

6.4 Erwärmung der Meere, Ausdehnung der Tropen und anhaltende Dürren

GERRIT LOHMANN, HU YANG & MONICA IONITA

Veränderungen in der Intensität und Häufigkeit von Extremen haben in den letzten Jahrzehnten viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen, vor allem aufgrund ihrer großen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt, die Wirtschaft und die menschliche Gesundheit. Der Beitrag stellt die Charakteristika der Erwärmung der Meere, die Ausdehnung der Tropen durch Strömungsverlagerungen, sowie anhaltende Dürren heraus. Mögliche Implikationen für die Umwelt werden diskutiert.

Ocean warming, expansion of the tropics and persistent droughts: *Changes in the intensity and frequency of extremes have attracted much attention in recent decades, primarily because of their large impacts on the natural environment, the economy, and human health. This paper highlights the characteristics of ocean warming, tropical expansion due to current shifts, and persistent droughts, and addresses also the implications for the environment.*

Calentamiento de los océanos, expansión de los trópicos y sequías persistentes: *Los cambios en la intensidad y frecuencia de los extremos han atraído mucha atención en las últimas décadas, en gran parte debido a sus grandes impactos en el medio ambiente natural, la economía y la salud humana. Este artículo destaca las características del calentamiento de los océanos, la expansión de los trópicos a través de corrientes cambiantes, así como las sequías persistentes. Se discuten las posibles implicaciones para el medio ambiente.*

Die Ozean- und Atmosphärenzirkulation in einem sich erwärmenden Klima

Die globale Erwärmung hat viele verschiedene Aspekte der Auswirkungen auf das Klima. Zu den bekanntesten Folgen gehören neben dem Temperaturanstieg, das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde und der Anstieg des Meeresspiegels sowie die mögliche Zunahme von Extremereignissen. Die Ozean- und Atmosphärenzirkulation verteilt die Wärme- und Wasserressourcen um und spielt daher eine wichtige Rolle bei der Gestaltung des regionalen Klimas. So wird das Zentrum der Tropen durch Konvektion und hohe Niederschlagsmengen dominiert, was dem heißen und feuchten Regionalklima entspricht. Im Gegensatz zum feuchten Klima der Zentraltropen ist das Klima in den Subtropen, wo die Absinkzonen der Hadley-Zirkulation liegen, jedoch heiß und trocken. Dort befinden sich die großen Wüsten (Abb. 6.4-1). In der Abbildung sind außerdem die großskaligen Wirbel der Ozeanzirkulation dargestellt. Über den westlichen Ozeanbecken fließen starke subtropische westliche Randströme (wie der Golfstrom und der Kuroshio-Strom) von niedrigeren Breiten in höhere Breiten. Sie transportieren große Wärmemengen und beeinflussen den Niederschlag auf das angrenzende Land. Daher ist das regionale Klima in der Nähe der westlichen Randströme mild und feucht, wie z.B. in Ostamerika, Japan und Ostasien. In den östlichen Ozeanbecken entsprechen die subtropischen östlichen Grenzströme, wie der Kalifornienstrom, der Perustrom, der Kanarenstrom und der Benguelastrom, die von höheren Breiten in Richtung Äquator fließen, einem relativ kalten und trockenen Klima über dem angrenzenden Festland. Die östlichen Randströme sind in der Regel mit Auftrieb verbunden, wodurch sich große marine Ökosysteme entwickeln.

Die heutige Bevölkerungsverteilung ist stark vom regionalen Klima geprägt (Abb. 6.4-1a), insbesondere von der Verteilung der Niederschläge und der damit verbundenen Vegetation und dem Ökosystem. Die menschliche Zivilisation konnte sich in einer Periode mit relativ stabilem und mildem Klima entwickeln. Regionen, in denen es genügend Wasser gibt und die eine milde Temperatur aufweisen, sind bevorzugt. Zum Beispiel bestimmt die Struktur der Zirkulation, dass das zentrale Afrika große Ökosysteme und menschliche Gemeinschaften tragen kann, während die Sahara-Wüste in der subtropischen Region weitgehend menschenleer ist. Auch aufgrund des Musters der Ozeanzirkulation ist die Bevölkerungsdichte sehr heterogen (Abb. 6.4-1a).

Als räumliche Struktur können eine verstärkte troposphärische Erwärmung und stratosphärische Abkühlung im Gürtel zwischen dem 15° und dem 45° Breitengrad identifiziert werden. Dieses wurde als erster Beweis für eine Ausdehnung des tropischen Gürtels interpretiert (Referenzen in YANG et al. 2020a). Tatsächlich verbreitert sich nicht nur der Tropengürtel, sondern Beobachtungen zeigen auch, dass sich die Westwinde, der Jet, die Sturmbahnen, die tropischen Wirbelstürme, die Wolkenmuster und die Niederschläge in Richtung höherer Breiten bewegen. Diese Veränderungen spiegeln eine allgemeine polwärts gerichtete Verschiebung der atmosphärischen Zirkulation wider (YANG et al. 2020b).

