Stellungnahme

zur Drucksache 21/19200 der Hamburgischen Bürgerschaft:
Erste Fortschreibung des Hamburger Klimaplans und Gesetz zur Änderung der Verfassung, zum Neuerlass des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes sowie zur Anpassung weiterer Vorschriften (Senatsantrag)

durch

Dr. habil. Sebastian Lüning
luening@ifhgk.org, Geowissenschaftler, IPCC-Gutachter
Lissabon

Zusammenfassung

Klimamodellierer warnen ausdrücklich davor, die neuesten Simulationsergebnisse als politische Entscheidungsgrundlage zu verwenden. Nach Berücksichtigung neuer Erkenntnisse der Schwefeldioxid-Aerosolforschung suggerieren Modelle viel zu hohe Erwärmungsraten. Angesichts zu erwartender hoher Investitionssummen und massiver Eingriffe in die Hamburgische Wirtschaft und Gesellschaft sollten die drastischen Klimaprognosen erneut einer unabhängigen Überprüfung unterzogen werden, um den Gefährdungsgrad realistischer einschätzen zu können. Die aus Computersimulationen stammenden Klimaprognosen für Norddeutschand und Europa können erst dann als politische Planungsgrundlage herangezogen werden, wenn sie erfolgreich mit den vorindustriellen Klimaschwankungen der zwei Jahrtausende kalibriert wurden.

Insbesondere sollten die Modelle zunächst die natürlichen vorindustriellen europäischen Wärmephasen des Mittelalters und der Römerzeit reproduzieren können, bevor sie für robuste Zukunftsprognosen einsatzbereit werden. Eine Rückwärtsmodellierung beginnend am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 greift zu kurz, da das Intervall keine rein natürlichen Wärmephasen enthält. Behörden, Politiker und Forscher müssen die enorme natürliche Klimavariabilität der vorindustriellen Zeit aktiv kommunizieren. Ein fortgesetztes Verschweigen (wie im Hamburger Klimabericht 2018) setzt sie dem Vorwurf mangelnder Transparenz aus. Die Klimageschichte beginnt nicht erst am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850. Auch die Klimadiskussion kann aus der Geschichte lernen, muß klimahistorische Fakten anerkennen und einbeziehen. Die in Drucksache 21/19200 in Kapitel 3.3.1. angeführt Klimakommunikation sollte dies als wichtigen Tätigkeitsbereich aufgreifen.

Bei der Erstellung von Klimaprognosen sollten in der Vergangenheit gut belegte empirische Zusammenhänge mit einbezogen werden, etwa die systematischen Einflüsse der atlantischen Ozeanzyklen der AMO und NAO. Bei der Diskussion von Extremwetterdaten sollte es verpflichtend sein, die moderne Entwicklung stets im Kontext der Klimageschichte der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende einzuordnen. Nur so kann festgestellt werden, ob ein Prozess bereits die natürliche Schwankungsbreite verlassen hat. Zu kurz gewählte Kontextintervalle stellen eine nicht statthafte ´Rosinenpickerei‘ dar und besitzen keine Aussagekraft für zukünftige Entwicklungen.

Politische Maßnahmen sollten angesichts der großen Unsicherheiten im Bereich der Klimasimulationen dem Prinzip der Verhältnismäßigkeit folgen. Alarmismus ist hier fehl am Platz, stattdessen sollten alle gesellschaftlichen Herausforderungen gleichberechtigt behandelt werden und einer nüchternen Betrachtung von Aufwand und Nutzen genügen. Angesichts der großen gesellschaftspolitischen Bedeutung darf es keinen wissenschaftsfreien Raum für subjektiv eingefärbte Spekulationen geben. Klimapolitik erfordert Augenmaß. Politische Entscheider sollten auf der Basis von Tatsachen entscheiden können und sich nicht von dramatischen Katastrophenszenarien bedrängen lassen - Katastrophenszenarien, die sich bei sachlicher Überprüfung als stark überzogen bzw. rein spekulativ darstellen. Abgeleitete Maßnahmen sollten nicht nur ökologisch nachhaltig sein, sondern auch einer sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit genügen.

Einleitung

Im Zuge der globalen Industrialisierung und Nutzung fossiler Brennstoffe ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre mittlerweile auf den höchsten Stand seit 800.000 Jahren gestiegen. Gleichzeitig hat sich die Temperatur der Erde in den letzten 150 Jahren um knapp ein Grad erhöht (Land und Meere). In der Metropolregion Hamburg betrug die Erwärmung 1,4°C (von Storch et al., 2018). Der genaue quantitative Anteil menschengemachter und natürlicher Klimafaktoren an dieser Erwärmung bleibt jedoch noch immer unklar und ist an die nur ungenau bekannte Klimawirkung des CO_2, die sogenannte CO_2-Klimasensitivität gekoppelt. Pro CO_2-Verdopplung kann die Erwärmung laut IPCC 1,5°C betragen, aber auch bis zu 4,5°C, also dem Dreifachen. Dies entspricht einer sehr großen Unsicherheitsspanne.

Drucksache 21/19200 gibt unter Bezug auf den 1,5-Grad-Sonderbericht des IPCC (IPCC, 2018) vor, dass der menschengemachte Anteil an der Erwärmung bereits final geklärt sei. In Kapitel 1.1 der Drucksache heißt es (Seite 6):

> *„Weltweit ist die Durchschnittstemperatur bereits um etwa 1°C angestiegen. Der Temperaturanstieg beruht nahezu vollständig auf den von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen.“*

Allerdings ist die Aussage aus dem IPCC-Spezialbericht umstritten. Ein nahezu zeitgleich veröffentlichter Klimabericht der Schweiz räumt den natürlichen Klimafaktoren deutlich mehr Raum ein. Natürliche Faktoren könnten bis zur Hälfte der im Land beobachteten Erwärmung der letzten 100 Jahre verursacht haben, heißt es dort (CH2018, 2018). Auf die Frage, wie die anthropogenen und natürlichen Anteile an der globalen Erwärmung in industrieller Zeit verteilt waren, gab der bekannte Kieler Klimaforscher Prof. Mojib Latif 2012 in einem Zeitungsinterview an: „*Es ist ein Mix aus beidem. Klar ist, dass der Mensch über die Hälfte des Temperaturanstiegs seit Beginn der Industrialisierung zu verantworten hat*“ (Neue Osnabrücker Zeitung, 2012). Das Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPIM) erklärte auf seiner Webseite (MPIM, 2019: Zugriff 5.11.2019, mittlerweile gelöscht):

> *[Computersimulationen] „zeigen, dass in den letzten 100 Jahren durch den Anstieg in der Sonnenintensität ein Teil der beobachteten Erwärmung erklärt werden kann, allerdings mit etwa 0.2 Grad Celsius nur ungefähr ein Drittel.“*

Um den natürlichen Anteil am aktuellen Klimawandel besser verstehen zu können, ist eine Beschäftigung mit der vorindustriellen Klimageschichte zwingend notwendig. Erst wenn die natürliche Klimadynamik der letzten Jahrtausende korrekt aufgezeichnet und die entsprechenden Antriebe verstanden worden sind, kann das heutige Gesamtklimasystem bestehend aus natürlichen und anthropogenen Antrieben vollständig begreifbar und quantitativ abschätzbar werden.

Neben den IPCC-Berichten bildet der Hamburger Klimabericht (von Storch et al., 2018) eine wichtige Grundlage der Hamburger Klimapolitik. Jedoch spart der Bericht den sehr wichtigen Bereich der vorindustriellen, natürlichen Klimavariabilität Norddeutschlands bzw. Deutschlands aus unerfindlichen Gründen vollständig aus, was den Bericht stark entwertet. In Kapitel 2.3 „Bisherige klimatische Entwicklung in der Region“ wird lediglich die industrielle Klimaentwicklung der letzten 140 Jahre diskutiert. Dies muss als überaus bedenklich angesehen werden, ist doch in den Klimawissenschaften allgemein anerkannt, dass eine Differenzierung zwischen natürlichen und menschengemachten Klimaveränderungen nur über den Kontext der vorindustriellen Klimageschichte erfolgen kann.

Die Hamburger Klimapolitik stützt sich auf eine in der Wissenschaft noch nicht zu Ende diskutierte Annahme, dass die Klimaerwärmung ausschließlich auf vom Menschen verursachtes CO_2 zurückzuführen sei, wobei möglicherweise bis zu 50% anderer relevanter Einflussfaktoren unberücksichtigt bleiben.

Das vorgelegte Maßnahmenprogramm basiert auf klimatischen Szenarien bis 2100, die auf Basis von Klimamodellierungen erstellt wurden. Auf Seite 6 der Drucksache 21/19200 heißt es:

> *Je nach Treibhausgasausstoß kann sich die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur in Hamburg bis Ende des Jahrhunderts um etwa 1 bis 5°C erhöhen.*

Auch diese Aussage ist unvollständig. Die zukünftige Temperaturentwicklung ist nicht nur vom Treibhausgasausstoß abhängig, sondern auch von der noch schlecht bekannten CO_2-Klimasensitivität bzw. dem natürlichen Anteil an der bisher beobachteten Erwärmung. Die Verlässlichkeit der verwendeten Modelle ist allerdings zweifelhaft, da sie nicht an der vorindustriellen Klimaentwicklung Norddeutschlands der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende geeicht wurden. Die Modellierungsergebnisse sollten daher so lange als vorläufig und ungenau behandelt werden, bis eine Kalibrierung an paläoklimatologischen Daten der Region bzw. hilfsweise Mitteleuropas erfolgreich abgeschlossen werden kann. Bis dahin sollten sich Maßnahmen vor allem auf „no regret“ Bereiche konzentrieren, also jene Sektoren, die auch ohne dramatische Klimaszenarien von den Maßnahmen profitieren würden.

Klimwandel in Norddeutschland

Im Folgenden werden einige Fakten und Zusammenhänge erläutert, die politische Entscheider bei ihren Planungen berücksichtigen sollten. Etliche dieser Informationen fanden leider - aus welchen Gründen auch immer - keinen Eingang in den Hamburger Klimabericht (von Storch et al., 2018).

