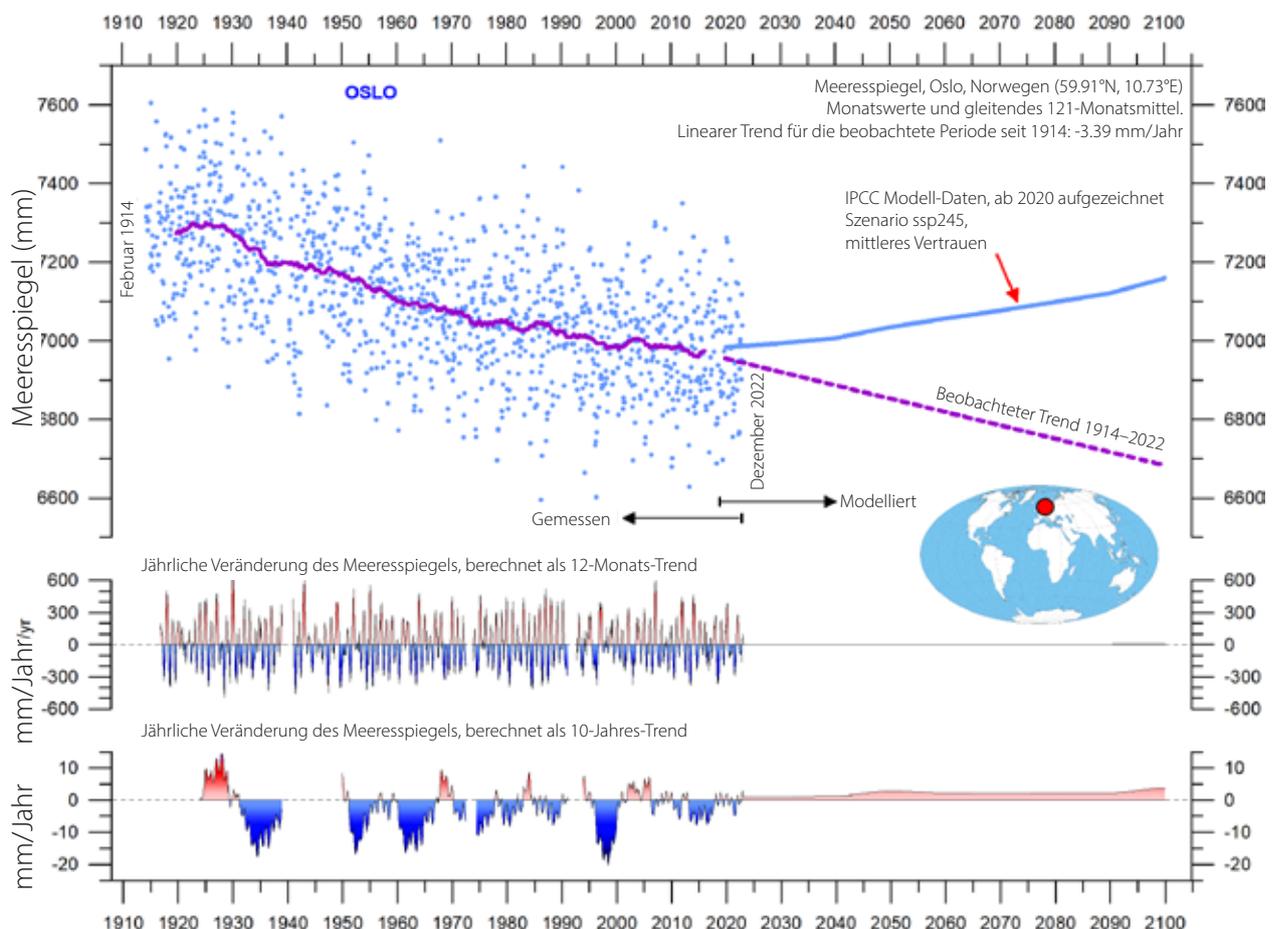


Abbildung 42: Beobachteter und modellierter Meeresspiegel für Oslo.

Die blauen Punkte sind die einzelnen monatlichen Pegelbeobachtungen (PSMSL Data Explorer) 1914–2019, und die violette Linie stellt das gleitende 121-Monatsmittel (ca. 10 Jahre) dar. Die modellierten Daten für die Zukunft sind durch eine durchgezogene blaue Linie 2020–2100 dargestellt, wobei das moderate SSP2–4.5-Szenario (IPCC 2020) verwendet wurde. Die beiden unteren Grafiken zeigen die jährliche Veränderung des Meeresspiegels, berechnet für 1- bzw. 10-Jahres-Zeitfenster. Diese Werte sind am Ende des betrachteten Intervalls aufgetragen.

Europa und Nordamerika, die von der letzten (Weichsel-/Wisconsin-) Vereisung betroffen waren, gleicht diese anhaltende isostatische Bewegung den langsamen globalen Meeresspiegelanstieg mehr als aus, so dass ein Netto-Meeresspiegelrückgang im Verhältnis zum Land zu verzeichnen ist

Da Oslo während der letzten Eiszeit von dickem Eis bedeckt war, ist die Stadt heute von einem deutlichen isostatischen Landanstieg betroffen. Wenn sich die beobachtete Änderungsrate des Meeresspiegels in Oslo fortsetzt (auf der Grundlage von etwa 110 Jahren Beobachtungen), wird der Meeresspiegel gegenüber dem Land bis zum Jahr 2100 um etwa 27 cm im Vergleich zu 2020 gesunken sein (Abbildung 42). Nach Angaben des IPCC wird er jedoch um etwa 17,5 cm ansteigen. Der IPCC geht von einem recht plötzlichen Anstieg um das Jahr 2020 aus, was im Gegensatz zu dem seit 1914 beobachteten stabilen Rückgang des Meeresspiegels von -3,39 mm/Jahr steht. Beobachtete (gemessene) und modellierte Daten überschneiden sich jetzt um drei Jahre (Abbildung 42). Der Überlappungszeitraum ist noch kurz, und ein guter Vergleich ist schwierig. Die Beobachtungsdaten scheinen jedoch auf einen ununterbrochenen Rückgang des Meeresspiegels in Oslo seit 2020 hinzudeuten, im Gegensatz zur Modellprojektion (blaue Linie in Abbildung 42). Auch hier wird die Zeit es zeigen.

An dieser Stelle sind vielleicht ein paar Bemerkungen angebracht. Die vom IPCC für Oslo (und viele andere Küstenstandorte) vorgeschlagene schrittweise Veränderung der relativen Meeresspiegeldynamik im Jahr 2020 erscheint eher unplausibel und deutet darauf hin, dass die modellierten Daten die Dynamik in der realen Welt nicht angemessen beschreiben. Dies ist bemerkenswert, da die modellierten Meeresspiegelprojektionen für die verschiedenen SSP-Szenarien relativ zu einer Basislinie berechnet werden, die durch die Beobachtungen für 1995–2014 für jede Station definiert ist. Die Modellierer müssen also die Beobachtungsdaten eingesehen haben.

Laut dem Sechsten Sachstandsbericht wird geschätzt, dass menschliche Aktivitäten eine globale Erwärmung von etwa 1,0 °C über dem vorindustriellen Niveau verursacht haben, wobei die wahrscheinliche Spanne zwischen 0,8 und 1,2 °C liegt (Summary for Policymakers, A.1.3). Es ist daher besonders überraschend, dass sich die modellierte Auswirkung dieser Veränderung erst im Jahr 2020 in Form einer schrittweisen Veränderung auf den Meeresspiegel auswirken sollte. Hätten die Modellierer stattdessen ihre Meeresspiegeldaten von einem früheren Zeitpunkt, z. B. 1950, kalibriert, was durchaus möglich gewesen wäre, wäre der Kontrast zwischen beobachteten und modellierten Daten sofort deutlich geworden.

8. Schnee und Eis

Ausdehnung des Meereises

Die beiden Diagramme der durchschnittlichen 12-monatigen Meereisausdehnung in Abbildung 43 zeigen den Kontrast zwischen den beiden Polen im Zeitraum 1979–2020. Der Trend auf der nördlichen Hemisphäre - hin zu einer geringeren Ausdehnung - ist in der blauen Linie deutlich zu erkennen, ebenso wie die gleichzeitige Zunahme auf der südlichen Hemisphäre bis 2016. In vielerlei Hinsicht deuten diese und frühere Beobachtungen in diesem Bericht darauf hin, dass die Jahre 2016–2021 möglicherweise eine wichtige Verschiebung im globalen Klimasystem markieren (siehe z. B. die Ozeantemperaturen in Abbildung 26).

Die antarktische Meereisausdehnung nahm im Frühjahr 2016 auf der Südhalbkugel ausse-

rordentlich schnell ab, viel schneller als in jedem anderen Frühjahr der Satellitenära (seit 1979). Dieser Rückgang war in allen Sektoren der Antarktis zu beobachten, am stärksten jedoch im Weddell- und Rossmeer. In diesen Sektoren drückten starke nördliche (warme) Oberflächenwinde das Meereis zurück in Richtung des antarktischen Kontinents. Der Hintergrund für die ungewöhnlichen Windbedingungen im Jahr 2016 wurde von verschiedenen Autoren diskutiert (z. B. Turner et al. 2017 und Phys.org 2019) und scheint ein Phänomen zu sein, das mit der natürlichen Klimavariabilität zusammenhängt. Die Aufzeichnungen des Satelliten-Meereises sind noch kurz und bilden die natürlichen Schwankungen, die sich über mehr

als ein oder zwei Jahrzehnte erstrecken, nicht vollständig ab.

Was sich aus der noch kurzen Aufzeichnung ablesen lässt, ist dennoch aufschlussreich. Die beiden 12-Monats-Durchschnittsgrafiken in Abbildung 43 zeigen wiederkehrende Schwankungen, die die allgemeinen Trends überlagern. Diese kürzeren Schwankungen werden durch eine 4,3-jährige periodische Variation für das arktische Meereis beeinflusst, während für das antarktische Meereis ein Zyklus von etwa 3,3

Jahren Dauer wichtig ist.

Abbildung 44 zeigt die Gesamtausdehnung und Dicke des arktischen Meereises von Ende 2022 bis Ende 2023. Die Dicke hat entlang der Küste des kanadischen Archipels etwas abgenommen, was vermutlich auf das schnelle Abschmelzen im Sommer 2023 zurückzuführen ist, während sowohl Dicke als auch Ausdehnung entlang der Ostküste Grönlands im Jahr 2023 zugenommen haben. Diese Entwicklungen sind in Abbildung 45 detailliert dargestellt.