Diese Erkenntnisse bei der atmosphärischen Zirkulation werfen die Frage auf, wie sich die Ozeanzirkulation unter dem sich erwärmenden Klima verändert. Die Identifizierung solcher Veränderungen ist aufgrund der begrenzten Ozeanbeobachtungen sowohl auf zeitlicher

als auch räumlicher Skala eine Herausforderung. Traditionelle Ozeanbeobachtungen werden nur spärlich von Schiffen und Bojen gesammelt. Unter Verwendung von jahrhundertelangen Daten zur Rekonstruktion der Ozeantemperatur fand man heraus, dass die Erwärmung der Ozeanoberfläche über den subtropischen westlichen Grenzströmen zwei bis drei Mal schneller voranschreitet als der global gemittelte Trend. Durch die Kombination vielfältigster ozeanischer und atmosphärischer Daten als auch aus Klimasimulationen argumentierten YANG et al. (2016), dass die verstärkte Erwärmung eine Folge der Intensivierung und polwärts gerichteten Verschiebung des westlichen Randstroms sei. Eine Folgestudie (YANG et al. 2020a) zeigt außerdem, dass sich

alle acht großräumigen Ozeanwirbel (d.h. fünf subtropische Ozeanwirbel, zwei subpolare Ozeanwirbel und der Antarktische Zirkumpolarstrom, siehe auch *Abb. 6.4-1*) in höhere Breitengrade bewegen. Diese Verschiebung der großräumigen Ozeanzirkulation deutet darauf hin, dass sich die gesamte atmosphärische und ozeanische Zirkulation in Richtung höherer Breitengrade bewegt.

Auf der Südhalbkugel sind diese Veränderungen besonders deutlich zu sehen. Auf der Nordhalbkugel dagegen beeinflussen Faktoren wie die Lage der Kontinente und die Meeresentwicklung in der Arktis den Strömungsverlauf, sodass hier starke natürliche Schwankungen das Signal maskieren. Um herauszu-