Temperaturentwicklung

Letzte 140 Jahre

Die Jahresdurchschnittstemperatur in der Metropolregion Hamburg hat sich in den letzten 140 Jahren um 1,4°C erhöht, wie korrekt in der Drucksache 21/19200 wiedergegeben wird. Allerdings zeigen die einzelnen Monate des Jahres recht unterschiedliche Trends, wie im Hamburger Klimabericht lediglich angedeutet wird. So haben sich die ersten drei Monate des Jahres (Januar, Februar, März) in Hamburg, Bremen und Niedersachsen in den letzten 30 Jahren überhaupt nicht weiter erwärmt. Ganz im Gegenteil, für das erste Jahresdrittel ist sogar eine leichte Abkühlung festzustellen (**Abb. 1**).

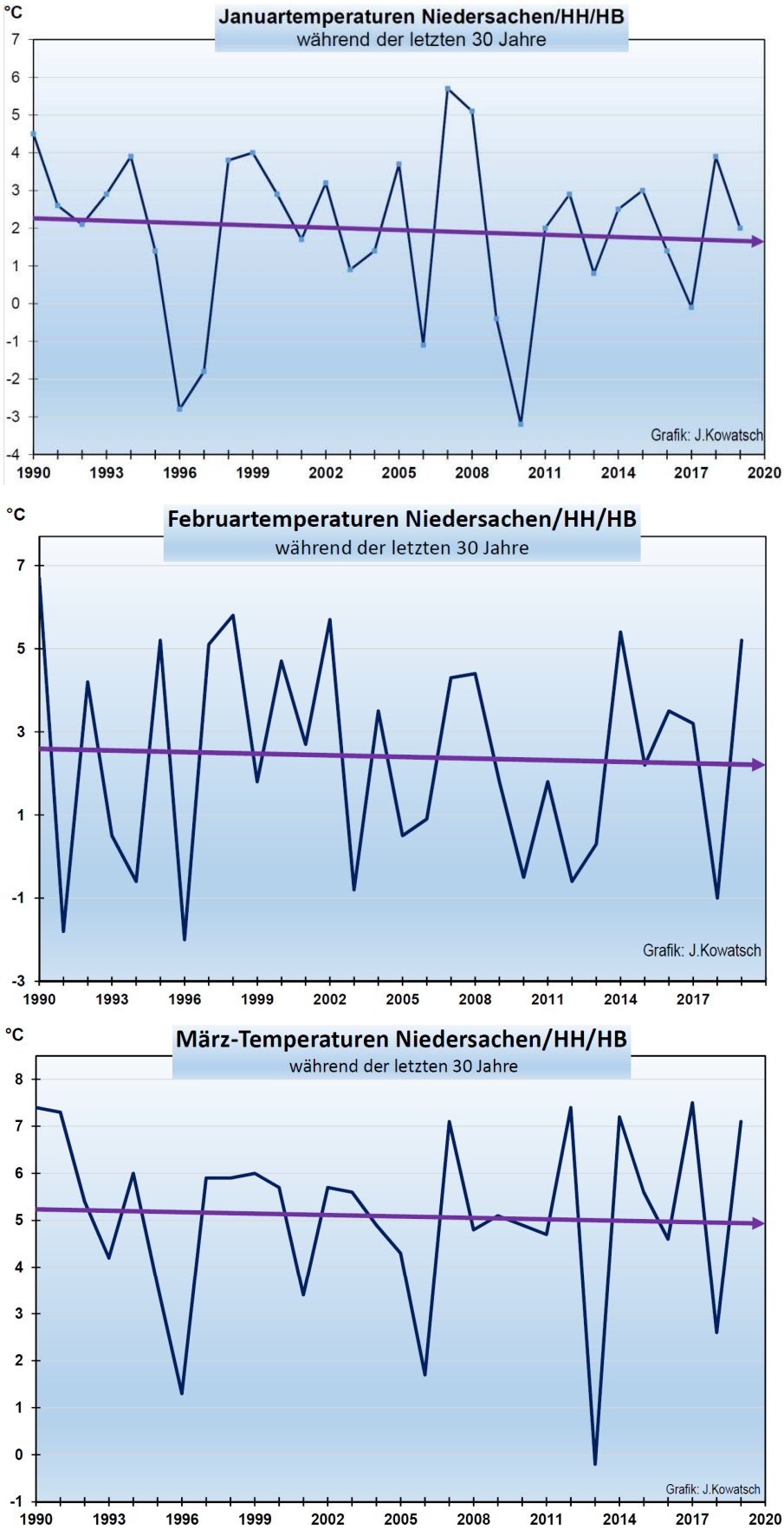

Abbildung 1: *Temperaturentwicklung Hamburg, Bremen, Niedersachsen im Januar, Februar und März während der letzten 30 Jahre. Daten: Deutscher Wetterdienst. Graphik: J. Kowatsch.*

Die Abkühlung der ersten drei Monate des Jahres während der letzten drei Jahrzehnte spiegelt sich auch in einer zunehmenden Verspätung des Blühtermins einer unter Klimaforschern bekannten Forsythie auf der Hamburger Lombardsbrücke wider (Abb. 2).

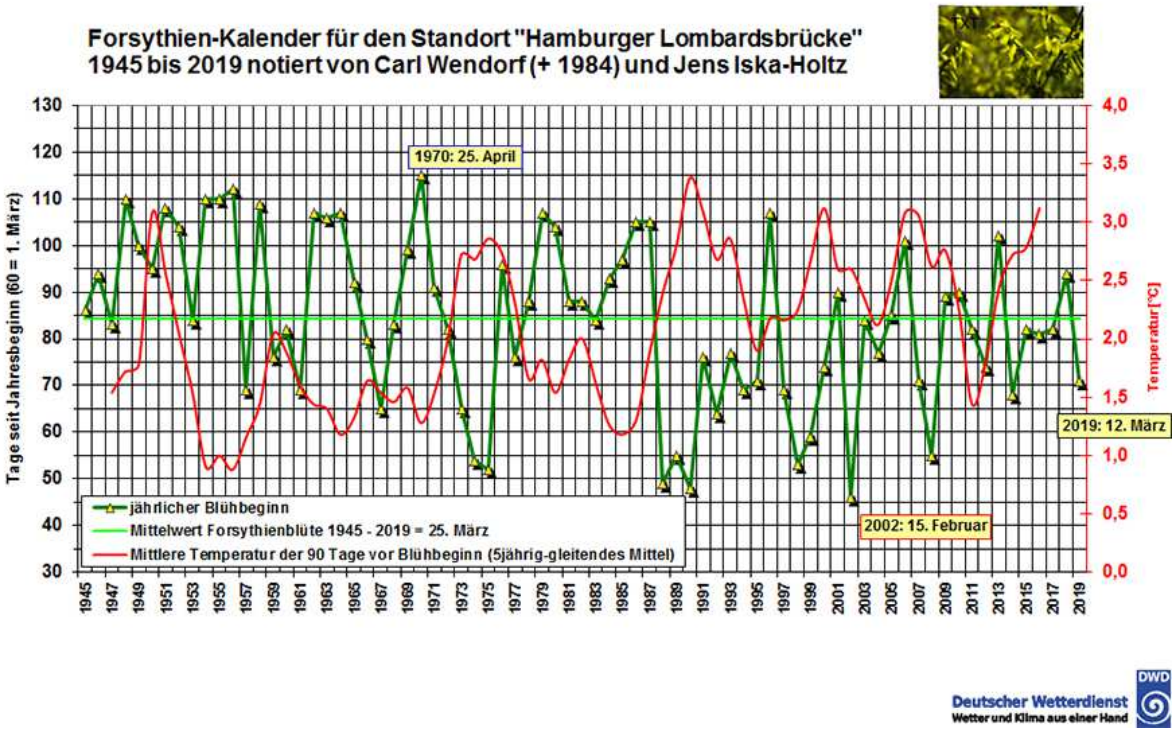

Abb. 2: *Blühbeginn der Forsythie auf der Hamburger Lombardsbrücke. Die grüne Kurve zeigt den Blühtermin an, gemessen in Tagen nach Jahresbeginn. Abbildungsquelle: DWD.*

Auffällig sind die hohen Sommertemperaturen in Hamburg, Bremen, Niedersachsen in den letzten 30 Jahren im Vergleich zu den vorangegangenen Jahrzehnten (Abb. 3). Diese gehen zum Teil wohl auf die positive Phase der Atlantischen Multidekadenoszillation (AMO) zurück, einem Ozeanzyklus der im Takt von 60-70 Jahre oszilliert. Der Hamburger Klimabericht lässt diesen wichtigen Taktgeber der natürlichen Klimavariabilität leider unerwähnt. Lediglich in zwei Kapiteln über Fischbestände (Kapitel 5.2.3, 7.3.2.2) wird er kurz angeführt. Dies ist bedauerlich, da mittlerweile gut dokumentiert ist, dass die AMO einen wichtigen Einfluss auf die Sommertemperaturen in Mitteleuropa ausübt (z.B. Knight et al., 2006; O'Reilly et al., 2017).

Fakt ist, dass sich Hamburg, Bremen, Niedersachsen zwischen 1950-1990 fast ein halbes Jahrhundert lang nicht erwärmt hat. Diese Periode fiel in eine Phase als die AMO ihren positiven Scheitelpunkt erreichte und dann in die negative Phase eintauchte (Abb. 4). Die seit 1980 in Norddeutschland registrierte starke Erwärmung ereignete sich zur Zeit der ansteigenden Flanke der AMO. Mittlerweile ist die AMO jedoch wieder auf einem neuerlichen Scheitelpunkt angelangt, so dass die AMO in den kommenden Jahrzehnten eher wieder bremsend auf die Erwärmung wirken wird, wie bereits in der Vergangenheit. Gemäß dem Zyklus werden die Hamburger Sommer in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten daher wohl eher wieder etwas kühler werden.