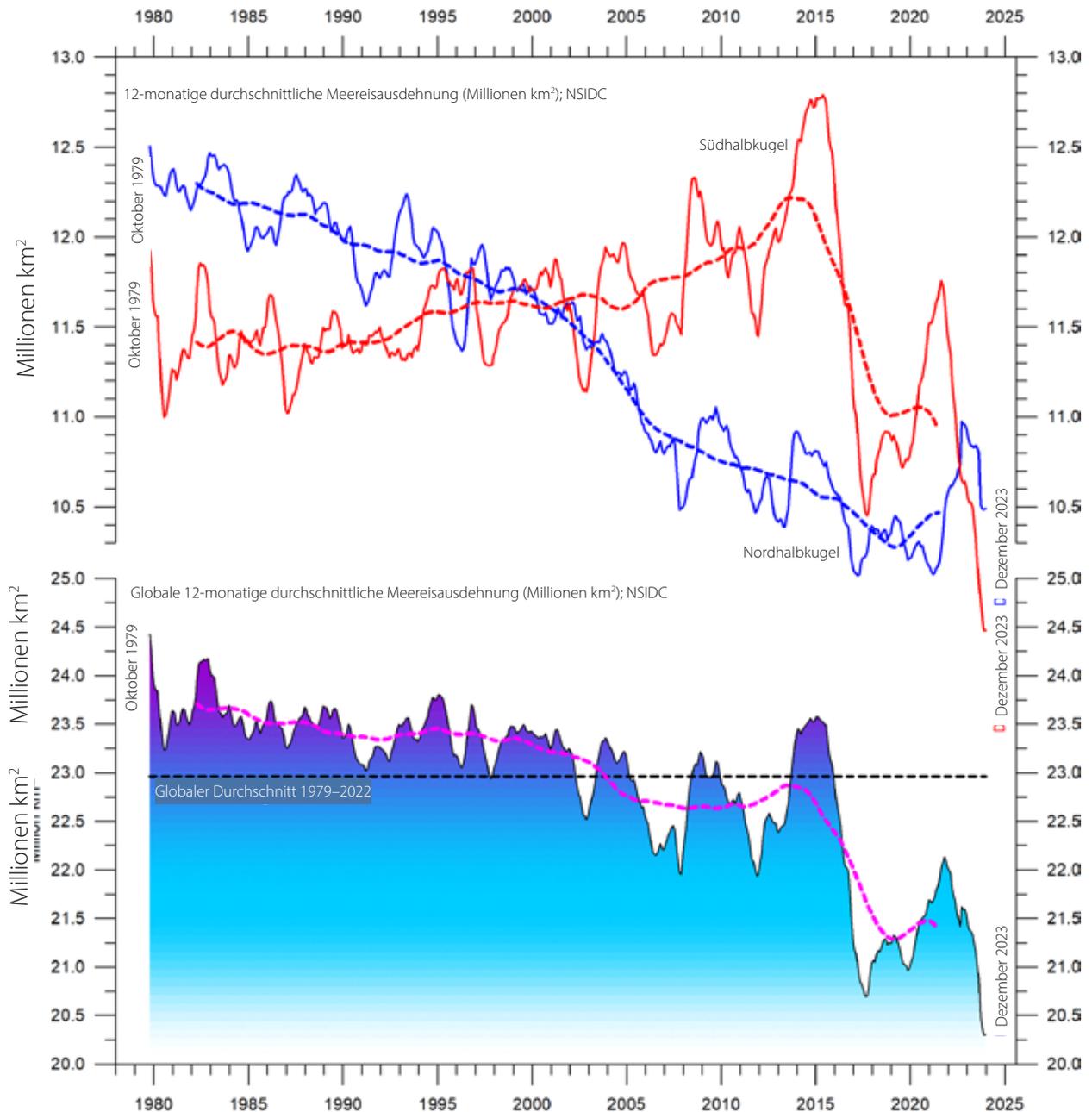


Abbildung 43: Globale und hemisphärische Meereisausdehnung seit 1979

Gleitende 12-Monatsmittel. Der Wert für Oktober 1979 entspricht dem monatlichen Durchschnitt von November 1978-Okttober 1979, der Wert für November 1979 dem Durchschnitt von Dezember 1978-November 1979 usw. Die gestrichelten Linien stellen ein 61-Monatsmittel (ca. 5 Jahre) dar. Der letzte Monat, der in die 12-Monats-Berechnungen einbezogen wurde, ist rechts im Diagramm dargestellt. Datenquelle: National Snow and Ice Data Center (NSIDC)..

Meereis-Dicke, 31. Dezember 2022

Meereis-Dicke, 31. Dezember 2023

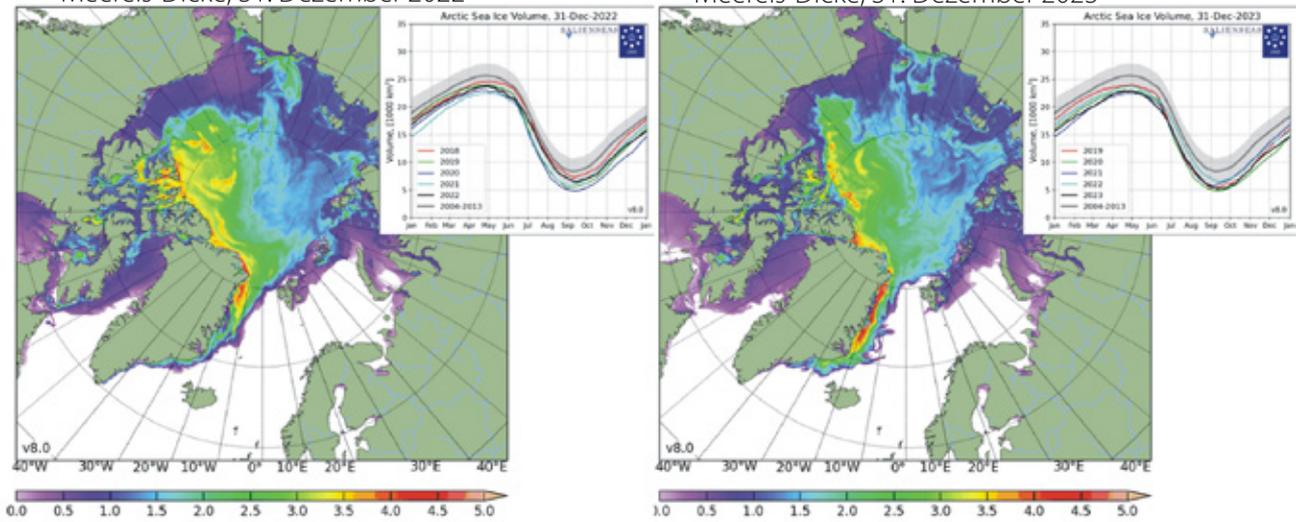


Abbildung 44: Arktisches Meereis 2022 gegenüber 2023

Ausdehnung und Dicke des arktischen Meereises am 31. Dezember 2022 (links) und 2023 (rechts) sowie die saisonalen Zyklen des berechneten Gesamtvolumens des arktischen Meereises nach Angaben des Dänischen Meteorologischen Instituts (DMI). Das mittlere Meereisvolumen und die Standardabweichung für den Zeitraum 2004–2013 sind in den eingefügten Diagrammen grau schattiert dargestellt.

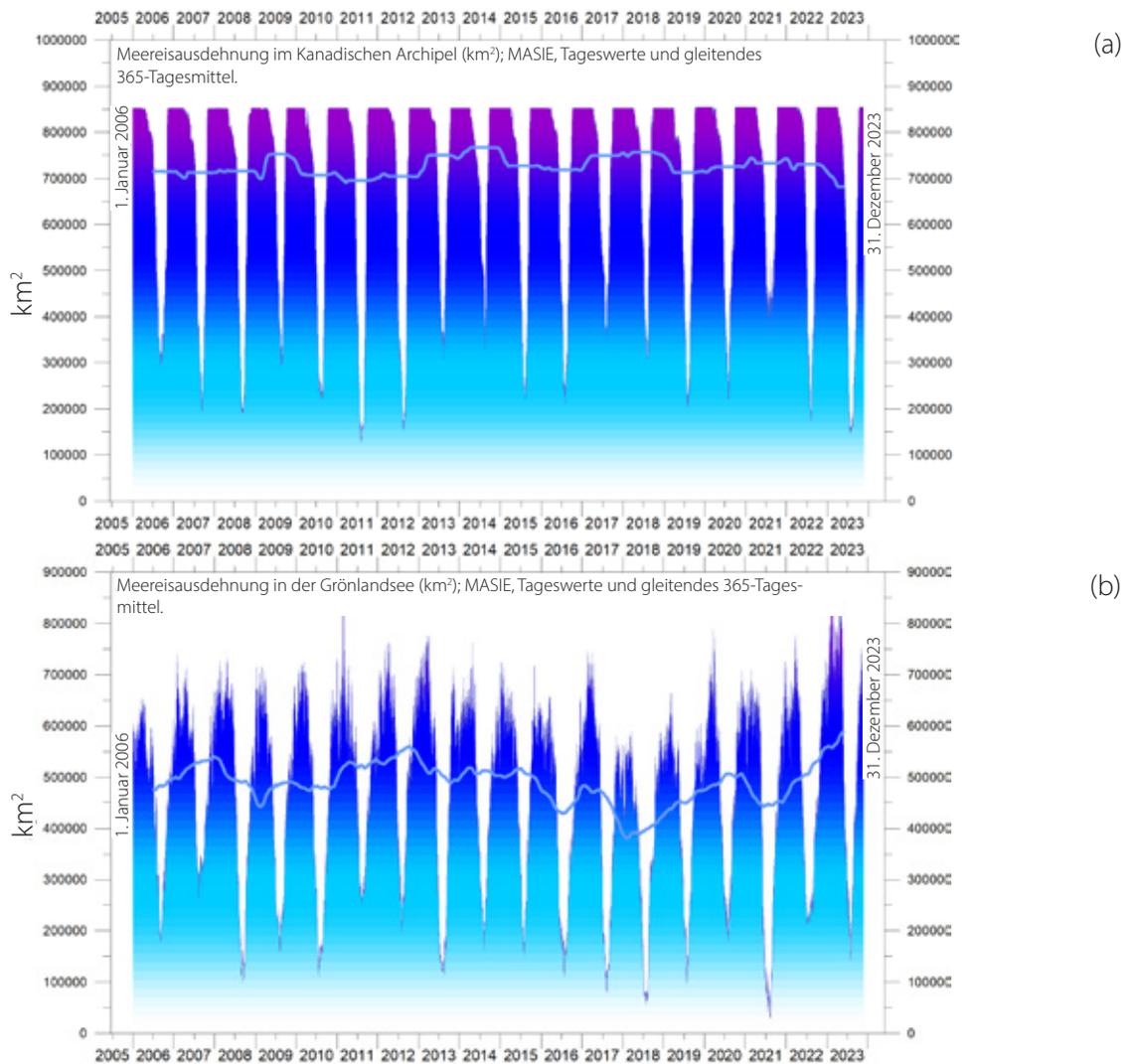


Abbildung 45: Tägliche Meereisausdehnung im Kanadischen Archipel und in der Grönlandsee seit 2006.

(a) Kanadischer Archipel, (b) Grönlandsee. Quelle: Multisensor Analyzed Sea Ice Extent (MASIE).

Schneebedeckung der nördlichen Hemisphäre

Die Schwankungen der globalen Schneedecke sind hauptsächlich das Ergebnis von Veränderungen auf der Nordhalbkugel (Abbildung 46), wo sich alle großen Landgebiete befinden. Die

Schneedecke der südlichen Hemisphäre wird im Wesentlichen durch die Größe des antarktischen Eisschildes bestimmt und ist daher relativ stabil.