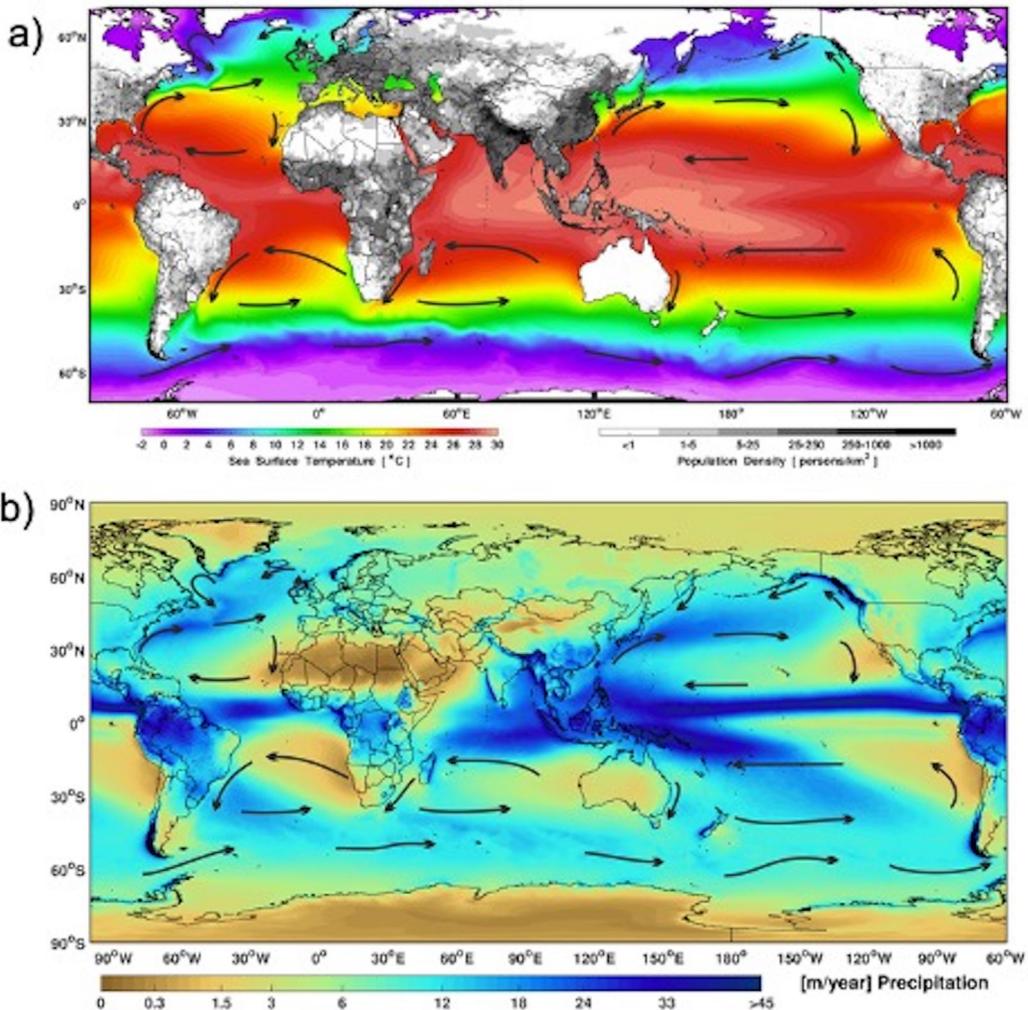


Abb. 6.4-1: a) Verteilung der Meeresoberflächentemperatur und Bevölkerungsdichte. b) Verteilung des klimatologischen Jahresniederschlags. Schwarze Pfeile veranschaulichen die wesentlichen Merkmale der Strömungen. Über den westlichen Ozeanbecken fällt aufgrund der westlichen Randströmungen mehr Niederschlag.

finden, welche Prozesse in welchem Ausmaß diese Verlagerung antreiben, kann die Entwicklung der Strömungssysteme mit einem Modell erfasst werden. Das von uns verwendete neuartige Ozeanmodell kann die Küstenprozesse und Anpassungsprozesse besonders gut abbilden (DANILOV et al. 2004; DANEK et al. 2019). Unabhängige Beobachtungen und Modelle zeigen, dass die Polverschiebung der großen Zirkulationsmuster sehr wahrscheinlich eine Folge der globalen Erwärmung ist (YANG et al. 2020a, b).

Man kann auch abschätzen, dass sich die großräumige Zirkulation mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von derzeit 800 Metern pro Jahr polwärts bewegt (YANG et al. 2020a). Auch die Aufzeichnungen der Ozeansedimente vom Meeresboden, die vergangene Klimawechsel aufzeigen können, belegen, dass während der letzten Eiszeit, die etwa 21.000 Jahre zurückliegt, Teile der Ozeanzirkulation (z.B. der Agulhasstrom) im Vergleich zu ihrer heutigen Position 800 Kilometer näher am Äquator gelegen hat. Paläoklimadaten aus dem Nordpazifik deuten außerdem darauf hin, dass sich der subpolare Wirbel des Nordpazifiks während der letzten Eiszeit um ca. 3° weiter nach Süden ausdehnte. Diese Veränderungen können auch in dem Klimamodell simuliert werden (LOHMANN et al. 2020). Des Weiteren zeigen Klimadaten, dass die subtropische Klimazone auch in vergangenen glazial-interglazialen Zyklen gewandert ist. Bisher gibt es jedoch keine Hinweise auf ausgeprägte glazial-interglaziale Variabilität im Ozon oder den Aerosolen, hingegen variierte die Konzentration von Treibhausgasen über glazial-interglaziale Zyklen erheblich. Allerdings zeigen atmosphärische Sensitivitätssimulationen, dass der direkte Strahlungseffekt von Treibhausgaskonzentrationen nur einen sehr begrenzten Beitrag zur Ausdehnung der Tropen leistet (GRISE & POLVANI 2014). Da der direkte anthropogene Antrieb die komplexe Entwicklung der tropischen Expansion nicht erklären kann, wird in der Literatur vorgeschlagen, dass die beobachteten Veränderungen möglicherweise durch die natürliche Klimavariabilität zu erklären seien. Tatsächlich haben Untersuchungen ergeben, dass die kalte Phase der Pazifischen Dekadischen Oszillation (PDO), die eine Erwärmung/Abkühlung über dem subtropischen/tropischen Pazifik aufweist, mit der beobachteten tropischen Ausdehnung in Zusammenhang steht. Es scheint jedoch so zu sein, dass die Verschiebung der atmosphärischen Zirkulation generell eng mit der Verschiebung des meridionalen Temperaturgradienten in den mittleren Breiten im Ozean zusammenhängt. Die Satellitenbeobachtung zeigt eine verstärkte subtropische Ozeanerwärmung über allen Ozeanbecken (Abb. 6.4-2a).

Diese subtropischen Erwärmungsmuster reduzieren/erhöhen den Temperaturgradienten über dem Äquator/den polaren Flanken der subtropischen Regionen und verschieben schließlich den ozeanischen Temperaturgradienten und treiben die Verschiebung der atmosphärischen Zirkulation an. YANG et al. (2020b) schlagen vor, dass die relativ schnellere Erwärmung über dem subtropischen Ozean, genau wie die Ansammlung der Plastikverschmutzung über dem subtropischen Ozean, auf die Hintergrundkonvergenz der subtropischen Oberflächenströmung zurückzuführen ist.