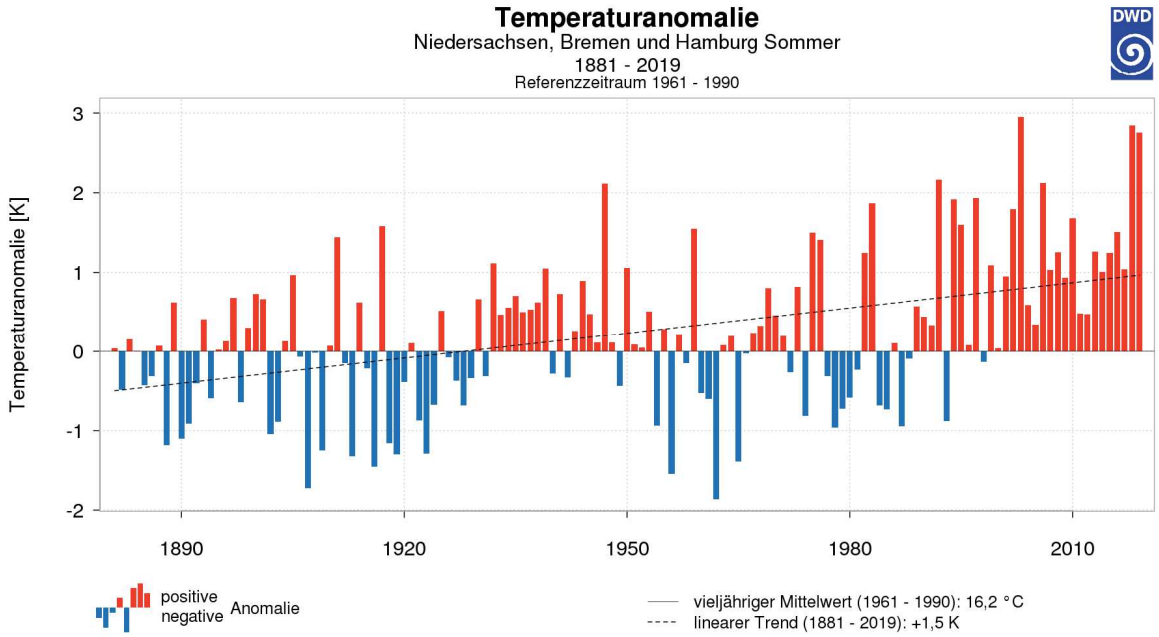

Abb. 3: *Sommer-Temperaturentwicklung in Niedersachsen, Bremen, Hamburg seit 1880. Daten: Deutscher Wetterdienst (DWD).*

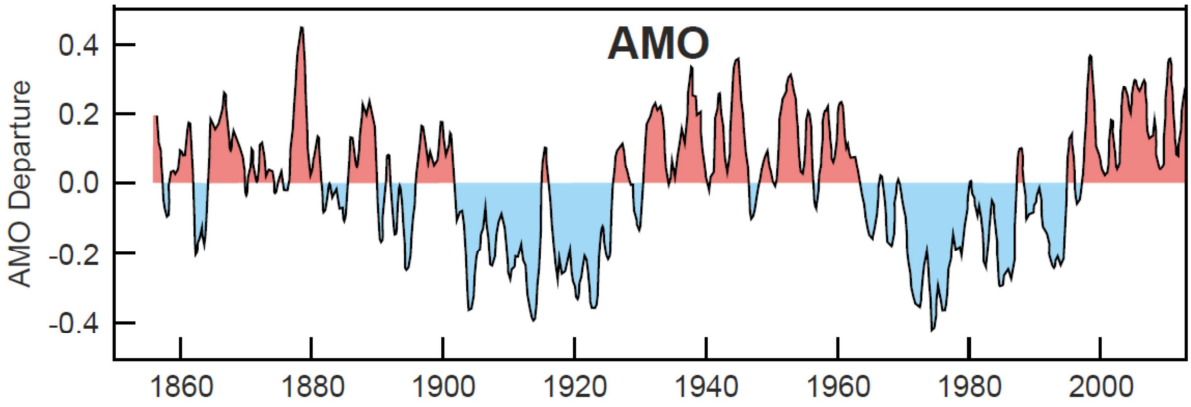

Abb. 4: *Verlauf der Atlantischen Multidekadenoszillation (AMO) seit 1860. Daten des NOAA Earth System Research Laboratory's Physical Sciences Division.*

Es verwundert, dass empirisch gut belegte Zusammenhänge zwischen Klimaentwicklung und quasiperiodischen natürlichen Ozeanzyklen keine Berücksichtigung in den Klimaprognosen für Hamburg finden. Fast alle im Maßnahmenprogramm genannten Bereiche (z. B. Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft) würden von einer präziseren Klimatrendprognose unter Berücksichtigung der multidekadischen Klimaoszillation profitieren. Eine lineare Klimaentwicklung hat es weder in den letzten 140 Jahren gegeben, noch ist sie für die Zukunft wahrscheinlich.

Desweiteren wäre eine kurze Diskussion im Bericht darüber wünschenswert gewesen, welchen Anteil die Zunahme der Sonnenscheindauer in Hamburg, Bremen, Niedersachsen während der letzten Jahrzehnte an der Klimaerwärmung gehabt haben könnte (Abb. 5). Was hat zur Verringerung der Bewölkung geführt? Ist sie (Teil-) Ursache oder Wirkung der Erwärmung? Auch hier könnte das AMO-Signal wieder eine Rolle spielen.

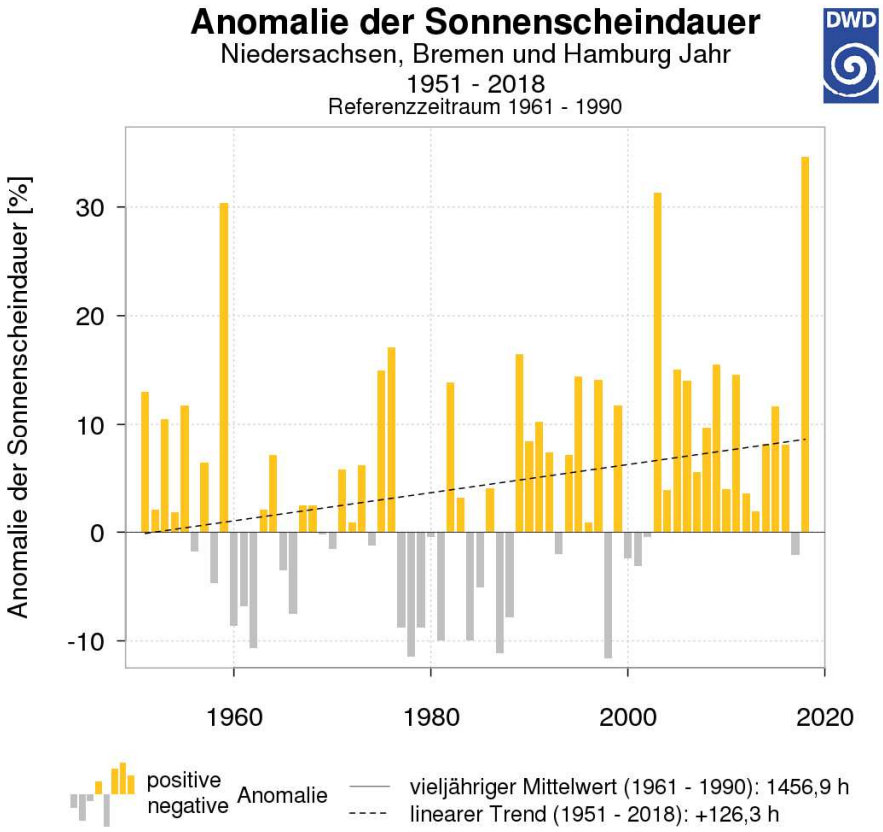

Abb. 5: *Entwicklung der Sonnenscheindauer in Niedersachsen, Bremen, Hamburg seit 1951. Abbildungsquelle: DWD.*

Vorindustrielle Temperaturentwicklung in Norddeutschland

Informationen zur Temperaturgeschichte Hamburgs und Nachbarregionen aus den letzten 1000 oder 10.000 Jahren gibt es nahezu keine. Angesichts der großen Bedeutung des Themas für die Hansestadt wäre es dringend angeraten, entsprechende Forschungsprojekte gezielt anzustoßen. Geeignet wären beispielsweise natürliche Klimaarchive in Seen und Sümpfen. Als erste Anlaufstellen bieten sich die Universität Mainz (Prof. Frank Sirocko), Universität des Saarlandes (Prof. Wolfgang Behringer), sowie die Universität Freiburg (Prof. Rüdiger Glaser) an. In der Zwischenzeit müssen Paläoklimadaten aus den deutschen und europäischen Nachbarregionen verwendet werden, die einen guten Rahmen der klimageschichtlichen Entwicklung der Region vorgeben.

Letzte 1000 Jahre

Die Moderne Wärmephase ist nicht die einzige Erwärmungsperiode in der nacheiszeitlichen Klimageschichte. Bereits im Mittelalter vor 1000 Jahren ereignete sich eine Warmphase, die besonders gut aus dem nordatlantischen Raum bekannt ist, aber auch in vielen Regionen der restlichen Welt ausgeprägt war, z.B. in Afrika (Lüning et al., 2017), Südamerika (Lüning et al., 2019a), Ozeanien (Lüning et al., 2019b) und der Antarktis (Lüning et al., 2019c). So wurde die Mittelalterliche Wärmeperiode (MWP) bzw. Mittelalterliche Klimaanomalie (MCA) auch aus Rheinland-Pfalz beschrieben.