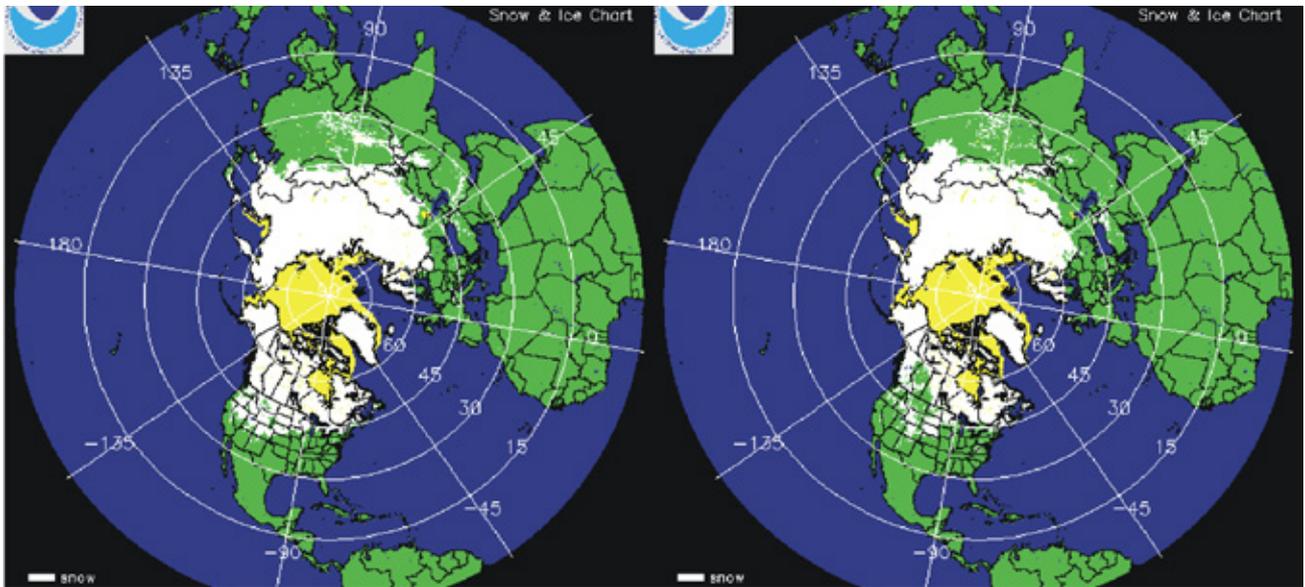


Abbildung 46: Schnee und Meereis der nördlichen Hemisphäre

Schneedecke (weiß) und Meereis (gelb) am 31. Dezember 2021 (links) und 2022 (rechts). Quelle der Karte: National Ice Center (NIC).

Die Schneedecke der nördlichen Hemisphäre weist von Jahr zu Jahr große lokale und regionale Schwankungen auf. Die allgemeine Tendenz (seit 1972) geht jedoch in Richtung quasi-stabiler Bedingungen, wie in Abbildung 47 dargestellt. Während des Sommers der nördlichen Hemisphäre schrumpft die Schneedecke normalerweise auf etwa 2'400'000 km² (hauptsächlich bedingt durch die Größe des grönländischen Eisschildes), aber im Winter steigt sie auf etwa 50'000'000 km² an, was nicht weniger als 33 % der gesamten Landfläche der Erde entspricht. Das Maximum der Schneedecke auf der nördlichen Hemisphäre wird gewöhnlich im Februar erreicht, das Minimum im

August (Abbildung 47).

Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) legt nahe, dass die Aufzeichnungen der nördlichen Hemisphäre nicht nur durch den jährlichen Zyklus, sondern wahrscheinlich auch durch einen längeren Zyklus von etwa 6,5 Jahren beeinflusst werden.

Betrachtet man die jahreszeitlichen Veränderungen (Abbildung 48), so hat die Schneedecke der nördlichen Hemisphäre im Herbst leicht zugenommen, ist in der Wintermitte stabil und nimmt im Frühjahr leicht ab. Im Jahr 2023 lag die Ausdehnung der nördlichen Hemisphäre nahe dem Durchschnitt von 1972–2022 (Abbildung 47).

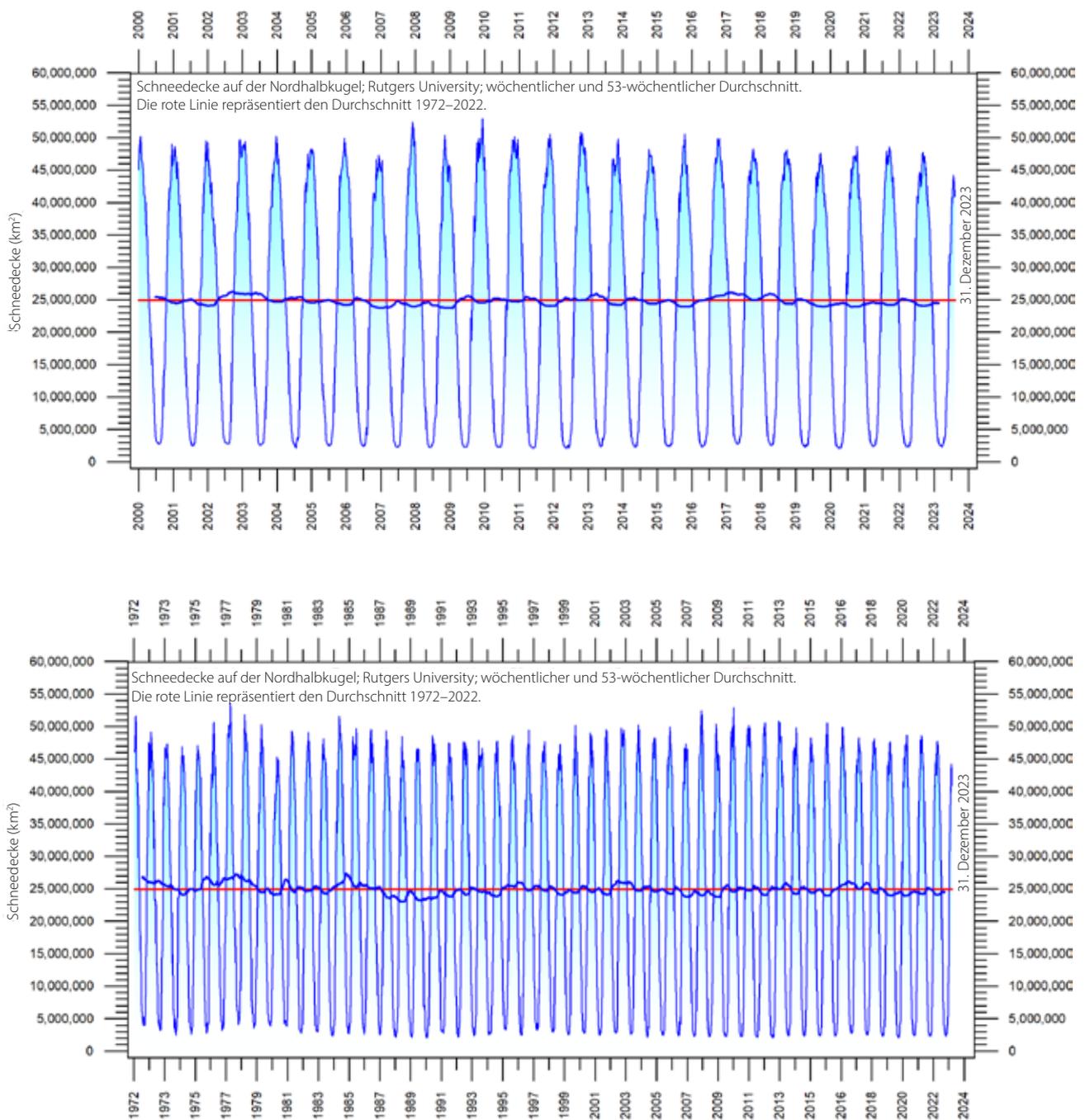


Abbildung 47: Wöchentliche Schneedecke der nördlichen Hemisphäre seit 2000

(a) seit Januar 2000 und (b) seit 1972. Quelle: Rutgers University Global Snow Laboratory. Die dünne blaue Linie sind die wöchentlichen Daten, die dicke blaue Linie ist das gleitende 53-Wochenmittel (etwa 1 Jahr). Die horizontale rote Linie ist der Durchschnitt von 1972 bis 2022.

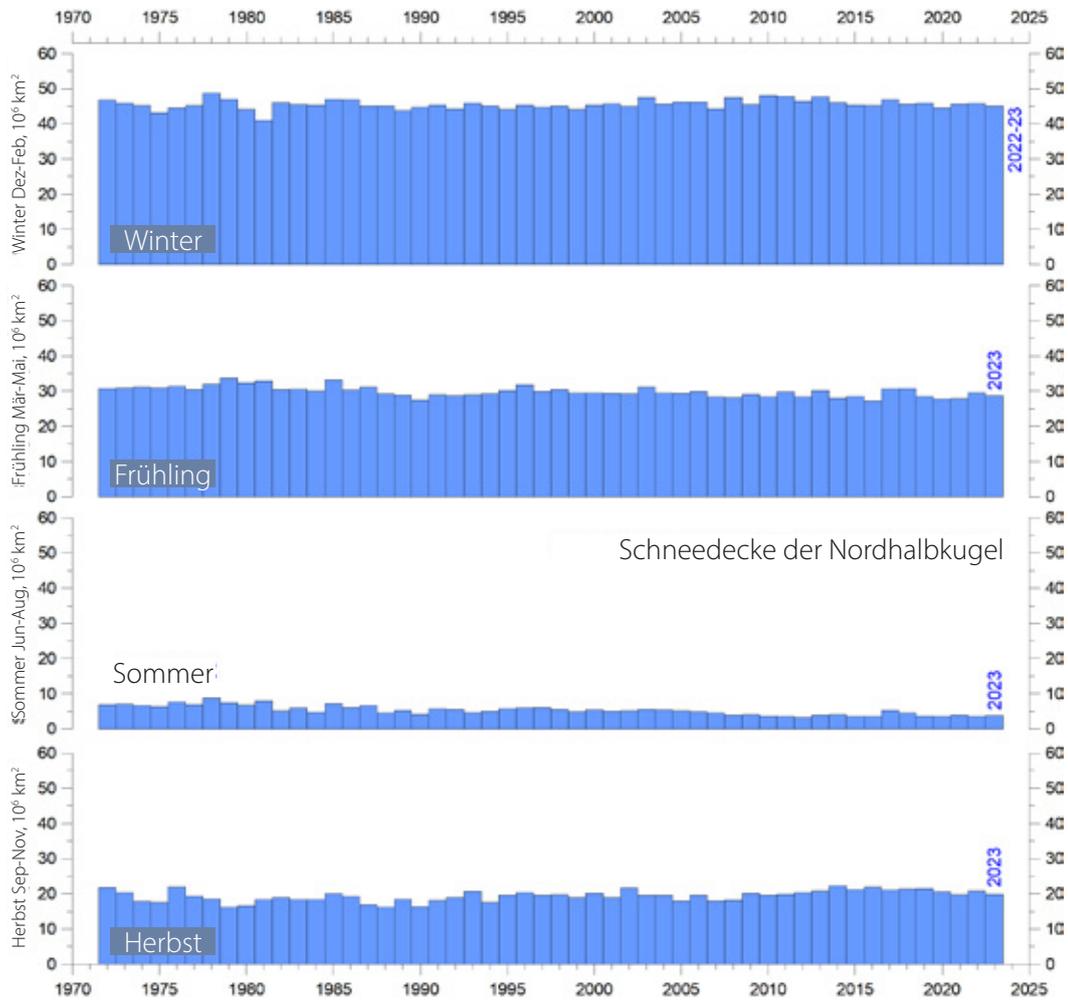


Abbildung 48: Saisonale Schneedecke der nördlichen Hemisphäre seit 1972

Quelle: Rutgers University Global Snow Laboratory. .

9. Niederschlag

Die jährlichen regionalen Niederschläge (Regen, Schnee) schwanken zwischen mehr als 3'000 mm/Jahr und fast Null (Abbildung 49). Der globale Durchschnittsniederschlag schwankt von Jahr zu Jahr, und die berechnete jährliche Anomalie in Bezug auf den Durchschnitt von 1901–2021 ist in Abbildung 50 dargestellt. Jährliche Schwankungen des globalen Durchschnittsniederschlags von bis zu ± 30 mm/Jahr sind nicht ungewöhnlich. Besonders hoch war der globale Niederschlag in den Jahren 1956, 1973 und 2010, besonders niedrig in den Jahren 1941, 1965, 1987 und 1992.