Auswirkungen

Wo das Meer mehr Wärme abgibt, steigt möglicherweise die Sturmwahrscheinlichkeit. Japan, China und Korea zum Beispiel werden in den kommenden Jahrzehnten vor allem im Winter mit steigenden Lufttemperaturen rechnen müssen, weil der Kuroshiostrom mehr Wärme transportieren und sich mit dem Wind Richtung Norden verlagern wird. Diese Wärme kann den Zustand der Atmosphäre dahingehend verändern, dass Stürme in dieser Region wahrscheinlicher werden. Die windgetriebenen Strömungen reagieren relativ schnell, während die Tiefenzirkulation im Ozean dazu neigt, etwas langsamer auf Umweltveränderungen wie z.B. niedrigere Salzgehalte zu reagieren. Somit werden die vollen Auswirkungen möglicherweise erst in Jahrzehnten oder Jahrhunderten zu spüren sein (ACKERMANN et al. 2020).

Die systematische polwärts gerichtete Verschiebung der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation hat weitreichende Auswirkungen, die sich auf die Atmosphäre, den Ozean, die Hydrosphäre und die Biosphäre auswirken. In den letzten zehn Jahren wurden häufig schwere Dürren und Waldbrände in der Mittelmeerregion (HOERLING et al. 2012), in Amerika (vor allem in Kalifornien) und Australien gemeldet. Nach Angaben des *California Department of Forestry and Fire Protection* ereigneten sich 17 der 20 größten Waldbrände seit 1932 in den letzten zwei Jahrzehnten in Kalifornien. Die verheerenden Waldbrände 2019-2020 in Australien verbrannten mehr als 10 Millionen Hektar Land und töteten über eine Milliarde Tiere. Diese Regionen befinden sich alle an den Rändern des tropischen Gürtels – den Frontlinien der sich verschiebenden subtropischen Trockenzonen. Klimamodellprojektionen zeigen, dass sich unter der globalen Erwärmung das wüstenähnliche Klima der Sahara nach Norden verschieben könnte, was zu einem trockenen Klima in der Mittelmeerregion führt (Abb. 6.4-2b).

Die Verschiebung der atmosphärischen Zirkulation würde das Niederschlagsmuster und die damit verbundene Vegetation und das Ökosystem neu strukturieren, wahrscheinlich inklusive der Verteilung der menschlichen Bevölkerung. In den vergangenen Jahrzehnten wurde außerdem beobachtet, dass viele wildlebende Arten in höhere Breitengrade wandern (CHEN et al. 2011; HICKLING et al. 2006). Unter anderem wurde nordwärts gerichtete Ausbreitung der Zeckenzephalitis in Europa und Nordamerika registriert (GRAY et al. 2009).

Vorgeschmack von Änderungen: Beispiel Artenvielfalt

Verschiebungen der Ozeanzirkulation haben starke Auswirkungen auf das marine Ökosystem, insbesondere an den Rändern der subtropischen und subpolaren Wirbel. Die nordwärts gerichtete Verschiebung des Golfstroms führte zu einer schnellen Erwärmung des Ozeans über dem Golf von Maine, was u.a. den Zusammenbruch der lokalen Kabeljauindustrie beeinflusste (PERSHING et al. 2015). Ähnliches wurde auch