Moschen et al. (2011) rekonstruierten die Temperaturgeschichte anhand von Kohlenstoffisotopen in einem Torfkern aus dem Dürren Maar. Dabei fanden sie eine Erwärmung von mehr als 5°C im Übergang der Kälteperiode der Völkerwanderungszeit (500-700 n. Chr.) zur MWP (Abb. 6). In diesem Zusammenhang traten offenbar starke Erwärmungsschübe auf, bei denen die Temperaturen auf natürliche Weise innerhalb weniger Jahrzehnte um mehrere Grad nach oben schnellten. Insofern scheint weder das heutige Temperaturniveau, noch die heutige Erwärmungsrate in Deutschland im historischen Kontext beispiellos zu sein. Ein warme Mittelalterliche Klimaanomalie ist auch aus den Alpen (z.B.Larocque-Tobler et al., 2012; Mangini et al., 2005; Wurth et al., 2004), dem Nordseebereich (z.B. Harff et al., 2011; Kotthoff et al., 2017), der Slowakei und (Dabkowski et al., 2019) und den Niederlanden (van Engelen et al., 2001) bekannt.

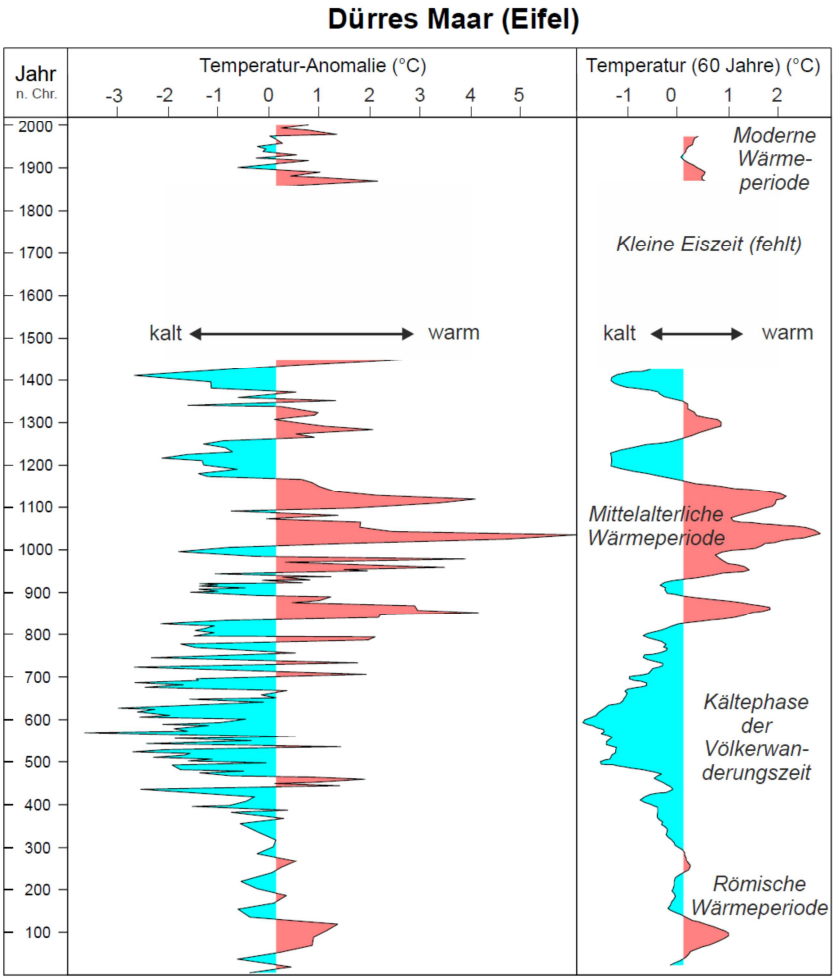

Abb. 6: *Temperaturentwicklung des Dürren Maar (Eifel) während der letzten 2000 Jahre basierend auf einer Temperaturrekonstruktion anhand von Zellulose-Kohlenstoffisotopen eines Torfkerns. Nullpunkt der Temperatur-Anomalieskala liegt etwas über dem Temperaturdurschnitt der letzten 2000 Jahre (Kleine Eiszeit fehlt). Linke Kurve: Ungeglättete Daten. Rechte Kurve: Gleitender Mittelwert über 60 Jahre. Daten digitalisiert von Moschen et al. (2011).*

<u>Letzte 10.000 Jahre</u>

Erweitert man den Referenzzeitraum auf die letzten 10.000 Jahre, so wird klar, dass es eine ganze Reihe von Warm- und Kältephasen in vorindustrieller Zeit gegeben hat. In der Wissenschaft wird hier von klimatischen Millenniumszyklen gesprochen, da sich die Änderungen im Takt von 1000-2000 Jahren ereigneten. Die Zyklen sind aus allen Erdteilen beschrieben worden (Lüning and Vahrenholt, 2016) und könnten zumindest einen Teil ihres Antrieb aus der schwankenden Sonnenaktivität beziehen (Bond et al., 2001). Andere Forscher nehmen einen klimasysteminternen Puls an.

Eine derartige Millenniumszyklik wurde auch in der sauerländischen Bunkerhöhle von Fohlmeister et al. (2012) nachgewiesen. Rhythmische Änderungen in den Sauerstoffisotopen- in Tropfsteinen zeigen über die vergangenen 11.000 Jahre einen fortlaufenden natürlichen Klimawandel, bei dem das System zwischen warm/feucht und

kalt/trocken schwankte (Abb. 7). Der Wechsel zwischen der Kältephase der Völkerwanderungszeit, MWP, Kleine Eiszeit und Moderner Wärmeperiode ist in der Höhlenrekonstruktion gut erkennbar.

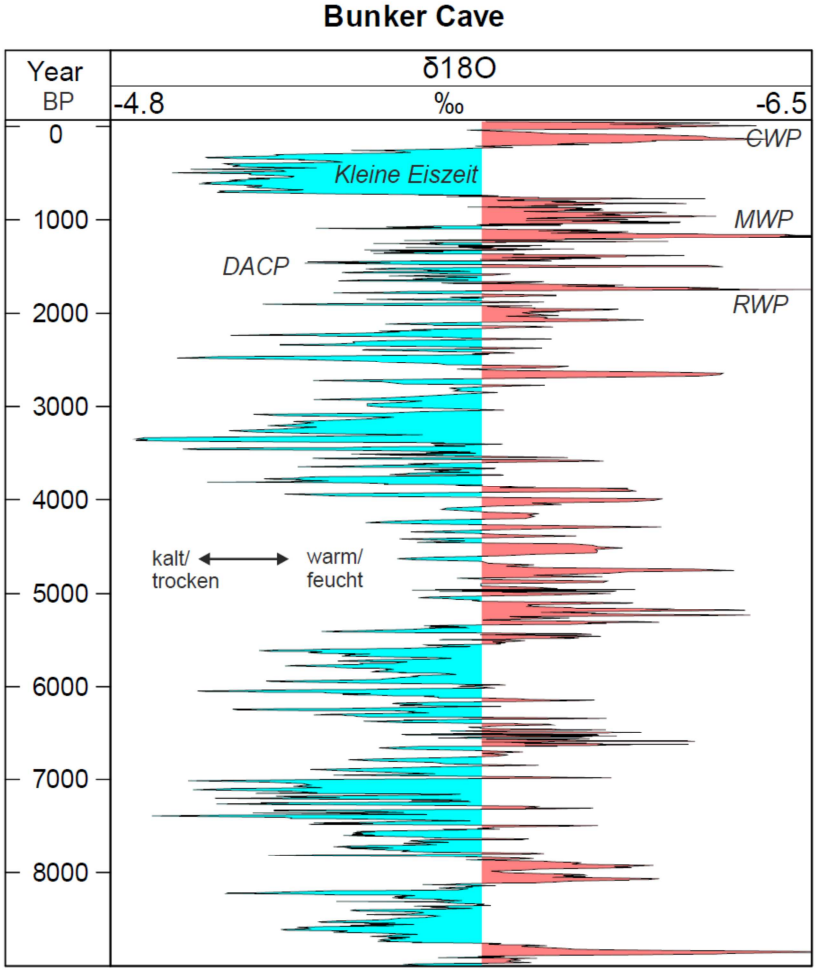

Abb. 7: *Natürliche Klimaschwankungen im Sauerland während der vergangenen 11.000 Jahre, rekonstruiert auf Basis von Sauerstoffisotopenschwankungen ($\delta^{18}O$) von Tropfsteinen der Bunkerhöhle. Einheit in Promille der Sauerstoffisotope. CWP=Moderne Wärmeperiode (Current Warm Period), MWP=Mittelalterliche Wärmeperiode, DACP=Kälteperiode der Völkerwanderungszeit (Dark Ages Cold Period), RWP=Römische Wärmeperiode. Alterskala zeigt Jahre vor 1950 (Years BP, before ‚present'=1950). Daten von Fohlmeister et al. (2012), heruntergeladen von https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/20589*

Eine besonders warme Phase stellte das sogenannte Holozäne Thermische Maximum (HTM) dar, das sich in der Zeit 8000-5500 Jahre vor heute ereignete. Kühl and Moschen (2012) rekonstruierten die Temperaturen dieser Klimaepisode für das Dürre Maar anhand von Pollen. Es zeigte sich, dass die Temperaturen in der Eifel damals um mehr als ein Grad über dem heutigen Wärmeniveau lagen (1990-2017, Abb. 7), bzw. fast zwei Grad, wenn man das kühlere Referenzintervall 1961-1990 zum Maßstab nimmt. Die Juli-Temperaturen der Eifel lagen während des HTM bei 18,0-18,5°C, wohingegen an der nächstgelegenen

Wetterstation Manderscheid im DWD-Referenzintervall 1961-1990 ein Juli-Durchschnittswert von 16,3°C gemessen wurde (Kühl and Moschen, 2012).