Eine Fourier-Frequenzanalyse (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die globale Niederschlagsanomalie (Abbildung 50) von einem signifikanten Zyklus von 5,6 Jahren Dauer und möglicherweise auch von einem Zyklus von 3,6 Jahren Dauer beeinflusst wird. Die 3,6- und 5,6-Jahres-Zyklen

finden sich auch in den SOI- und PDO-Daten (Abbildungen 36 bzw. 37).

Der Niederschlag ist Teil des globalen Wasserkreislaufs und für das Leben auf der Erde unerlässlich. Darüber hinaus überträgt der Wasserkreislauf auch große Mengen an Energie und ist daher für die Meteorologie und das globale Klima von Bedeutung. Wenn Schnee, Eis oder Wasser von der Erdoberfläche verdunstet und als Wasserdampf in die Atmosphäre aufsteigt, nimmt es die Wärme der von der Sonne aufgeheizten Oberfläche mit und kühlt sie dadurch ab. Später, wenn der Wasserdampf zu Wolkentröpfchen und Niederschlag kondensiert, wird die Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Dieser Prozess macht einen wesentlichen Teil des Energiehaushalts und des Klimas der Erde aus.

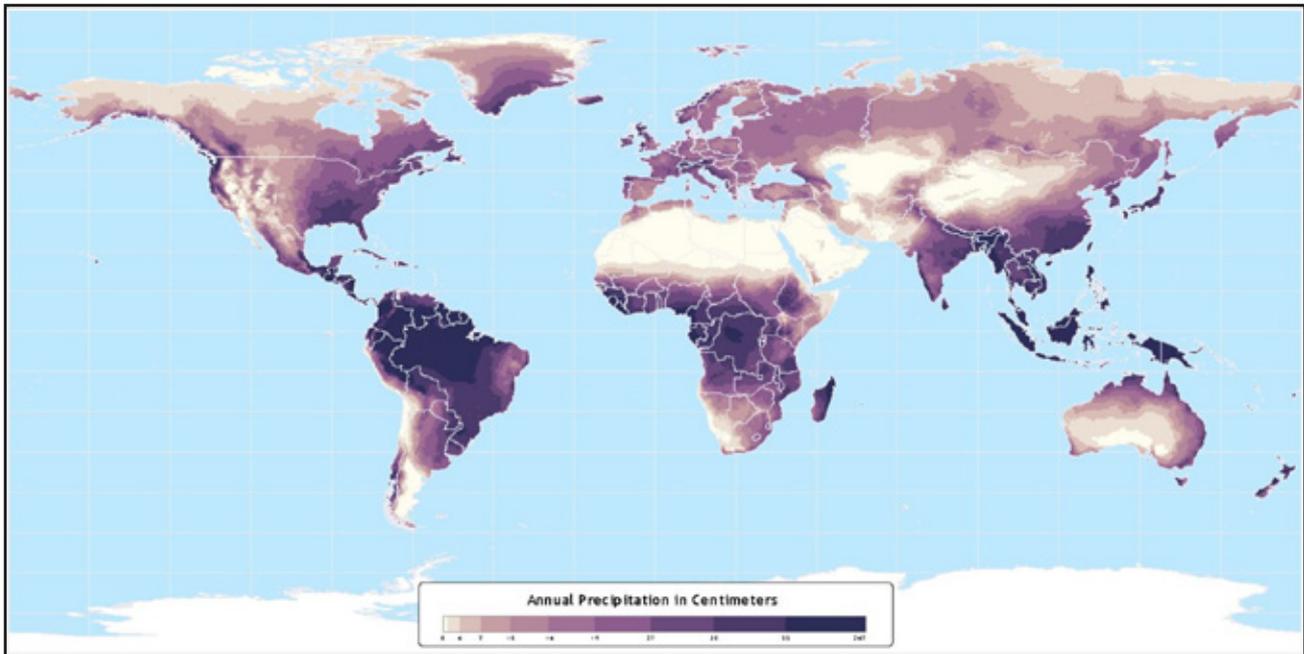


Abbildung 49: Jährlicher Niederschlag über Land, 1960–90.

Quelle: NASA/Atlas of the Biosphere. .

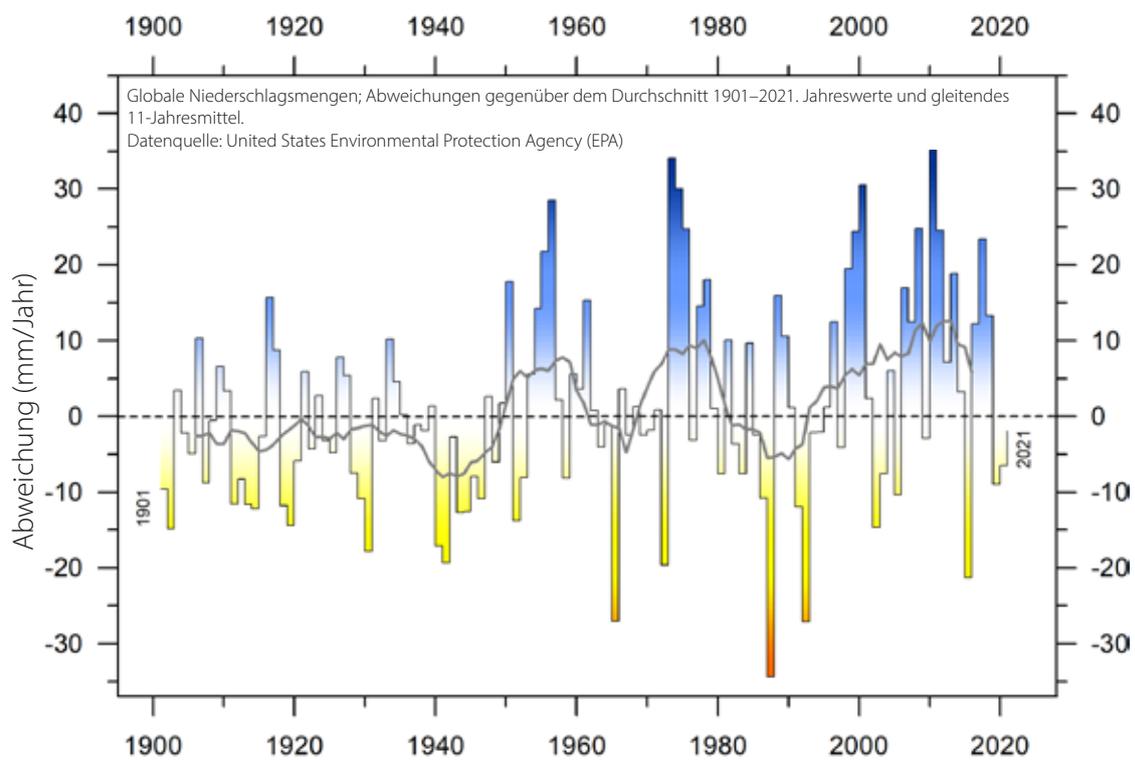


Abbildung 50: Globale Niederschlagsanomalien.

Variation der jährlichen Anomalien in Bezug auf den globalen Durchschnittsniederschlag von 1901 bis 2021 auf der Grundlage von Niederschlags- und Schneefallmessungen von landgestützten Wetterstationen weltweit. Datenquelle: United States Environmental Protection Agency (EPA).

10. Stürme und Wind

Akkumulierte Zyklonenergie von Tropenstürmen und Hurrikans

Die akkumulierte Wirbelsturmennergie (ACE) ist ein von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) verwendetes Maß, um die Aktivität einzelner tropischer Wirbelstürme und ganzer tropischer Wirbelsturmsaisons auszudrücken. ACE wird als das Quadrat der Windgeschwindigkeit alle sechs Stunden berechnet und dann mit einem Faktor von 10'000 skaliert, um die Anwendbarkeit zu gewährleisten. Er wird in Einheiten von 104 Knoten² ausgedrückt. Der ACE einer Saison ist die Summe der ACE für jeden Wirbelsturm und umfasst daher die Anzahl, Stärke und Dauer aller tropischen Stürme in der Saison. Die ACE-Daten und die laufende Dynamik der

Wirbelstürme werden in Maue (2011) ausführlich beschrieben.

Das Schadenspotenzial eines Hurrikans ist proportional zum Quadrat der maximalen Windgeschwindigkeit, und somit ist ACE nicht nur ein Maß für die Aktivität tropischer Wirbelstürme, sondern auch ein Maß für das Schadenspotenzial eines einzelnen Wirbelsturms oder einer Saison.

Die vorhandenen Aufzeichnungen (Abbildung 51) deuten nicht auf eine anormale Aktivität in den letzten Jahren hin. Die globalen ACE-Daten seit 1970 zeigen ein variables Muster im Zeitverlauf, aber keinen klaren Trend (Abbildung 51). Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) zeigt für

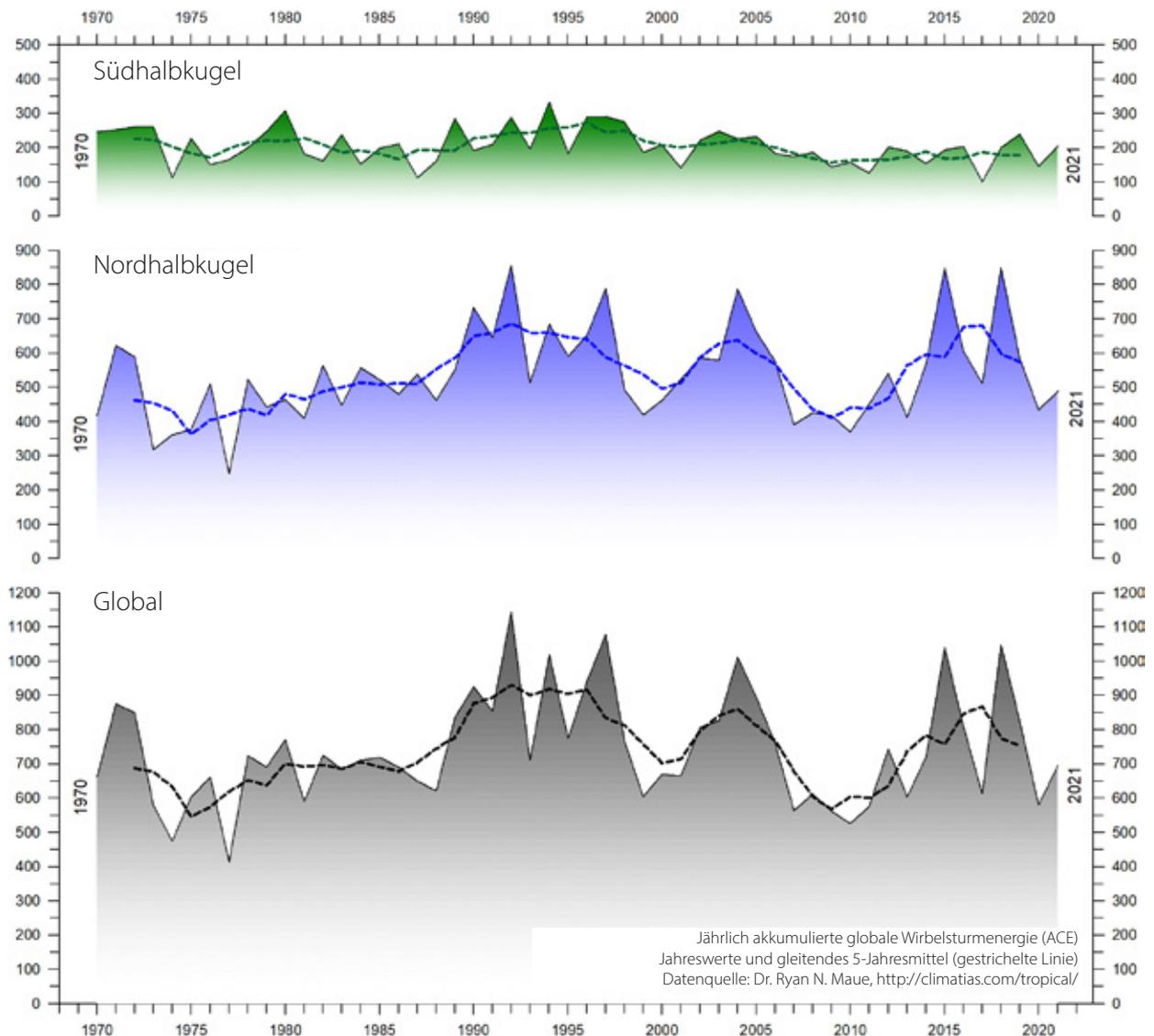


Abbildung 51: Jährliche globale akkumulierte Wirbelsturmennergie

Quelle: Ryan Maue.

die globalen Daten Oszillationen von etwa 11,5 und 3,6 Jahren Dauer und deutet auf eine längere Oszillation von etwa 33 Jahren Dauer hin, aber die Reihe ist zu kurz, um sichere Schlussfolgerungen zu ziehen.