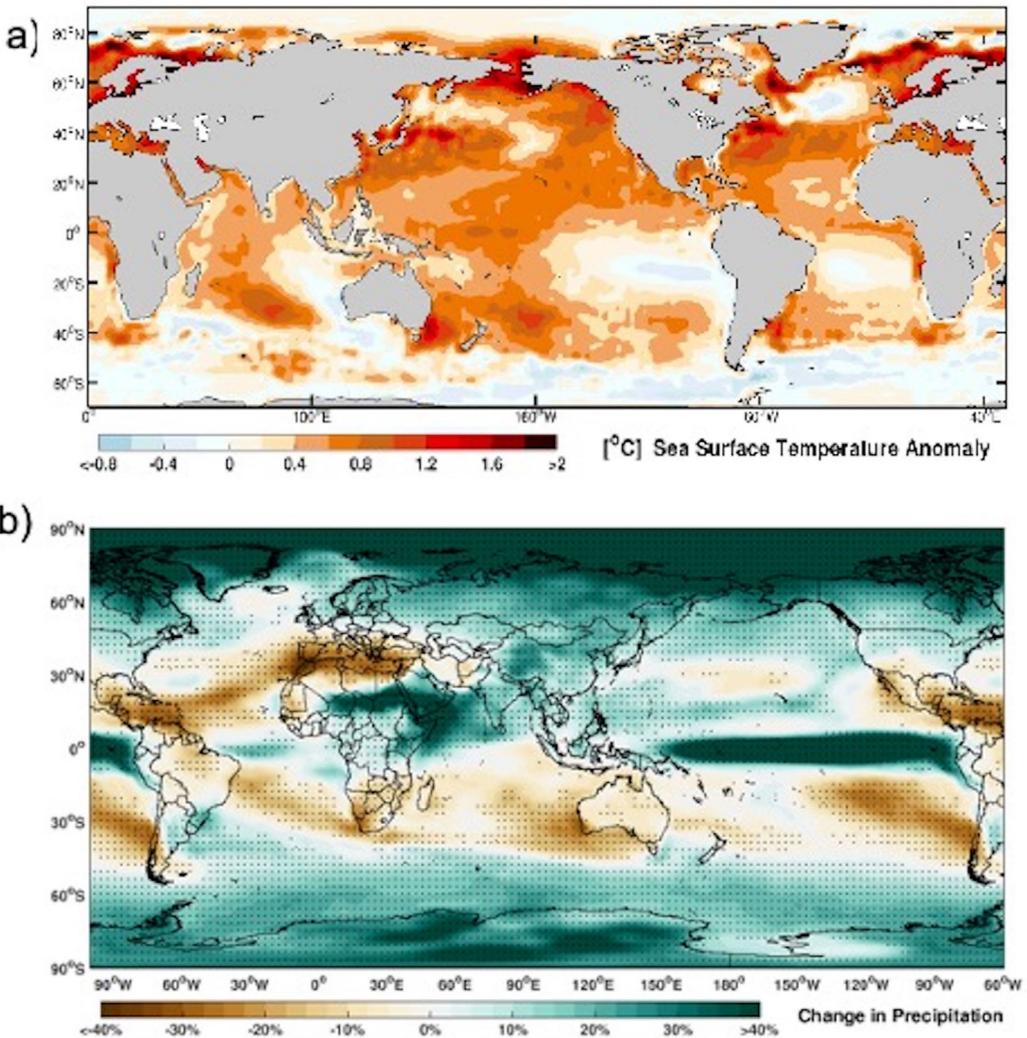


Abb. 6.4-2: a) Beobachtete Anomalie der Meeresoberflächentemperatur während der letzten fünf Jahre der Satellitenperiode (2016-2020) im Vergleich zu den ersten fünf Jahren (1982-1986). Eine relativ stärkere Erwärmung der Meeresoberfläche ist über allen subtropischen Ozeanen festzustellen, was auf die Ekman-Konvergenz der Oberflächenströmungen im Hintergrund zurückzuführen ist. Das Ergebnis basiert auf dem NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2-Datensatz. b) Niederschlagsänderung projiziert durch das RCP8.5-Szenario bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Die Ergebnisse basieren auf dem Multi-Modell-Ensemble des CMIP5. Die Punktierung zeigt die Region an, in der 75% der Modelle mit dem Vorzeichen der Änderung übereinstimmen.

über die Küste von Uruguay und Argentinien berichtet, bedingt durch die Verschiebung des Brasilstroms.

Dabei sind die jetzigen Veränderungen nur ein Vorgeschmack von Veränderungen, die in der Zukunft erwartet werden, z.B. der regionale Anstieg des Meeresspiegels, Temperaturveränderungen im Ozean, der Rückgang der Fischereiproduktivität, die Verschiebung der Sturmbahnen und der Meerestarten. Das Wachstum des Atlantischen Kabeljaus ist z.B. stark von regionalen Wassertemperaturen abhängig, eine zukünftige Erwärmung wird in einigen Regionen einen negativen Einfluss auf das Wachstum dieser Kabeljaubestände haben (SOKOLOVA et al. 2021). Die Anfälligkeit von Arten gegenüber dem Klimawandel hängt von den temperaturempfindlichsten Lebensstadien ab (DAHLKE et al. 2020). Für große Tiergruppen wie Fische sind die Engpässe im Lebenszyklus für laichende Adulte und Embryonen durchweg mit engeren Toleranzbereichen verknüpft und damit am stärksten von der Klimaerwärmung betroffen. In den nächsten 100 Jahren sind möglicherweise sehr viele Arten betroffen, die ihre Temperaturtoleranzgrenze für die Fortpflanzung überschreiten (DAHLKE et al. 2020; VILLENEUVE et al. 2021). Daran kann man erkennen, dass Verschiebungen der Strömungen und Temperaturen weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt und damit auch auf die Gesellschaft haben können.

Langanhaltende Trockenheiten

Wie sich die Situation entlang der Küsten, wo sehr viele Menschen leben, langfristig entwickeln wird, bleibt allerdings fraglich. Einige Regionen wie Kalifornien leiden schon seit Jahren unter heftigen Dürren, die durch sehr trockene Sommerhalbjahre gekennzeichnet sind. Doch der Klimawandel bedeutet nicht, dass es überall trockener wird. Mancherorts kann es feuchter oder kälter werden, allerdings scheint es auf regionaler Skala einen Trend zu extremeren Bedingungen zu geben (BÜNTGEN et al. 2021). Eine veränderte Position des Polarjets, der in den letzten Jahren immer wieder ins Stocken kam, könne zu anhaltenden extremen Wetterlagen führen. Der Jet wird in erster Linie durch den Temperaturunterschied zwischen der polaren und der mittleren Breitenregion angetrieben, und die Abschwächung des zonalen mittleren Jets ist im Allgemeinen auf die Verringerung des thermischen Gradienten zwischen Äquator und Pol zurückzuführen, welche mit sich ändernden Oberflächenbedingungen einhergeht. Europäische Hitzewellen und Perioden mit Niederschlagsdefiziten wurden oft mit anomalen Zirkulationsmustern in Verbindung gebracht, die durch eine Abschwächung des zonalen Jets und anhaltende blockierende Wetterlagen über Eurasien in mittleren Breiten gekennzeichnet sind (IONITA et al. 2017; 2020).