Starkregen und Binnenhochwasser

Auf Seite 7 der Drucksache 21/19200 heißt es:

> *„In der Folge muss unter anderem im Winter bis Ende des Jahrhunderts mit Niederschlagszunahmen gerechnet werden. Der Klimawandel wird außerdem häufigere Starkniederschlagsereignisse und damit häufigere und heftigere Binnenhochwasser zur Folge“*

Diese Aussage beruht auf Klimasimulationen, die nicht ausreichend an der vorindustriellen Vergangenheit geeicht sind und deren Prognosen daher mit Skepsis zu begegnen ist. Fakt ist, dass es trotz einer Erwärmung von mittlerweile 1,4°C im Großraum Hamburg nicht zu einer statistisch signifikanten Erhöhung von Starkregen oder Binnenhochwasser gekommen ist. Das Umweltbundesamt konnte in seinem Monitoringbericht 2015 zum Klimawandel keine belastbaren Trends zu Starkniederschlägen in Deutschland finden (Umweltbundesamt, 2015). Die Zahl der Tage mit einer Niederschlagssumme von 20 mm und mehr im Sommer ist seit 1951 nahezu unverändert geblieben. Klimarekonstruktionen dokumentieren eine hohe natürliche Variabilität der Hochwasserhäufigkeit in Deutschland während der vergangenen Jahrhunderte. Studien zeigen, dass Hochwasser in Mitteleuropa in den vergangenen 500 Jahren nicht häufiger geworden zu sein scheinen (Schmocker-Fackel and Naef, 2010). Dasselbe gilt auch auf Europa-Gesamtebene und die letzten 50 Jahre (Blöschl et al., 2017). Auf der 7. Deutschen Klimatagung im Oktober 2006 stellten Manfred Mudelsee und Gerd Tetzlaff Studienergebnisse vor, die auch für Deutschland keine Zunahme der Hochwasserereignisse sahen (Mudelsee and Tetzlaff, 2006).

Meeresspiegel Nordsee und Ostsee

Laut einer Studie der Universität Siegen steigt der Meeresspiegel in der Nordsee seit 100 Jahren mit konstanter Geschwindigkeit an, und zwar mit 1,5 mm pro Jahr (Wahl et al., 2013). An der deutschen Ostseeküste sieht es ähnlich aus. Eine Arbeit der Technischen Universität Dresden fand einen eustatischen Anstieg um 1,3 mm pro Jahr (Richter et al., 2012). Auch hier gab es keine Anzeichen für eine Beschleunigung. Die Meeresspiegelentwicklung wird exemplarisch gut von den langen Küstenpegelreihen in Cuxhaven (**Abb. 8**) und Warnemünde (**Abb. 9**) abgebildet. Die Langzeitentwicklung des Meeresspiegels ist durch langspannige Ozeanzyklen im Bereich von 60-70 Jahren Periodenlänge überlagert, wie Hansen und Kollegen 2012 für die östliche Nordsee und zentrale Ostsee zeigen konnten (Hansen et al., 2012). Bei Fortsetzung der seit vielen Jahrzehnten stabilen Anstiegsrate. Wäre der zukünftig zu erwartende Meeresspiegelanstieg mit vernünftigen Adaptionsanstrengungen beherrschbar.

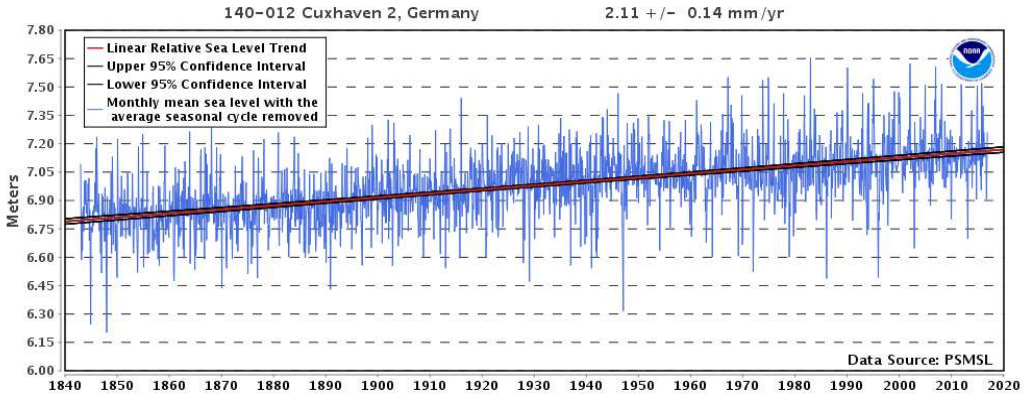

Abbildung 8: *Meeresspiegelentwicklung der vergangenen 165 Jahre am Küstenpegel Cuxhaven. Quelle: NOAA.*

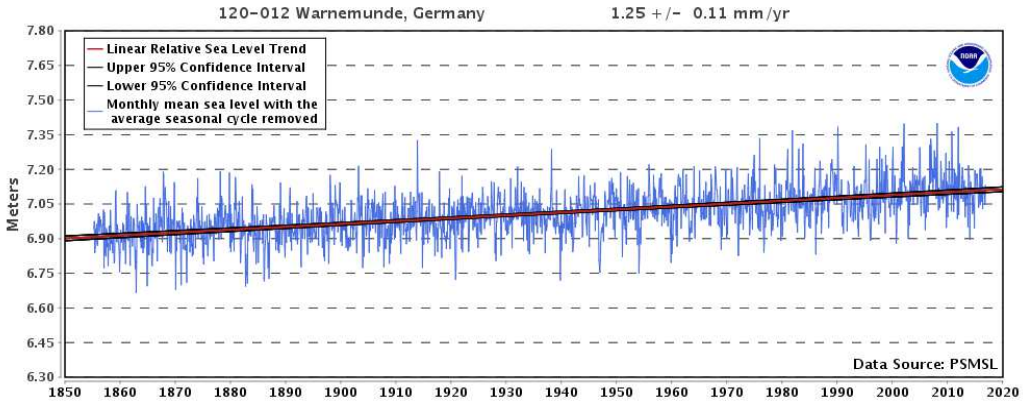

Abbildung 9: *Meeresspiegelentwicklung der vergangenen 155 Jahre am Küstenpegel Warnemünde. Quelle: NOAA.*

Sturmfluten

Laut Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) gibt es in Norddeutschland nicht mehr Sturmfluten als vor 50 Jahren. Weder bei Häufigkeit noch Intensität der Sturmfluten gebe es einen Trend, dafür jedoch eine starke natürliche Variabilität von Jahr zu Jahr. Dies zeigt exemplarisch auch die Zeitreihe des Pegels Norderney, die die letzten 100 Jahre umfasst (**Abb. 10**). Auch (Gönnert, 2003) konnte keinen Langzeittrend für Sturmfluten in der Deutschen Bucht finden, wobei auf eine Phase mit höherer Sturmfluthäufigkeit im Zeitraum 1900-1950 hingewiesen wird.

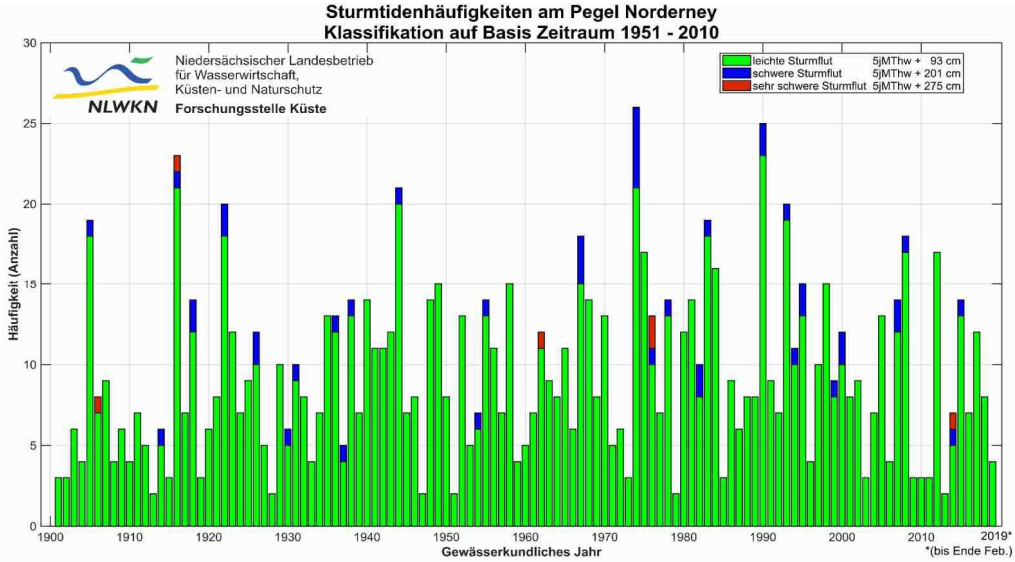

Abbildung 10: *Anzahl von Sturmfluten am Pegel Norderney seit 1910. Quelle: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.*

Klimamodelle mit starken Defiziten

Eine Vielzahl von Arbeiten konnte in den letzten Jahren zeigen, dass Klimamodelle noch enorme Defizite besitzen. Dementsprechend unterliegt das hieraus geschätzte Klimaschadensniveau grundsätzlich größten Unsicherheiten. Dies wurde erst kürzlich wieder deutlich: Nachdem die „CO_2-Uhr“ laut früheren Angaben im 5. Klimazustandsbericht bereits abgelaufen war und auf Null stehen sollte (MCC, 2018), hat der IPCC im Rahmen seines Sonderberichts zum 1,5-Grad-Ziel das verbleibende CO_2-Budget einfach schlagartig um 420 Gigatonnen CO_2 angehoben. Auf diese Weise wurden der Weltbevölkerung quasi „über Nacht“ weitere 10 Jahre an CO_2-Emissionen zugestanden, bevor die 1,5-Grad-Erwärmungsmarke überschritten wäre. Laut Berechnungen von Millar et al. (2017) könnte das verbleibende CO_2-Budget sogar noch höher sein und 20 Jahre umfassen (Klimaretter.info, 2017). Derartige Prognoseschwächen tragen nicht gerade dazu bei, das Vertrauen in die IPCC-Modelle zu stärken.