Der Zeitraum 1989–1998 war durch hohe ACE-Werte gekennzeichnet. Weitere Spitzenwerte wurden in den Jahren 2004, 2015 und 2018 verzeichnet. Die Zeiträume 1973–1988, 1999–2003 und 2006–2014 waren durch eine vergleichsweise geringe Aktivität gekennzeichnet. Die Spitzenwerte in den Jahren 1997/98 und 2016 fallen mit starken El Niño-Ereignissen im Pazifischen Ozean zusammen (Abbildung 25). Die ACE-Werte der nördlichen Hemisphäre (mittlere Grafik in Abbildung 51) dominieren das globale Signal (untere Grafik), und daher ähneln die Höchst- und Tiefstwerte den globalen Daten, ohne dass es über die gesamte Dauer der Aufzeichnung einen klaren Trend gibt. Die Hauptzyklonsaison der nördlichen Hemisphäre ist Juni–November. Die ACE-Werte für die südliche Hemisphäre (obere Grafik in Abbildung 51) sind im Allgemeinen niedriger als für

die nördliche Hemisphäre, und die Hauptzyklonsaison ist Dezember–April.

Die ACE-Datenreihe des Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory reicht bis ins Jahr 1850 zurück. Eine (hier nicht gezeigte) Fourier-Analyse für das Atlantikbecken (Abbildung 52) zeigt, dass die ACE-Reihe von einem wichtigen Zyklus von 61,5 Jahren Dauer und möglicherweise auch von einem Zyklus von 5,6 Jahren Dauer beeinflusst wird. Die Hurrikansaison im Atlantikbecken ist oft überdurchschnittlich aktiv, wenn im Spätsommer (August–Oktober) La Niña-Bedingungen im Pazifik herrschen, wie es 2017 der Fall war (Johnstone und Curry, 2017). Die Datenreihe für das östliche Pazifikbecken ist kürzer, sie beginnt im Jahr 1971 (Abbildung 53) und wird von einem wichtigen Zyklus von 2,4 Jahren Dauer und möglicherweise auch von einem längeren Zyklus von etwa 28 Jahren beeinflusst. Ein ACE-Peak wurde offenbar in den Jahren 2015–18 erreicht, aber zukünftige Beobachtungen werden entscheiden, ob diese Vermutung zutrifft oder nicht.

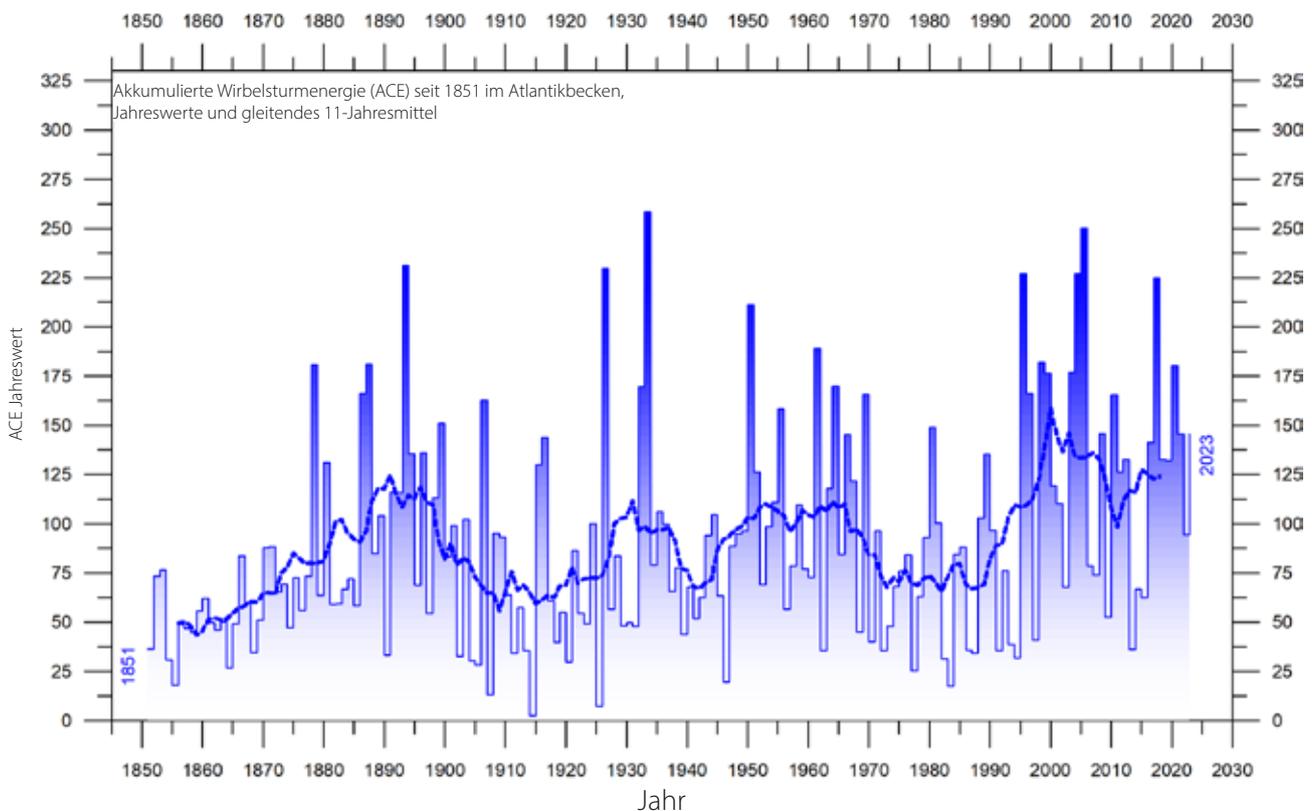


Abbildung 52: ACE im Atlantikbecken seit 1851

Die dünnen Linien zeigen die jährlichen ACE-Werte, und die dicke Linie zeigt das gleitende 7-Jahresmittel. Datenquelle: Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML), Hurricane Research Division. Bitte beachten Sie, dass diese Daten noch nicht über 2020 hinaus aktualisiert sind.

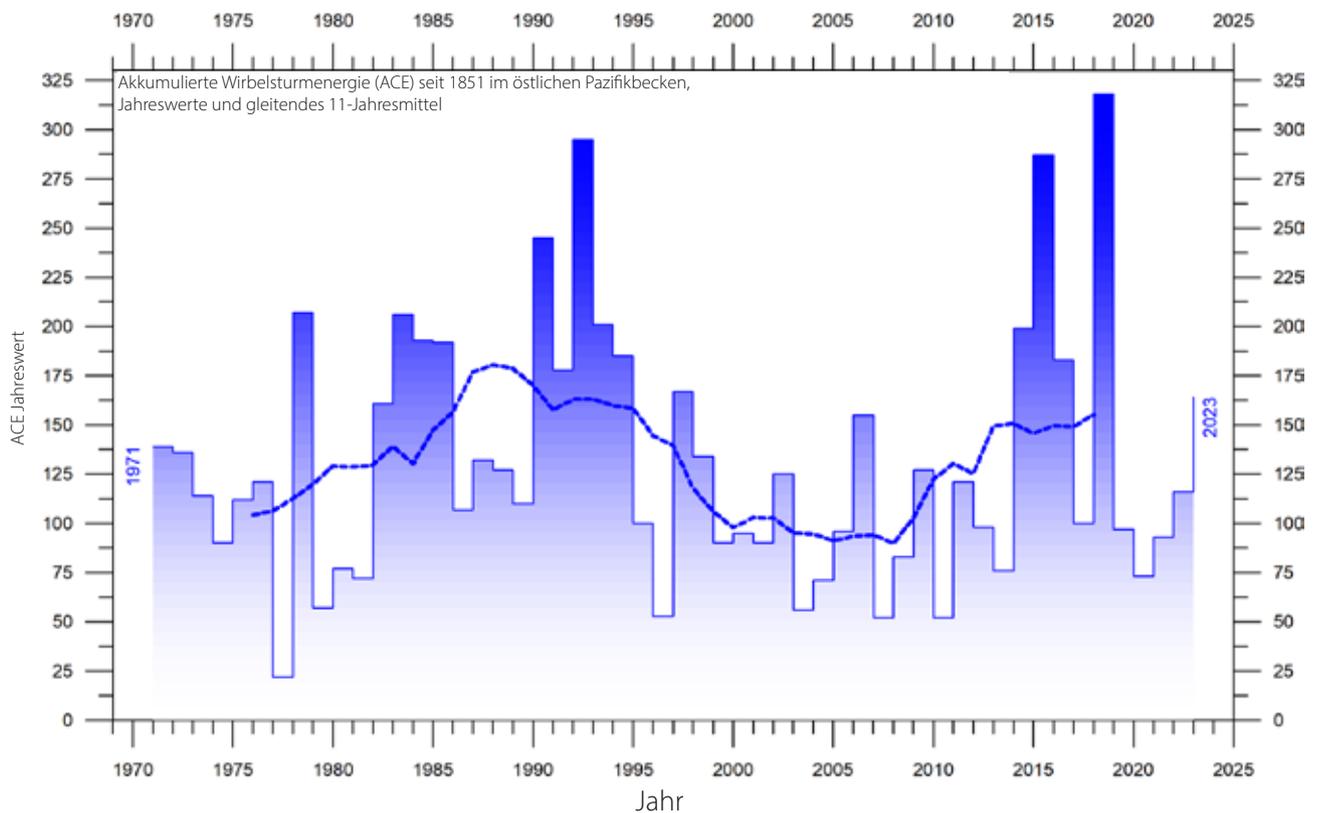


Abbildung 53: Pacific Basin ACE seit 1971.

Die dünnen Linien zeigen die jährlichen ACE-Werte, die dicke Linie zeigt das gleitende 7-Jahresmittel. Die ACE-Daten für das Pazifische Becken vor der Saison 1971 werden als nicht zuverlässig betrachtet und werden deshalb hier nicht gezeigt. Datenquelle: ACE Data.