Um diese extremen Jahre einordnen zu können, kommt hier zentral die Paläoklimaforschung ins Spiel, bei der man möglichst lange und umfassende indirekte Daten über das Klima gewinnen kann. IONITA et al. (2021) haben eine Vielzahl von Datensätzen verwendet: Baumringe, dokumentarische Belege, Paläoreanalysen, historische Aufzeichnungen von Temperatur und Niederschlag sowie Wasserständen von Flüssen, während sich die bisherigen Studien in der Regel auf selektive Quellen beziehen. Die umfassenden Datensätze zeigen, dass vergangene Megadürren in Mitteleuropa länger, heftiger und weniger warm als heutige Dürreperioden waren (Abb. 6.4-3). Extreme Dürrephasen hat es z.B. in den Jahren 1400-1480, 1770-1840 sowie 1971-1976 gegeben (Abb. 6.4-4).

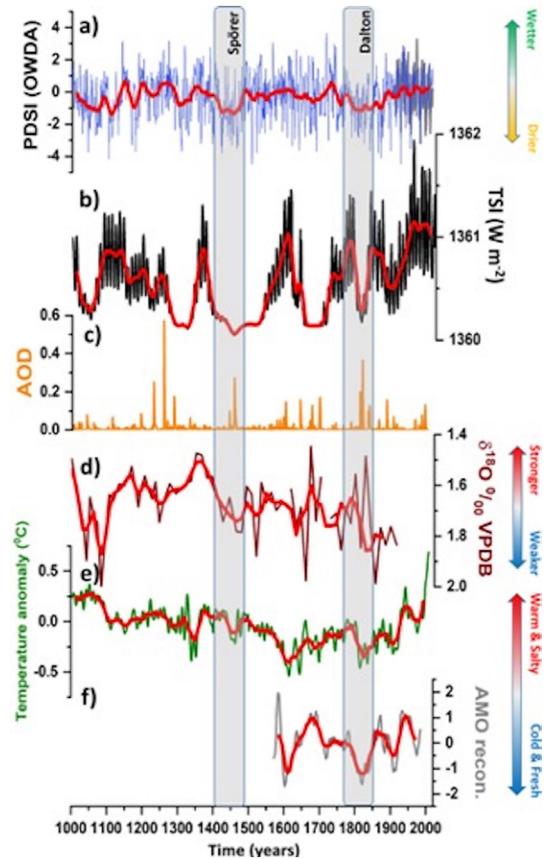


Abb. 6.4-3: (a) Regionaler Trockenheitsindex für Mitteleuropa (3°E-20°E, 45°N-56°N, schwarze Linie) für den Zeitraum 1000-2012 und der instrumentelle Juni bis August (durchgezogene rote Linie) für 1901-2018; (b) Zeitreihe der jährlichen Gesamtsonneneinstrahlung; (c) Aerosol optische Dichte (AOD); (d) δ¹⁸O (Messungen von planktonischen Foraminiferen als Proxy für Veränderungen in der Oberflächenhydrographie der östlichen Labradorsee; (e) Rekonstruierter Atlantischer Multidekadischer Oszillationsindex (AMO) und (f) wie in (e), jedoch basierend auf Baumringen. Siehe IONITA et al. (2021) für die Details.