Prognoseschwächen offenbarten die Klimamodelle auch während der letzten 20 Jahre, wobei keines der Modelle die starke Abbremsung der Erwärmung ab der Jahrtausendwende prognostiziert hatte. Santer et al. (2017) verorteten einen Teil der fehlenden Erwärmung in natürlichen Ozeanzyklen, die offenbar in den Modellen unterschätzt wurde. Auch nach Abzug dieser Komponente bleibt immer noch ein Rest unrealisierter Wärme, deren Ursache den Autoren weiterhin unklar ist. Santer et al. (2017) nehmen an, dass die Klimaantriebe in den Modellgleichungen systematische Schwächen aufweisen. Große Defizite in den Klimamodellen offenbaren sich nun auch bei den Aerosolen. Eine 35-köpfige Forschergruppe zum Thema Schwebstoff um Florent Malavelle konnte zeigen, dass die Kühlwirkung von Schwefeldioxid-Aerosolen viel geringer ist, als in den gängigen Klimamodellen angenommen (Malavelle et al., 2017). Da das Schwefeldioxid in früheren Modellen eine wichtige Kühlfunktion für überschüssige Wärme des CO_2 innehatte, muss nun wohl auch die Erwärmungswirkung des CO_2 nach unten korrigiert werden.

Nach Berücksichtigung der neuen Aerosol-Erkenntnisse lieferten die im Vorfeld des 6. IPCC-Berichts erstellten Klimamodelle äußerst unrealistische Resultate, die sich nicht mit den Messdaten der letzten 140 Jahre in Einklang bringen lassen (Forster et al., 2019; Voosen, 2019). Mittlerweile raten die Klimamodellierer selber, ihre neuen Simulationsergebnisse nicht zu verwenden und im neuen IPCC-Bericht dafür andere Argumentationszweige stärker in den Vordergrund zu stellen (Voosen, 2019). In Forster et al. (2019) heißt es zu den nun viel zu viel Erwärmung suggerierenden neuen Klimamodellen (Generation CMIP6):

> *„However, the higher values seen in CMIP6 are not supported by other lines of evidence and may eventually be proven wrong".*

Übersetzt: Höhere Werte als die vom älteren Sachstandbericht werden von anderen Untersuchungen nicht gestützt und werden sich letztendlich wohl als falsch erweisen. Weiter zum Ende der Arbeit hin folgen weitere unmissverständliche Worte:

> *„As we have shown that raw projections of surface temperature from CMIP6 should not be used directly in creating policy related to achieving temperature targets, a way of translating the model results to improve their policy relevance is needed."*

Die Resultate der neuesten Klimamodelle sollten nicht als Grundlage für politische Entscheidungen verwendet werden. Eine klare Empfehlung der Wissenschaft an die Politik.

Deutschlands wohl bekanntester Klimamodellierer, Prof. Jochem Marotzke vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, warnte, dass selbst kostspielige und gesellschaftlich schmerzhafte Anstrengungen zur CO_2-Reduktion in den kommenden zwei Jahrzehnten möglicherweise kaum einen Einfluss auf das Klima haben werden (Marotzke, 2019). Anhand von Klimamodellen simulierte Marotzke den globalen Temperaturverlauf bis 2035 und verwendete einmal einen konventionellen Emissionsverlauf (Szenario RCP 4.5), und einmal ein politisch reduziertes Emissionsszenario. Sein Fazit: Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird wohl kein Unterschied zu bemerken sein, da die natürliche Klimavariabilität in diesen Zeitmaßstäben die Oberhand behält. Marotzke sieht eine große Kommunikations-Herausforderung auf die Wissenschaftler zukommen, auf die sich selbstredend auch die Politik vorbereiten sollte.

Große Probleme zeigen sich in den Klimamodellen auch bei der Beurteilung von Niederschlägen. Laut DeAngelis et al. (2015) überschätzen die gängigen Modelle die Zunahme des globalen Niederschlags systematisch um 40%. Auch andere Autoren bemängeln enorme Diskrepanzen zwischen simulierten und real beobachteten Regentrends (z. B. Bartlein et al., 2017; Bothe et al., 2019; Coats et al., 2016; Jin and Wang, 2017; Prasanna, 2016; Saha et al., 2014; Yuan and Zhu, 2018), so dass folglich auch Klimaschadensberechnungen auf Modellbasis nicht robust sein können.

Unvollständige Validierung der Klimamodelle

Die Klimaprognosen bis zum Jahr 2100 basieren auf theoretischen Klimasimulationen. Um die Verlässlichkeit der Simulationen zu gewährleisten, müssen die entsprechenden Klimamodelle zunächst an der bekannten Klimaentwicklung geeicht werden. Die Modelle müssen in einer sogenannten Rückwärtsmodellierung (englisch: Hindcast, History Match) zeigen, dass sie die gemessene bzw. paläoklimatologisch rekonstruierte Temperaturgeschichte reproduzieren können. Während die Erwärmung der letzten 150 Jahre von den Modellen in der Regel ohne größere Probleme dargestellt werden kann,

konnten die vorindustriellen Wärmephasen bisher nicht zufriedenstellend reproduziert werden. Dies räumt auch der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) unumwunden in seinem letzten Klimabericht in Bezug auf die Mittelalterliche Klimaanomalie (MCA) ein (Kapitel 5.3.5 in IPCC, 2013). Die schlechte Reproduktionsleistung der Klimamodelle für die Zeit vor der Kleinen Eiszeit wurde in zahlreichen Fachpublikationen festgestellt und bemängelt (z.B. Büntgen et al., 2017; Marcott et al., 2013; Zhang et al., 2017).

Bei näherer Betrachtung verwundert es jedoch kaum, dass die Modelle die vorindustriellen natürlichen Klimaschwankungen nicht reproduzieren können. In den Simulationen geht der Einfluss natürlicher Klimafaktoren bereits vom Ansatz her gegen Null (Abb. 1). Allenfalls wird den vorindustriellen Simulationen ein gewisses Maß an unsystematischem Rauschen zugebilligt. Angesichts der bedeutenden systematischen Temperaturschwankungen in vorindustrieller Zeit deutet vieles auf einen klassischen Ansatzfehler in den Modellierungen hin. Aufgrund der mangelhaften Kalibrierung der Klimamodelle an den vorindustriellen Wärmephasen sollten Ergebnisse aus den Klimasimulationen bis zur endgültigen Klärung der enormen Diskrepanzen mit äußerster Vorsicht behandelt werden.

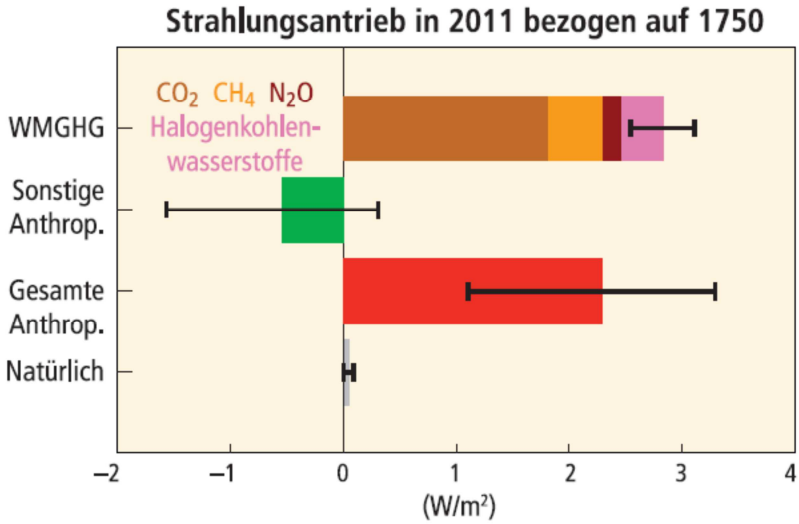

Abb. 11: *Vom IPCC angenommene Bedeutung anthropogener und natürlicher Klimafaktoren, ausgedrückt als Strahlungsantrieb während der „industriellen Ära" (1750–2011). WMGHG=gut durchmischte Treibhausgase (well mixed greenhouse gases). Abbildung aus IPCC (2014).*

Geringere Klimasensitivität

Das Treibhausgas CO_2 wirkt erwärmend. Der genaue Erwärmungsbetrag ist jedoch noch immer schlecht bekannt und wird vom IPCC seit seinem ersten Klimabericht 1990 im Bereich von 1,5-4,5°C pro CO_2-Verdopplung vermutet. Mittlerweile deutet vieles darauf hin, dass der reale Erwärmungswert des CO_2 wohl im unteren Teil des Spektrums zu verorten ist. Insbesondere der Bereich von 1,6-2,2°C findet viele Unterstützer in der Fachwelt (Lewis and Curry, 2015; Mauritsen and Stevens, 2015; Mauritsen and Pincus, 2017; Otto et al., 2013). Angesehene Klimawissenschaftler wie Reto Knutti und Gabriele Hegerl scheinen die Öffentlichkeit bereits auf die bevorstehende Abwärts-Revision des Wertes der CO_2-

Klimasensitivität vorzubereiten und erklären, dass die Klimaschutzbemühungen auch bei niedrigeren Werten auf jeden Fall fortzusetzen seien (Knutti et al., 2017). Dies ist nur im Prinzip richtig, denn es sollte dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass niedrigere Werte das Schadensniveau drastisch herabsetzen und es mehr Zeit für eine nachhaltigere Planung der vorzunehmenden Maßnahmen gibt.

Empfehlungen

- Klimamodellierer warnen ausdrücklich davor, die neuesten Simulationsergebnisse als politische Entscheidungsgrundlage zu verwenden. Nach Berücksichtigung neuer Erkenntnisse der Schwefeldioxid-Aerosolforschung suggerieren Modelle viel zu hohe Erwärmungsraten.

- Angesichts zu erwartender hoher Investitionssummen und massiver Eingriffe in die Hamburgische Wirtschaft und Gesellschaft sollten die drastischen Klimaprognosen erneut einer unabhängigen Überprüfung unterzogen werden, um den Gefährdungsgrad realistischer einschätzen zu können. Eine solche Überprüfung sollte dem 360°-Prinzip folgen und neben den Klimawarnern auch Vertreter gemäßigterer Ansichten einbeziehen. Dies ist umso wichtiger, da in den Medien stets dieselben Akteure zum Thema auftreten, während die schweigende Mehrheit der Forscher eher zurückhaltendere Töne anschlägt.