11. Sonstige Sturm- und Windbeobachtungen

Die Zahl der Landungen von Hurrikanen auf dem amerikanischen Festland ist in Abbildung 54 dargestellt. Die Reihe zeigt beträchtliche Schwankungen von Jahr zu Jahr, aber es ist nicht möglich, einen klaren Trend über die Zeit zu erkennen. Eine Fourier-Analyse (hier nicht dargestellt) zeigt einen statistisch signifikanten Zeitraum von etwa 3,2 Jahren.

Einen Einblick in die Veränderungen der vorherrschenden Windverhältnisse geben die Beobachtungen, die von meteorologischen Küstenstationen an besonders windexponierten Orten durchgeführt werden. Ein Beispiel ist der Leuchtturm Lista im südlichsten Norwegen. Er steht auf

einem exponierten Kap am äußersten südwestlichen Rand des norwegischen Festlandes und ist daher gut geeignet, um die Windverhältnisse in der angrenzenden Nordsee und im europäischen Teil des Nordatlantiks zu erfassen. Es gibt monatliche Windaufzeichnungen, die bis zum Januar 1931 zurückreichen, wie in Abbildung 55 dargestellt. Daraus geht hervor, dass die höchsten Windstärken kurz nach dem Zweiten Weltkrieg aufgezeichnet wurden und seitdem etwas abgenommen haben, was in gewisser Weise die Aufzeichnung der Landungen von Hurrikanen in den USA (Abbildung 54) widerspiegelt, d. h. auf der gegenüberliegenden Seite des Nordatlantiks.

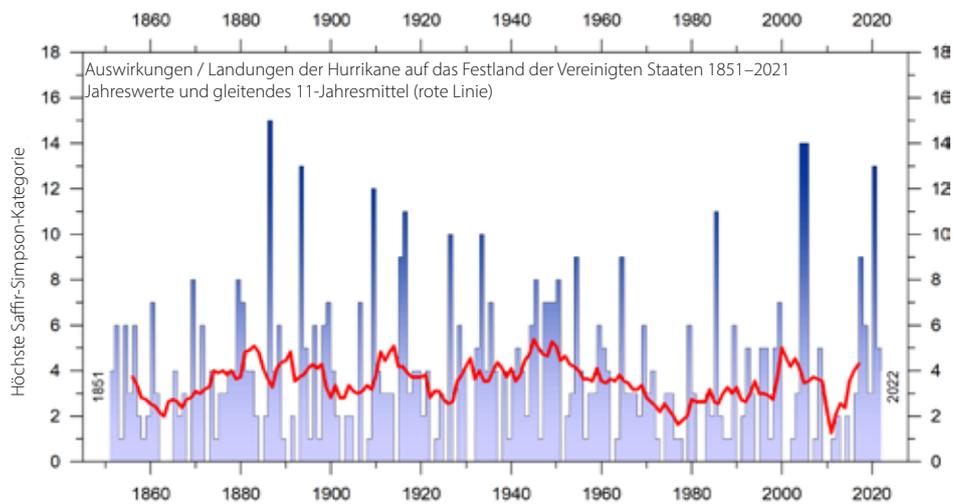


Abbildung 54: Landungen von Hurrikane in den kontinentalen Vereinigten Staaten 1851–2022

Die höchsten Werte auf der Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala in den Vereinigten Staaten basieren auf den geschätzten maximalen anhaltenden Oberflächenwinden, die an der Küste entstehen. Datenquelle: Hurricane Research Division, NOAA.

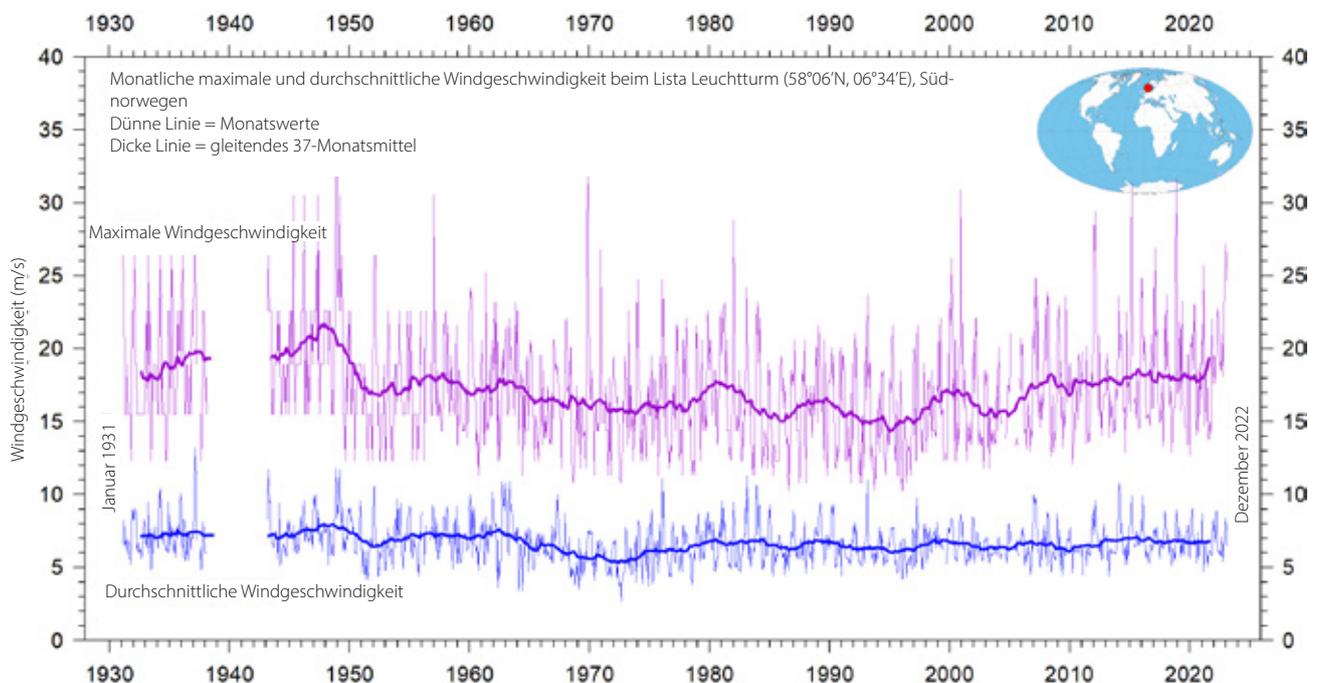


Abbildung 55: Monatliche maximale und durchschnittliche Windgeschwindigkeit seit Januar 1931, gemessen beim Lista Leuchtturm, Südnorwegen.

Der Leuchtturm Lista befindet sich auf einem exponierten Kap am äußersten südwestlichen Rand des norwegischen Festlands. Er ist in der Lage, die Windverhältnisse in der angrenzenden Nordsee und im europäischen Sektor des Nordatlantiks zu erfassen. Daten Quelle: SeKlima.

12. Zusammenfassung für 2023

Atmosphäre

Die Oberflächenlufttemperaturen bzw. ihre Abweichung vom für einen bestimmten Bezugszeitraum berechneten Durchschnitt stehen im Mittelpunkt vieler Klimadiskussionen. Die Bedeutung der in diesen Datensätzen erfassten kurzfristigen Erwärmung oder Abkühlung sollte jedoch nicht überbewertet werden. Erstens blendet die Konzentration auf Durchschnittswerte die Tatsache aus, dass alle Menschen täglich mit viel größeren Temperaturschwankungen konfrontiert sind. Zweitens findet immer dann, wenn die Erde warme El Niño- oder kalte La Niña-Episoden erlebt (Abbildung 25), ein großer Wärmeaustausch zwischen dem Pazifischen Ozean und der darüber liegenden Atmosphäre statt, der sich schließlich als Signal in der globalen Lufttemperatur niederschlägt. Dies spiegelt jedoch nicht ähnliche Veränderungen im Gesamtwärmegehalt des Systems Atmosphäre-Ozean wider. Tatsächlich sind die globalen Nettoveränderungen möglicherweise gering, und ein solcher Wärmeaustausch reflektiert möglicherweise hauptsächlich die Umverteilung von Energie zwischen Ozean und Atmosphäre. Die Bewertung der Dynamik der Ozeantemperaturen ist daher ebenso wichtig wie die Bewertung der Änderungen der Oberflächenlufttemperaturen. Im Vergleich zum gesamten Beobachtungszeitraum seit 1850/1880 war das Jahr 2023 sehr warm, und alle in diesem Bericht verwendeten Datenbanken weisen das Jahr 2023 als das wärmste Jahr in den Aufzeichnungen aus. Eine starke El Niño-Episode etablierte sich während des Jahres und betraf große Gebiete um den Äquator (Abbildungen 13 und 22), was die hohe jährliche globale Oberflächenlufttemperatur von 2023 erklärt. Dies unterstreicht die oben erwähnte bemerkenswerte Bedeutung des Austauschs zwischen Ozean und Atmosphäre.

Seit 1979 sind die Temperaturen in der unteren Troposphäre sowohl über dem Land als auch über den Ozeanen gestiegen, jedoch stärker über dem Land (Abbildung 12). Die einfachste Erklärung für diese Beobachtung ist, dass ein erheblicher Teil der beobachteten Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung verursacht wird, aber es kann mehrere zusätzliche Erklärungen geben, wie z. B. Unter-

schiede in der Wärmekapazität und Änderungen in der Wolkenbedeckung und Landnutzung.

In vielen Regionen der Arktis wurden 2016 rekordverdächtige Lufttemperaturen gemessen, doch seitdem sind die Bedingungen im Allgemeinen etwas kühler geworden (Abbildung 14). Dies änderte sich jedoch im Jahr 2023 erneut, was möglicherweise einen weiteren Temperaturgipfel markiert. Vermutlich wurden die arktischen Temperaturspitzen in den Jahren 2016 und 2023 durch Ozeanwärme beeinflusst, die während starker El Niños aus dem Pazifischen Ozean freigesetzt und anschließend zum Nordpol transportiert wurde. Dies zeigt, wie die arktischen Lufttemperaturen nicht nur durch Schwankungen der lokalen Bedingungen, sondern auch durch Schwankungen in entfernten Regionen beeinflusst werden können. Viele Diagramme in diesem Bericht konzentrieren sich auf die Zeit ab 1979, was den Beginn der Satellitenära und das Aufkommen einer breiten Palette von Beobachtungen mit nahezu globaler Abdeckung, einschließlich der Temperatur, widerspiegelt. Diese neuen Daten geben einen detaillierten Einblick in die Temperaturveränderungen im Laufe der Zeit in verschiedenen Höhen der Atmosphäre. Neben anderen Phänomenen zeigen diese Beobachtungen, dass seit 1995 ein stratosphärisches Temperaturplateau vorherrscht (Abbildung 16).

Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas in der Troposphäre. Die höchste Konzentration findet sich in einem Breitenbereich von 50°N bis 60°S. Die beiden Polarregionen der Troposphäre sind vergleichsweise trocken. Wasserdampf ist sowohl aufgrund seines Absorptionsspektrums als auch aufgrund seiner höheren Konzentration ein viel wichtigeres Treibhausgas als Kohlendioxid. Die spezifische Luftfeuchtigkeit ist seit 1948 bis zu einer Höhe von etwa 4–5 km stabil geblieben oder leicht angestiegen (Abbildung 17). In höheren Höhen der Troposphäre (ca. 9 km) ist die spezifische Luftfeuchtigkeit während der gesamten Dauer der Aufzeichnungen zurückgegangen, allerdings mit kürzeren Schwankungen, die den fallenden Trend überlagern.

Der Einfluss der Hunga Tonga-Hunga Ha'apai

Eruption vom Januar 2022 auf die atmosphärischen Temperaturen 2023 ist noch ungewiss. Diese Eruption setzte eine enorme Wasserdampf-fahne in der Stratosphäre frei, deren Einfluss auf die atmosphärischen Temperaturen jedoch nicht erkennbar ist (Abbildung 17).