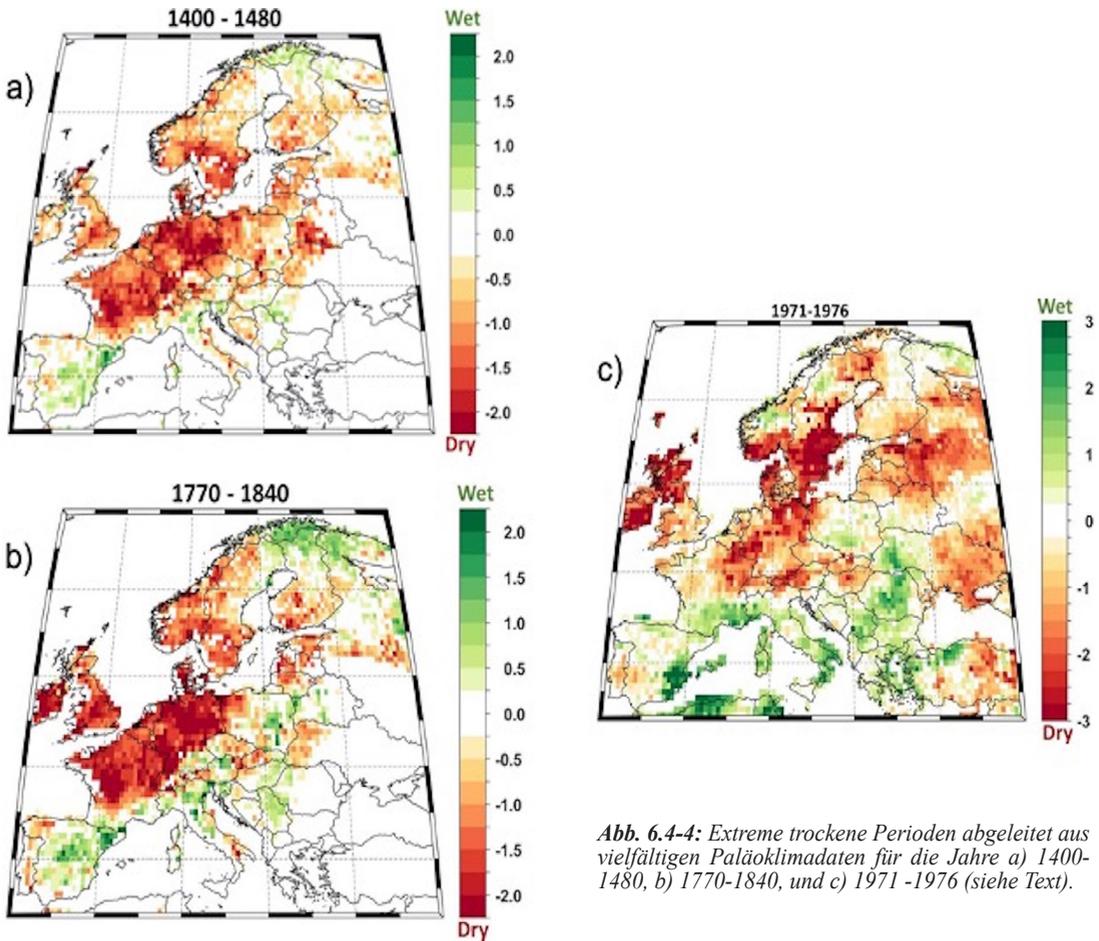


Abb. 6.4-4: Extreme trockene Perioden abgeleitet aus vielfältigen Paläoklimadaten für die Jahre a) 1400-1480, b) 1770-1840, und c) 1971-1976 (siehe Text).

Neben steigenden Temperaturen sind die Sonneneinstrahlung sowie bestimmte Wetterlagen und Strömungsverhältnisse im Nordatlantik wichtig, da sie die regionalen Muster der Oberflächentemperaturen mitbestimmen (IONITA et al. 2021). Dekaden andauernde Megadürren, wie sie im vergangenen Jahrtausend aufgetreten sind, wären eine enorme Herausforderung für die Umwelt. Die Paläo-Perspektive hilft uns dabei, die heutigen Dürren in eine langfristige Perspektive zu setzen. Zum Beispiel zeigen wir, dass die jüngsten Dürren in Mitteleuropa (2003, 2015 und 2018) innerhalb der historischen Variabilität liegen und im letzten Jahrtausend nicht beispieslos sind. Zukünftige Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass Europa mit einer erheblichen Austrocknung konfrontiert sein wird, selbst für die am wenigsten aggressiven Pfadszenarien (HARI et al. 2020). In der Zukunft wird eine Kombination aus Modellstudien, Beobachtungen und Paläoklimadaten ein umfassendes Bild für die Antriebsfaktoren von Trockenheiten geben.

Ausblick

Eine Reihe von extremen Wetterereignissen in den letzten 20 Jahren hat zu einer anhaltenden Diskussion über die Beziehung zwischen anthropogenem Klimawandel und der Anhäufung der Wetterextreme geführt. Zukünftige Arbeiten werden Beobachtungen und Klimamodelle im Zusammenspiel mit Paläoumweltdaten verwenden, um die Ursachen und Beiträge zu den Klimaextremen des 20. Jahrhunderts und der Vergangenheit zu verstehen. Die Ausdehnung der Tropen, die Verstärkung der westlichen Randströme in den Ozeanen und der veränderte Land-Meer-Kontrast sind wesentliche Treiber für künftige Veränderungen. Ein umfassender Ansatz unter Einbeziehung von Umweltdaten bietet eine einzigartige Gelegenheit, die relativ kurzen instrumentelle Aufzeichnung in einen langfristigen Kontext zu bringen (LOHMANN et al. 2020), um die Rolle interner Variabilität, äußerer Antriebe und Rückkopplungsmechanismen für die Variabilität und Extremereignisse zu bewerten.