- Die aus Computersimulationen stammenden Klimaprognosen für Norddeutschland und Europa können erst dann als politische Planungsgrundlage herangezogen werden, wenn sie erfolgreich mit den vorindustriellen Klimaschwankungen der zwei Jahrtausende kalibriert wurden, und damit in der Lage sind, valide globale und vor allem regionale Zukunftsprojektionen zu generieren. Die Schwächen der Modelle erlauben es nicht, Weichen für Entscheidungen zu stellen, die später kaum wieder zurückgenommen werden können.

- Insbesondere sollten die Modelle zunächst die natürlichen vorindustriellen europäischen Wärmephasen des Mittelalters und der Römerzeit reproduzieren können, bevor sie für robuste Zukunftsprognosen einsatzbereit werden. Eine Rückwärtsmodellierung beginnend am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 greift zu kurz, da das Intervall keine rein natürliche Wärmephasen enthält.

- Behörden, Politiker und Forscher müssen die enorme natürliche Klimavariabilität der vorindustriellen Zeit aktiv kommunizieren. Ein fortgesetztes Verschweigen setzt sie dem Vorwurf mangelnder Transparenz aus. Die Klimageschichte beginnt nicht erst am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850. Auch die Klimadiskussion kann aus der Geschichte lernen, muß klimahistorische Fakten anerkennen und einbeziehen. Die in Drucksache 21/19200 in Kapitel 3.3.1. angeführt Klimakommunikation sollte dies als wichtigen Tätigkeitsbereich aufgreifen.

- Es wird empfohlen, ein gezieltes paläoklimatologisches Forschungsprogramm für Hamburg bzw. Norddeutschland aufzulegen, um dringend benötigte Kalibrierungsdaten für die Klimasimulationen zu erhalten. Die entsprechenden Methoden hierzu sind bereits entwickelt, so dass das Programm zügig starten und schnell Ergebnisse liefern könnte.

- Bei der Erstellung von Klimaprognosen sollten in der Vergangenheit gut belegte empirische Zusammenhänge mit einbezogen werden, etwa die systematischen Einflüsse der atlantischen Ozeanzyklen der AMO und NAO.

- Bei der Diskussion von Extremwetterdaten sollte es verpflichtend sein, die moderne Entwicklung stets im Kontext der Klimageschichte der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende einzuordnen. Nur so kann festgestellt werden, ob ein Prozess bereits die natürliche Schwankungsbreite verlassen hat. Zu kurz gewählte Kontextintervalle stellen eine nicht statthafte ´Rosinenpickerei‘ dar und besitzen keine Aussagekraft für zukünftige Entwicklungen.

- Politische Maßnahmen sollten angesichts der großen Unsicherheiten im Bereich der Klimasimulationen dem Prinzip der Verhältnismäßigkeit folgen. Alarmismus ist hier fehl am Platz, stattdessen sollten alle gesellschaftlichen Herausforderungen gleichberechtigt behandelt werden und einer nüchternen Betrachtung von Aufwand und Nutzen genügen.

Autor

Dr. habil. Sebastian Lüning studierte Geologie/Paläontologie an der Universität Göttingen. Seine Promotion und Habilitation in diesem Fach erlangte er an der Universität Bremen. Für Vordiplom, Doktorarbeit und Habilitation erhielt Lüning jeweils Studienpreise. Während seiner Postdoc-Zeit arbeitete er zu ökologischen Sauerstoffmangelsituationen während der Erdgeschichte. Seit 2007 ist Lüning hauptberuflich in der konventionellen Energiebranche tätig. Die Beschäftigung mit dem Thema Klimawandel erfolgt ausschließlich in privater Funktion, in Fortsetzung seiner langjährigen Vollzeit-Forschertätigkeit. Diese Forschung ist vollständig unabhängig und wurde weder von der Industrie beauftragt, noch von ihr gefördert. Im Jahr 2012 veröffentlichte Lüning zusammen mit Fritz Vahrenholt das Buch „Die kalte Sonne“, in dem die Autoren für eine stärkere Berücksichtigung der natürlichen Klimaantriebe plädierten. Viele der damals vorgeschlagenen Kritikpunkte wurden mittlerweile von den Klimawissenschaften anerkannt, z.B. die systematische Rolle der 60-jährigen Ozeanzyklen, die ursprünglich überhöht angesetzte Kühlwirkung der Aerosole sowie das Auseinanderklaffen von realer und simulierter Klimaentwicklung. Eines der im Buch vorgestellten Szenarien beschreibt eine CO_2-Klimasensitivität von 1,5°C, was dem unteren Rand der IPCC-Spanne von 1,5-4,5°C entspricht. Die Fachdiskussion der letzten Jahre deutet an, dass dieses Niedrig-Szenario durchaus bald konsensfähig werden könnte. Sebastian Lüning ist mit dem Institut für Hydrographie, Geoökologie und Klimawissenschaften (IFHGK) in der Schweiz assoziiert und wirkte als offizieller Gutachter an den IPCC-Sonderberichten zum 1,5 Grad-Ziel sowie zu Ozeanen & Kryosphäre (SROCC) mit. Zudem ist Lüning offizieller Gutachter des derzeit entstehenden 6. IPCC Klimazustandsberichts. Zu Lünings aktuellen Forschungsschwerpunkten gehören die globale Kartierung der Mittelalterlichen Klimaanomalie (Lüning et al., 2017; Lüning et al., 2018; Lüning et al., 2019a; Lüning et al., 2019b; Lüning et al., 2019c; Lüning et al., 2019d) und des Holozänen Thermischen Maximums (Lüning and Vahrenholt, 2017; Lüning and Vahrenholt, 2019), sowie die Analyse natürlicher Klimaprozesse im Zusammenspiel mit anthropogenen Klimaantrieben (Laurenz et al., 2019; Lüning and Vahrenholt, 2016). Weitere Informationen auf www.luening.info.

Literatur

Bartlein, P. J., Harrison, S. P., and Izumi, K., 2017, Underlying causes of Eurasian midcontinental aridity in simulations of mid-Holocene climate: Geophysical Research Letters, v. 44, no. 17, p. 9020-9028.

Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., and Živković, N., 2017, Changing climate shifts timing of European floods: Science, v. 357, no. 6351, p. 588-590.

Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., and Bonani, G., 2001, Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene: Science, v. 294, p. 2130-2136.

Bothe, O., Wagner, S., and Zorita, E., 2019, Inconsistencies between observed, reconstructed, and simulated precipitation indices for England since the year 1650 CE: Climat of the Past, v. 15, p. 307-334.

Büntgen, U., Krusic, P. J., Verstege, A., Sangüesa-Barreda, G., Wagner, S., Camarero, J. J., Ljungqvist, F. C., Zorita, E., Oppenheimer, C., Konter, O., Tegel, W., Gärtner, H., Cherubini, P., Reinig, F., and Esper, J., 2017, New Tree-Ring Evidence from the Pyrenees Reveals Western Mediterranean Climate Variability since Medieval Times: Journal of Climate, v. 30, no. 14, p. 5295-5318.

CH2018, 2018, Climate Scenarios for Switzerland, Zürich, Technical Report, National Centre for Climate Services.

Coats, S., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Seager, R., Cook, E. R., and Anchukaitis, K. J., 2016, Internal ocean-atmosphere variability drives megadroughts in Western North America: Geophysical Research Letters, v. 43, no. 18, p. 9886-9894.

Dabkowski, J., Frodlová, J., Hájek, M., Hájková, P., Petr, L., Fiorillo, D., Dudová, L., and Horsák, M., 2019, A complete Holocene climate and environment record for the Western Carpathians (Slovakia) derived from a tufa deposit: The Holocene, v. 29, no. 3, p. 493-504.

DeAngelis, A. M., Qu, X., Zelinka, M. D., and Hall, A., 2015, An observational radiative constraint on hydrologic cycle intensification: Nature, v. 528, p. 249.

Fohlmeister, J., Schröder-Ritzrau, A., Scholz, D., Spötl, C., Riechelmann, D. F. C., Mudelsee, M., Wackerbarth, A., Gerdes, A., Riechelmann, S., Immenhauser, A., Richter, D. K., and Mangini, A., 2012, Bunker Cave stalagmites: an archive for central European Holocene climate variability: Climate of the Past, v. 8, p. 1751-1764.

Forster, P. M., Maycock, A. C., McKenna, C. M., and Smith, C. J., 2019, Latest climate models confirm need for urgent mitigation: Nature Climate Change.

Gönnert, G., 2003, Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht: Charakter, Veränderungen und Maximalwerteim 20. Jahrhundert: Die Küste, v. 67, p. 185-365.

Hansen, J. M., Aagaard, T., and Binderup, M., 2012, Absolute sea levels and isostatic changes of the eastern North Sea to central Baltic region during the last 900 years: Boreas, v. 41, no. 2, p. 180-208.

Harff, J., Endler, R., Emelyanov, E., Kotov, S., Leipe, T., Moros, M., Olea, R., Tomczak, M., and Witkowski, A., 2011, Late Quaternary Climate Variations Reflected in Baltic Sea Sediments, *in* Harff, J., Björck, S., and Hoth, P., eds., The Baltic Sea Basin: Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, p. 99-132.