Kohlendioxid ist ein wichtiges Treibhausgas, wenn auch weniger wichtig als Wasserdampf. Seit 1958 ist eine steigende Tendenz der atmosphärischen Konzentration zu beobachten, wobei ein

Jahreszyklus überlagert wird (Abbildung 18). Ende 2023 lag die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration bei fast 422 ppm. Die jährliche Konzentrationsänderung (Abbildung 19) hat sich von etwa +1 ppm/Jahr zu Beginn der Aufzeichnung auf etwa +2,5 ppm/Jahr gegen Ende der Aufzeichnung erhöht. Es gibt keine sichtbaren Auswirkungen der globalen COVID-19 Lockdowns 2020–2021 auf die atmosphärische Konzentration.

Ozeane

Das Argo-Programm hat nun 20 Jahre globaler Abdeckung erreicht und ist von einem relativ spärlichen Array von 1'000 Profilerungsschwimmern im Jahr 2004 auf mehr als 3'900 im Dezember 2023 angewachsen. Seit ihrer Einführung haben sie einen einzigartigen Datensatz für die Meerestemperatur in Tiefen bis zu 1'900 m geliefert. Die Daten werden derzeit bis Dezember 2021 aktualisiert. Obwohl die Ozeane viel tiefer als 1'900 m sind und der Datensatz noch relativ kurz ist, zeichnen sich jetzt interessante Merkmale ab (Abbildung 26).

Langwellige (infrarote) Strahlung dringt weniger als 100 Mikrometer in den Ozean ein (Hale und Querry, 1973), während kurzwellige Sonnenstrahlung viel weiter eindringt, nämlich bis zu 150–200 m. Unterhalb von 200 m gibt es kaum noch nennenswertes Licht. Die Erwärmung der Meeresoberfläche ist daher im Wesentlichen ein sonnengetriebener Prozess.

Seit 2004 haben die oberen 1'900 m der Ozeane eine Nettoerwärmung von etwa 0,037 °C erfahren. Die maximale Nettoerwärmung (etwa 0,2 °C) betrifft die obersten 100 m der Ozeane (Abbildung 28). Dies ist vor allem in Regionen in Äquaturnähe zu beobachten, wo die stärkste Sonneneinstrahlung zu verzeichnen ist. In größeren Tiefen ist zwischen 2004 und 2021 eine geringe Nettoerwärmung (etwa 0,025 °C) zu verzeichnen. Diese Entwicklung der globalen durchschnittlichen

Ozeantemperaturen spiegelt sich im Allgemeinen in den äquatorialen Ozeanen zwischen 30°N und 30°S wider, mit Ausnahme einer leichten Abkühlung in 300–500 m Tiefe. Ein Temperaturgipfel könnte um 2019–2020 überschritten worden sein (Abbildung 26). Aufgrund der kugelförmigen Gestalt des Planeten stellen die äquatorialen Ozeane eine riesige Fläche dar und haben dementsprechend einen erheblichen Einfluss auf die globalen Oberflächenlufttemperaturen.

Gleichzeitig haben die nördlichen Ozeane (55–65°N) im Durchschnitt eine deutliche Abkühlung bis zu einer Tiefe von 1'400 m und eine leichte Erwärmung darunter erfahren (Abbildung 29). Gegenwärtig ist in Teilen des Nordatlantiks möglicherweise eine Temperaturerholung im Gange (Abb. 33). Die südlichen Ozeane (55–65°S) haben seit 2004 im Durchschnitt eine gewisse Erwärmung in den meisten Tiefen erfahren, allerdings hauptsächlich in Oberflächennähe, oberhalb von 200 m Tiefe. Durchschnittswerte können jedoch irreführend sein, und oft erhält man einen besseren Einblick, wenn man die Details untersucht, wie bereits in diesem Bericht erwähnt.

Die Aufzeichnung der El Niño- und La Niña-Episoden seit 1950 wird durch einen bedeutenden 3,6-Jahres-Zyklus und möglicherweise auch durch einen 5,6-Jahres-Zyklus beeinflusst.

Meeresspiegel

Der Meeresspiegel wird durch Satellitenaltimetrie und durch direkte Messungen mit Hilfe von Gezeitenpegeln an den Küsten überwacht. Während die satellitengestützten Aufzeichnungen auf einen globalen Meeresspiegelanstieg von etwa

3,4 mm pro Jahr oder mehr hindeuten (Abbildung 39), deuten die Daten von Gezeitenpegeln in der ganzen Welt auf einen geringeren durchschnittlichen globalen Meeresspiegelanstieg von etwa 1–2 mm pro Jahr hin (Abbildung 41).

Die Messungen der Gezeitenpegel weisen nicht auf eine eindeutige Beschleunigung (oder Verlangsamung) in jüngster Zeit hin, sondern die Aufzeichnungen sind durch wiederkehrende Schwankungen gekennzeichnet. Für den deutlichen Unterschied (ein Verhältnis von etwa 1:2) zwischen den beiden Datensätzen gibt es noch keine allgemein akzeptierte Erklärung, aber es

Meereis

Im Jahr 2023 blieb die globale Meereisausdehnung deutlich unter dem Durchschnitt der Satellitenära (seit 1979), aber in den letzten Jahren gab es einen stabilen oder sogar steigenden globalen Trend (Abbildung 43). Ende 2016 erreichte die globale Meereisausdehnung ein deutliches Minimum, was zumindest teilweise auf das Wirken zweier unterschiedlicher natürlicher Variationsmuster zurückzuführen ist, die das Meereis auf der Nord- bzw. Südhalbkugel charakterisieren. Beide Variationen hatten 2016 gleichzeitig ein

Schneebedeckung

Schwankungen in der globalen Schneedeckenausdehnung werden hauptsächlich durch Veränderungen auf der Nordhalbkugel verursacht, wo sich alle größeren Landgebiete befinden. Die Ausdehnung der Schneedecke auf der Südhalbkugel wird im Wesentlichen durch die Größe des antarktischen Eisschildes bestimmt und ist daher relativ stabil. Die durchschnittliche Ausdehnung der Schneedecke auf der Nordhalbkugel ist seit Beginn der Satellitenbeobachtungen ebenfalls im Wesentlichen stabil (Abbildung 44), auch wenn

Globaler Niederschlag

Die jährlichen Niederschläge (Regen, Schnee) variieren von mehr als 3'000 mm/Jahr in feuchten Regionen bis zu fast nichts in Wüstenregionen (Abbildung 49). Der globale Durchschnittsniederschlag unterliegt jedoch von Jahr zu Jahr Schwankungen, und regionale jährliche Abweichungen von bis zu ± 30 mm/Jahr vom langfristigen globalen Durchschnitt sind nicht ungewöhnlich. Besonders hoch war der globale Niederschlag

Stürme und Hurrikane

Die jüngsten Daten über die akkumulierte Wirbelsturmenergie (ACE) von Tropenstürmen und Hurrikane liegen deutlich innerhalb des seit 1970

ist bekannt, dass Satellitenbeobachtungen des Meeresspiegels in küstennahen Gebieten kompliziert sind (siehe z. B. Vignudelli et al. 2019). So oder so werden für die lokale Küstenplanung die Gezeitenmessdaten bevorzugt, wie in diesem Bericht beschrieben.

Minimum, was sich auf die globale Meereisausdehnung auswirkte. Der deutliche Rückgang des Meereises in der Antarktis 2016 wurde auch durch ungewöhnliche Windbedingungen beeinflusst. Die entgegengesetzte Entwicklung hin zu einer stabilen oder höheren Eisausdehnung an beiden Polen könnte um 2018 begonnen haben und hat sich seither vor allem auf der Nordhemisphäre verstärkt.

es lokal und regional große zwischenjährliche Schwankungen geben kann. Betrachtet man die jahreszeitlichen Veränderungen seit 1979, so nimmt die Schneedecke der nördlichen Hemisphäre im Herbst leicht zu, die Ausdehnung im mittleren Winter ist im Wesentlichen stabil, und die Ausdehnung im Frühjahr ist leicht rückläufig (Abbildung 48). Im Jahr 2023 lag die saisonale Schneedeckenausdehnung auf der Nordhalbkugel in der Nähe des Durchschnitts von 1972–2022.

in den Jahren 1956, 1973 und 2010, besonders niedrig in den Jahren 1941, 1965, 1987 und 1992 (Abbildung 50). Die Fourier-Frequenzanalyse zeigt, dass die globale Niederschlagsanomalie von 3,6- und 5,6-jährigen Zyklen beeinflusst wird. Diese Periodizität ist auch bei der Südlichen Oszillation (SOI) bzw. der Pazifischen Dekadischen Oszillation (PDO) zu beobachten.

aufgezeichneten Bereichs. Die globalen ACE-Daten weisen im Laufe der Zeit ein variables Muster auf, jedoch ohne einen klaren Trend zu höheren oder

niedrigeren Werten (Abbildung 51). Eine Fourier-Analyse zeigt für die globalen Daten Oszillationen von etwa 11,5- und 3,6-jähriger Dauer und deutet auch auf eine längere Oszillation von etwa 33 Jahren Länge hin, aber die Datenreihe ist zu kurz, um eindeutige Schlussfolgerungen zu ziehen. Eine längere ACE-Reihe für das atlantische Becken (seit 1850) deutet auf einen natürlichen Rhythmus

von 61,5 Jahren Dauer hin, möglicherweise auch auf einen von 5,6 Jahren. Die modernen Daten über die Anzahl der Hurrikan-Landungen auf dem amerikanischen Festland liegen während des gesamten Beobachtungszeitraums seit 1851 innerhalb des normalen Bereichs (Abbildung 54).

Resümee

Das globale Klimasystem ist vielschichtig und umfasst Sonne, Planeten, Atmosphäre, Ozeane, Land, geologische Prozesse, biologisches Leben und komplexe Wechselwirkungen zwischen ihnen. Viele Komponenten und ihre wechselseitige Kopplung sind noch immer nicht vollständig verstanden oder vielleicht nicht einmal erkannt. Zu glauben, dass ein kleiner Bestandteil der Atmosphäre (CO_2) fast alle Aspekte des Klimas kontrolliert, ist naiv und völlig unrealistisch. Das

globale Klima ist seit Jahrtausenden innerhalb bestimmter Grenzen in einem quasistabilen Zustand geblieben, wenn auch mit erheblichen Schwankungen über Zeiträume von Jahren bis Jahrhunderten oder mehr, aber das globale Klima war nie in einem völlig stabilen Zustand ohne Veränderungen. Moderne Beobachtungen zeigen, dass dieses Verhalten auch heute noch anhält; es gibt keine Anzeichen für eine globale Klimakrise.

13. Schriftliche Referenzen

Carter R.M., de Lange W., Hansen, J.M., Humlum O., Idso C., Kear, D., Legates, D., Mörner, N.A., Ollier C., Singer F. & Soon W. 2014. Policy Brief, NIPCC, 24. September 2014, 44 pp. <http://climatechangereconsidered.org/wp-content/uploads/2014/09/NIPCC-Report-on-NSW-Coastal-SL-9z-corrected.pdf>.

Chylek, P., Folland, C. K., Lesins, G., and Dubey, M. K. 2010. Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and Antarctic surface air temperatures. , 37, L08703, doi:10.1029/2010GL042793.

Hale, G. M. and M. R. Querry, 1973. , Applied Optics, v. 12, no. 3, pp. 555-563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>.