Literatur

- ACKERMANN, L., C. DANEK, P. GIERZ & G. LOHMANN (2020): AMOC Recovery in a Multicentennial Scenario Using a Coupled Atmosphere-Ocean-Ice Sheet Model. *Geophysical Research Letters*, 47 (16), e2019GL086810. <https://doi.org/10.1029/2019GL086810>.
- BÜNTGEN, U., O. URBAN, P. J. KRUSIC, M. RYBNÍČEK et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, 14, 190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>.
- CHEN, I.-C., J. K. HILL, R. OHLEMÜLLER, D. B. ROY & C. D. THOMAS (2011): Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024–1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>.
- DAHLKE, F. T., S. WOHLRAB, M. BUTZIN & H.-O. PÖRTNER (2020): Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. *Science*, 369, 65–70. <https://doi.org/10.1126/science.aaz3658>.
- DANEK, C., P. SCHOLZ & G. LOHMANN (2019): Effects of high resolution and spinup time on modeled North Atlantic circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 49 (5), 1159–1181. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0141.1>.
- DANILOV, S., G. KIVMAN & J. SCHROETER (2004): A finite-element ocean model: principles and evaluation. *Ocean Modelling*, 6, 125–150. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00063-X).
- GRISE, K. M. & L. M. POLVANI (2014): The response of midlatitude jets to increased CO₂: Distinguishing the roles of sea surface temperature and direct radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 41 (19), 6863–6871. <https://doi.org/10.1002/2014GL061637>.
- GRAY, J. S., H. DAUTEL, A. ESTRADA-PEÑA, O. KAHL & E. LINDGREN (2009): Effects of climate change on ticks and tick-borne diseases in Europe.- *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, 2009, 593232. <https://doi.org/10.1155/2009/593232>.
- HARI, V., O. RAKOVEC, Y. MARKONIS, M. HANEL & R. KUMAR (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, 10, 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>.
- HICKLING, R., D. B. ROY, J. K. HILL, R. FOX & C. D. THOMAS (2006): The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards.- *Global Change Biology*, 12 (3), 450–455. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x>.
- HOERLING, M., J. EISCHEID, J. PERLWITZ, X. QUAN et al. (2012): On the Increased Frequency of Mediterranean Drought. *Journal of Climate*, 25 (6), 2146–2161. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1>.
- IONITA, M., L. M. TALLASKEN, D. G. KINGSTON, J. H. STAGGE et al. (2017): The European 2015 drought from a climatological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1397–1419. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1397-2017>.
- IONITA, M., V. NAGAVCIUC, R. KUMAR & O. RAKOVEC (2020): On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. *npj Climate and Atmospheric Sciences*, 3, 49. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00153-8>.
- IONITA, M., M. DIMA, V. NAGAVCIUC, P. SCHOLZ & G. LOHMANN (2021): Past megadroughts in central Europe were longer, more severe and less warm than modern droughts. *Communications Earth & Environment*, 2, 61. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00130-w>.
- LOHMANN, G., M. BUTZIN, N. EISSNER, X. SHI & C. STEPANEK (2020): Abrupt climate and weather changes across timescales. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35 (9), e2019PA003782. <https://doi.org/10.1029/2019PA003782>.
- PERSHING, A. J., M. A. ALEXANDER, C. M. HERNANDEZ, L. A. KERR et al. (2015): Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery. *Science*, 350, 809–812. <https://doi.org/10.1126/science.aac9819>.
- SOKOLOVA, N., M. BUTZIN, F. DAHLKE, K. M. WERNER et al. (2021): Exploring the role of temperature in observed inter-population differences of Atlantic cod (*Gadus morhua*) growth with a 4-dimensional modelling approach. *ICES Journal of Marine Science*, fsab043. <https://doi.org/10.1093/ices-jms/fsab043>.
- VILLENEUVE, A. R., L. M. KOMOROSKE & B. S. CHENG (2021): Diminished warming tolerance and plasticity in low-latitude populations of a marine gastropod.- *Conservation Physiology*, 9 (1), coab039. <https://doi.org/10.1093/conphys/coab039>.
- YANG, H., G. LOHMANN, W. WEI, M. DIMA et al. (2016): Intensification and Poleward Shift of Subtropical Western Boundary Currents in a warming climate. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 121, 4928–4945. <https://doi.org/10.1002/2015JC011513>.
- YANG, H., G. LOHMANN, U. KREBS-KANZOW, M. IONITA et al. (2020a): Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 47. <https://doi.org/10.1029/2019GL085868>.
- YANG, H., G. LOHMANN, X. SHI, E. J. GOWAN, J. LU & Q. WANG (2020b): Tropical expansion driven by poleward advancing subtropical fronts. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 125 (16), e2020JD033158. <https://doi.org/10.1029/2020JD033158>.

Kontakt

Prof. Dr. Gerrit Lohmann

Dr. Hu Yang

Dr. Monica Ionita

*Dynamik des Paläoklimas**Alfred-Wegener-Institute, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung - Bremerhaven*

Gerrit.Lohmann@awi.de

LOHMANN, G., H. YANG & M. IONITA (2021): *Erwärmung der Meere, Ausdehnung der Tropen und anhaltende Dürren*. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 278–284. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.39