IPCC, 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535 p.:

-, 2014, Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC): https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf, p. 1-145.
-, 2018, Special Report on global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways: http://www.ipcc.ch/report/sr15/.
Jin, Q., and Wang, C., 2017, A revival of Indian summer monsoon rainfall since 2002: Nature Climate Change, v. 7, p. 587.
Klimaretter.info, 2017, CO_2-Budget könnte länger reichen: http://www.klimaretter.info/forschung/nachricht/23684-co2-budget-koennte-laenger-reichen.
Knight, J. R., Folland, C. K., and Scaife, A. A., 2006, Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation: Geophysical Research Letters, v. 33, no. 17.
Knutti, R., Rugenstein, M. A. A., and Hegerl, G. C., 2017, Beyond equilibrium climate sensitivity: Nature Geoscience, v. 10, p. 727.
Kotthoff, U., Groeneveld, J., Ash, J. L., Fanget, A. S., Krupinski, N. Q., Peyron, O., Stepanova, A., Warnock, J., Van Helmond, N. A. G. M., Passey, B. H., Clausen, O. R., Bennike, O., Andrén, E., Granoszewski, W., Andrén, T., Filipsson, H. L., Seidenkrantz, M. S., Slomp, C. P., and Bauersachs, T., 2017, Reconstructing Holocene temperature and salinity variations in the western Baltic Sea region: a multi-proxy comparison from the Little Belt (IODP Expedition 347, Site M0059): Biogeosciences, v. 14, no. 23, p. 5607-5632.
Kühl, N., and Moschen, R., 2012, A combined pollen and δ18OSphagnum record of mid-Holocene climate variability from Dürres Maar (Eifel, Germany): The Holocene, v. 22, no. 10, p. 1075-1085.
Larocque-Tobler, I., Stewart, M. M., Quinlan, R., Trachsel, M., Kamenik, C., and Grosjean, M., 2012, A last millennium temperature reconstruction using chironomids preserved in sediments of anoxic Seebergsee (Switzerland): consensus at local, regional and Central European scales: Quaternary Science Reviews, v. 41, no. 0, p. 49-56.
Laurenz, L., Lüdecke, H.-J., and Lüning, S., 2019, Influence of solar activity changes on European rainfall: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 185, p. 29-42.
Lewis, N., and Curry, J. A., 2015, The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake estimates: Climate Dynamics, v. 45, no. 3-4, p. 1009-1023.
Lüning, S., and Vahrenholt, F., 2016, Chapter 16 - The Sun's Role in Climate A2 - Easterbrook, Don J, Evidence-Based Climate Science (Second Edition), Elsevier, p. 283-305.
Lüning, S., Gałka, M., and Vahrenholt, F., 2017, Warming and Cooling: The Medieval Climate Anomaly in Africa and Arabia: Paleoceanography, v. 32, no. 11, p. 1219-1235.
Lüning, S., and Vahrenholt, F., 2017, Paleoclimatological Context and Reference Level of the 2°C and 1.5°C Paris Agreement Long-Term Temperature Limits: Frontiers in Earth Science, v. 5, no. 104.
Lüning, S., Gałka, M., Danladi, I. B., Adagunodo, T. A., and Vahrenholt, F., 2018, Hydroclimate in Africa during the Medieval Climate Anomaly: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 495, p. 309-322.
Lüning, S., Gałka, M., Bamonte, F. P., Rodríguez, F. G., and Vahrenholt, F., 2019a, The Medieval Climate Anomaly in South America: Quaternary International, v. 508, p. 70-87.
Lüning, S., Gałka, M., García-Rodríguez, F., and Vahrenholt, F., 2019b, The Medieval Climate Anomaly in Oceania: Environmental Reviews.
Lüning, S., Gałka, M., and Vahrenholt, F., 2019c, The Medieval Climate Anomaly in Antarctica: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 532, p. 109251.
Lüning, S., Schulte, L., Garcés-Pastor, S., Danladi, I. B., and Gałka, M., 2019d, The Medieval Climate Anomaly in the Mediterranean Region: Paleoceanography and Paleoclimatology, v. 34, no. 10, p. 1625-1649.

Lüning, S., and Vahrenholt, F., 2019, Holocene Climate Development of North Africa and the Arabian Peninsula, *in* Bendaoud, A., Hamimi, Z., Hamoudi, M., Djemai, S., and Zoheir, B., eds., The Geology of the Arab World---An Overview: Cham, Springer International Publishing, p. 507-546.

Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Jones, A., Gettelman, A., Clarisse, L., Bauduin, S., Allan, R. P., Karset, I. H. H., Kristjánsson, J. E., Oreopoulos, L., Cho, N., Lee, D., Bellouin, N., Boucher, O., Grosvenor, D. P., Carslaw, K. S., Dhomse, S., Mann, G. W., Schmidt, A., Coe, H., Hartley, M. E., Dalvi, M., Hill, A. A., Johnson, B. T., Johnson, C. E., Knight, J. R., O'Connor, F. M., Partridge, D. G., Stier, P., Myhre, G., Platnick, S., Stephens, G. L., Takahashi, H., and Thordarson, T., 2017, Strong constraints on aerosol–cloud interactions from volcanic eruptions: Nature, v. 546, p. 485.

Mangini, A., Spötl, C., and Verdesa, P., 2005, Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a delta18O stalagmite record: Earth and Planetary Science Letters, v. 235, p. 741-751.

Marcott, S. A., Shakun, J. D., Clark, P. U., and Mix, A. C., 2013, A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years: Science, v. 339, no. 6124, p. 1198-1201.

Marotzke, J., 2019, Quantifying the irreducible uncertainty in near-term climate projections: Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 10, no. 1, p. e563.

Mauritsen, T., and Stevens, B., 2015, Missing iris effect as a possible cause of muted hydrological change and high climate sensitivity in models: Nature Geosci, v. 8, no. 5, p. 346-351.

Mauritsen, T., and Pincus, R., 2017, Committed warming inferred from observations: Nature Clim. Change, v. advance online publication.

MCC, 2018, CO2-Uhr des MCC auf neusten Stand gebracht: Pressemitteilung des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change vom 8.11.2018, https://www.mcc-berlin.net/news/meldungen/meldungen-detail/article/co2-uhr-des-mcc-auf-neusten-stand-gebracht.html.

Millar, R. J., Fuglestvedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., Skeie, R. B., Forster, P. M., Frame, D. J., and Allen, M. R., 2017, Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C: Nature Geoscience, v. 10, p. 741.

Moschen, R., Kühl, N., Peters, S., Vos, H., and Lücke, A., 2011, Temperature variability at Dürres Maar, Germany during the Migration Period and at High Medieval Times, inferred from stable carbon isotopes of Sphagnum cellulose: Clim. Past, v. 7, p. 1011-1026.

MPIM, 2019, Wurde das Klima der jüngsten Vergangenheit von der veränderten Sonneneinstrahlung mitgeprägt?: https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/fragen-zu-klima-faq/wurde-das-klima-der-juengsten-vergangenheit-von-der-veraenderten-sonneneinstrahlung-mitgepraegt/.

Mudelsee, M., and Tetzlaff, G., 2006, Hochwasser und Niederschlag in Deutschland: Die Notwendigkeit von Lanfristbeobachtungen unter räumlicher Hochauflösung: 6. Deutsche Klimatagung, München.

Neue Osnabrücker Zeitung, 2012, Klimaforscher Latif: Biosprit E10 ist Blödsinn: Artikel vom 12.9.2012, https://www.noz.de/deutschland-welt/niedersachsen/artikel/98729/klimaforscher-latif-biosprit-e10-ist-blodsinn.

O'Reilly, C. H., Woollings, T., and Zanna, L., 2017, The Dynamical Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on Continental Climate: Journal of Climate, v. 30, no. 18, p. 7213-7230.

Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gillett, N. P., Gregory, J., Johnson, G. C., Knutti, R., Lewis, N., Lohmann, U., Marotzke, J., Myhre, G., Shindell, D., Stevens, B., and Allen, M. R., 2013, Energy budget constraints on climate response: Nature Geosci, v. 6, no. 6, p. 415-416.

Prasanna, V., 2016, Assessment of South Asian Summer Monsoon Simulation in CMIP5-Coupled Climate Models During the Historical Period (1850–2005): Pure and Applied Geophysics, v. 173, no. 4, p. 1379-1402.

Richter, A., Groh, A., and Dietrich, R., 2012, Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v. 53-54, p. 43-53.
Saha, A., Ghosh, S., Sahana, A. S., and Rao, E. P., 2014, Failure of CMIP5 climate models in simulating post-1950 decreasing trend of Indian monsoon: Geophysical Research Letters, v. 41, no. 20, p. 7323-7330.
Santer, B. D., Fyfe, J. C., Pallotta, G., Flato, G. M., Meehl, G. A., England, M. H., Hawkins, E., Mann, M. E., Painter, J. F., Bonfils, C., Cvijanovic, I., Mears, C., Wentz, F. J., Po-Chedley, S., Fu, Q., and Zou, C.-Z., 2017, Causes of differences in model and satellite tropospheric warming rates: Nature Geoscience, v. 10, p. 478.
Schmocker-Fackel, P., and Naef, F., 2010, Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500: Hydrol. Earth Syst. Sci., v. 14, no. 8, p. 1581-1594.
Umweltbundesamt, 2015, Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Dessau-Roßlau.
van Engelen, A. F. V., Buisman, J., and Ijnsen, F., 2001, A Millennium of Weather, Winds and Water in the Low Countries, *in* Jones, P. D., Ogilvie, A. E. J., Davies, T. D., and Briffa, K. R., eds., History and Climate: Memories of the Future?: Boston, MA, Springer US, p. 101-124.
von Storch, H., Meinke, I., and Claußen, M., 2018, Hamburger Klimabericht, Berlin, Springer Spektrum.
Voosen, P., 2019, New climate models predict a warming surge: Science, v. 16 Aoril 2019.
Wahl, T., Haigh, I. D., Woodworth, P. L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R. J., Weisse, R., and Wöppelmann, G., 2013, Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present: Earth-Science Reviews, v. 124, p. 51-67.
Wurth, G., Niggemann, S., Richter, D. K., and Mangini, A., 2004, The Younger Dryas and Holocene climate record of a stalagmite from Hölloch Cave (Bavarian Alps, Germany: Journal of Quaternary Science, v. 19, no. 3, p. 291-298.
Yuan, X., and Zhu, E., 2018, A First Look at Decadal Hydrological Predictability by Land Surface Ensemble Simulations: Geophysical Research Letters, v. 45, no. 5, p. 2362-2369.
Zhang, Y., Renssen, H., Seppä, H., and Valdes, P. J., 2017, Holocene temperature evolution in the Northern Hemisphere high latitudes – Model-data comparisons: Quaternary Science Reviews, v. 173, p. 101-113.