Holgate, S.J. 2007. On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophys. Res. Letters*, 34, L01602, doi:10.1029/2006GL028492.

Humlum, O., Stordahl, K. and Solheim, J-E. 2012. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature. *Global and Planetary Change*, August 30, 2012. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818112001658?v=s5>.

Johnstone, J. and Curry, J. 2017. *Causes and Predictability of the Exceptionally Active 2017 Atlantic Hurricane Season*. Climate Forecast Applications Network (CFAN), 9 pages. <https://>

curryja.files.wordpress.com/2017/11/hurricane_review_2017-final.pdf.

Maue, R.L. 2011. Recent historically low global tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711.

Parker, A. and Ollier, C.D. 2016: Coastal planning should be based on proven sea level data. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 124, p.1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.005>.

Roemmich, D. and J. Gilson, 2009. The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography*, 52, 81-100.

Turner et.al. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophysical Research Letters*, Vol.44(13), p. 6868-6875. <https://doi.org/10.1002/2017GL073656>.

Vignudelli et al. 2019. Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. *Surveys in Geophysics*, Vol. 40, p. 1319–1349. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-019-09569-1>.

Voortman, H. 2023: Robust validation of trends and cycles in sea level and tidal amplitude. *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, 3, 32pp. <https://doi.org/10.59490/jchs.2023.0032>.

14. Links zu Datenquellen, abgerufen Januar-Februar 2024

ACE data: https://en.wikipedia.org/wiki/Accumulated_cyclone_energy.

AMO, Earth System Research Laboratory, NOAA, USA: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>.

Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Hurricane research Division: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>.

NASA, Atlas of the Biosphere: <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/precipitation-towers-modeling-weather-data/> Credit: Center for Sustainability and the Global Environment, University of Wisconsin - Madison; Climate Research Unit, University of East Anglia.

Continental United States Hurricane Impacts/Landfalls: https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html.

Colorado Center for Astro dynamics Research: <http://sealevel.colorado.edu/>.

Danish Meteorological Institute (DMI): <http://ocean.dmi.dk/arctic/icethickness/thk.uk.php>.

United States Environmental Protection Agency (EPA): <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-precipitation>.

Earth System Research Laboratory (ESRL): <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.shtml>.

SeKlima: <https://seklima.met.no/observations/>
GISS temperature data: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
Global Marine Argo Atlas: http://www.argo.ucsd.edu/Marine_Atlas.html.
Goddard Institute for Space Studies (GISS): <https://www.giss.nasa.gov/>.
HadCRUT temperature data: <http://hadobs.metoffice.com/>.
Hurricane Research Division, NOAA: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E23.html>.
Hurricane Research Division, Continental United States Hurricane Impacts/Landfalls: https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html.
Multisensor Analyzed Sea Ice Extent (MASIE): <https://nsidc.org/data/masie>.
National Ice Center (NIC). http://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_gif/DATA/cursnow.gif.
National Snow and Ice Data Center (NSIDC): http://nsidc.org/data/seaice_index/index.html.
NCDC temperature data: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/>.
Ocean temperatures from Argo floats: <http://www.argo.ucsd.edu/>.
Oceanic Niño Index (ONI): http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.
Outgoing long wave radiation (OLR): <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.shtml>.

PDO, NOAA Physical Sciences Laboratory: <https://psl.noaa.gov/pdo/>.
Permanent Service for Mean Sea Level: <http://www.psmsl.org/>.
Phys.org 2019: <https://phys.org/news/2019-01-antarctica-sea-ice-climate.html>.
Plymouth State Weather Center: <http://vortex.plymouth.edu/sfc/sst/>.
PSMSL Data Explorer: <http://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>.
Rutgers University Global Snow Laboratory: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/index.php>.
RSS temperature data: <http://www.remss.com/measurements/upper-air-temperature>.
Sea level from satellites: <https://sealevel.colorado.edu/data/2020rel1-global-mean-sea-level-seasonal-signals-retained>.
Sea level from tide-gauges: <http://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>.
Sea level modelled: IPCC AR6 Sea Level Projection Tool: https://sealevel.nasa.gov/data_tools/17.
Sea ice extent Danish Meteorological Institute (DMI): <http://ocean.dmi.dk/arctic/icethickness/thk.uk.php>.
Southern Oscillation Index (SOI): <http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/>.
Maue ACE data: climatlas.com/tropical/.
UAH temperature data: http://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tlt/uahncdc_lt_6.0.txt.

Review-Prozess

Die GWPF veröffentlicht Arbeiten in verschiedenen Formaten, die jeweils einem mehr oder weniger formalen Begutachtungsverfahren unterliegen. Dies hilft sicherzustellen, dass alle von der GWPF veröffentlichten Materialien einen angemessenen akademischen Standard aufweisen und dem Bildungszweck der GWPF dienen. Als Wohltätigkeitsorganisation erkennen wir an, dass Bildungsmaterial jedem Leser die Möglichkeit bieten sollte, ein Thema zu verstehen und verschiedene Perspektiven zu erforschen.

Unsere Flaggschiffe, die umfassenden GWPF-Reports, werden alle von unserem akademischen Beirat geprüft und auch vor der Veröffentlichung für eine offene Begutachtung zur Verfügung gestellt. Wir veröffentlichen alle substanziellen Kommentare zusammen mit dem Hauptbericht, sofern wir davon überzeugt sind, dass sie die Bildungserfahrung des Lesers verbessern werden. Auf diese Weise hoffen wir, eine offene und aktive Debatte über die wichtigen Bereiche, in denen wir arbeiten, zu fördern.

GWPF-Briefings und -Notizen sind kürzere Dokumente und werden je nach Bedarf intern und/oder extern überprüft.

Das erweiterte Begutachtungsverfahren für GWPF-Berichte soll den Inhalt und die Analyse über eine typische Begutachtung für eine akademische Zeitschrift hinausgehen lassen:

- Es können mehr potenzielle Gutachter einbezogen werden.
- Die Anzahl der inhaltlichen Kommentare übersteigt in der Regel die Anzahl der Peer-Reviews in einer Zeitschrift, und
- Die Identität des Autors ist den potenziellen Gutachtern bekannt.

Als eine Organisation, deren Veröffentlichungen manchmal Gegenstand heftiger oder unvorsichtiger Kritik sind, soll dieser Begutachtungsprozess die Bildungserfahrung für alle Leser verbessern, indem er es ermöglicht, Gesichtspunkte im Kontext zu betrachten und die Standards einzuhalten, die für eine informierte und informative Debatte erforderlich sind. Wir erwarten daher von allen Beteiligten, dass sie die Rezensionen mit der größtmöglichen Ernsthaftigkeit behandeln.

Die endgültige Verantwortung für die Veröffentlichung liegt beim Vorsitzenden des Kuratoriums und beim Direktor der GWPF. Die geäußerten Ansichten sind jedoch in jedem Fall die des Autors. Die GWPF hatte nie eine andere Position als die, die durch ihre Bildungsziele vorgegeben ist.

Über die Global Warming Policy Foundation

Die Menschen sind von Natur aus um die Umwelt besorgt und wünschen sich eine Politik, die das menschliche Wohlergehen fördert und die Umwelt schützt; eine Politik, die nicht schadet, sondern hilft.

Die Global Warming Policy Foundation (GWPF) hat es sich zur Aufgabe gemacht, eine Plattform für Bildungsforschung und informierte Debatten zu diesen wichtigen Themen zu bieten.

Um Fortschritte zu erzielen und effektive politische Einschätzungen voranzutreiben, ist es unerlässlich, eine Kultur der offenen Debatte, der Toleranz und des Lernens zu kultivieren.

Unser Ziel ist es, das Niveau des Lernens und des Verständnisses durch rigorose Forschung und Analyse zu erhöhen, um eine ausgewogene Debatte in der interessierten Öffentlichkeit und bei Entscheidungsträgern zu fördern.

Wir wollen eine Bildungsplattform schaffen, auf der eine gemeinsame Basis geschaffen werden kann, die dazu beiträgt, Polarisierung und Parteilichkeit zu überwinden. Wir wollen eine Kultur der Debatte, des Respekts und des Wissensdrangs fördern.

THE GLOBAL WARMING POLICY FOUNDATION

Founder: Lord Lawson of Blaby (1932–2023)

DIRECTOR

Dr Benny Peiser

BOARD OF TRUSTEES

Dr Jerome Booth (Chairman)
The Hon. Tony Abbott
Michael Cole
Lord Frost
Kathy Gyngell

Professor Michael Kelly FRS
Terence Mordaunt
Allison Pearson
Graham Stringer MP
Professor Fritz Vahrenholt

ACADEMIC ADVISORY COUNCIL

Professor Gautam Kalghatgi (Chairman)
Professor Michael Alder
Professor Anthony Barrett
Sir Ian Byatt
Dr John Carr
Dr John Constable
Professor Vincent Courtillot
Professor John Dewey
Professor Peter Dobson
Professor Christopher Essex
Professor Samuel Furfari
Christian Gerondeau
Professor Larry Gould
Professor William Happer
Professor Ole Humlum
Professor Terence Kealey

Bill Kininmonth
Brian Leyland
Professor Richard Lindzen
Professor Ross McKittrick
Professor Robert Mendelsohn
Professor Garth Paltridge
Professor Ian Plimer
Professor Gwythian Prins
Professor Paul Reiter
Professor Peter Ridd
Dr Matt Ridley
Sir Alan Rudge
Professor Nir Shaviv
Professor Henrik Svensmark
Dr David Whitehouse

RECENT GWPF REPORTS

24	Curry et al.	Assumptions, Policy Implications and the Scientific Method
25	Hughes	The Bottomless Pit: The Economics of CCS
26	Tsonis	The Little Boy: El Niño and Natural Climate Change
27	Darwall	The Anti-development Bank
28	Booker	Global Warming: A Case Study in Groupthink
29	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2017
30	Humlum	State of the Climate 2017
31	Darwall	The Climate Change Act at Ten
32	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2018
33	Svensmark	Force Majeure: The Sun's Role in Climate Change
34	Humlum	State of the Climate 2018
35	Peiser (ed)	The Impact of Wind Energy on Wildlife and the Environment
36	Montford	Green Killing Machines
37	Livermore	Burnt Offering: The Biomess of Biomass
38	Kelly	Decarbonising Housing: The Net Zero Fantasy
39	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2019
40	Darwall	The Climate Noose: Business, Net Zero and the IPCC's Anticapitalism
41	Goklany	The Lancet Countdown on Climate Change: The Need for Context
42	Humlum	The State of the Climate 2019
43	Alexander	Weather Extremes: Are They Caused by Global Warming?
44	Constable	Hydrogen: The Once and Future Fuel?
45	Kessides	The Decline and Fall of Eskom: A South African Tragedy
46	Goklany	Impacts of Climate Change: Perception and Reality
47	Constable	A Little Nudge with a Big Stick
48	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2020
49	Alexander	Weather Extremes in 2020
50	Humlum	The State of the Climate 2020
51	Humlum	The State of the Climate 2021
52	Constable	Europe's Green Experiment
53	Montford	Adaptation: The Rational Climate Policy
54	Alexander	Extreme Weather: The IPCC's Changing Tune
55	Ridd	Coral in a Warming World: Causes for Optimism
56	Humlum	The State of the Climate 2022
57	Porter	Prospects for Nuclear Energy in the UK
58	Lesser	Green Energy and Economic Fabulism
59	Kelly et al.	Improving Science Advice to Governments
60	Alexander	Weather Extremes in Historical Context
61	Humlum	The State of the Climate 2023

For further information about the Global Warming Policy Foundation, please visit our website at www.thegwpf.org.
The GWPF is a registered charity, number 1131448.

