



**Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz**

Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landtags Nordrhein-Westfalen
am 31.10.2018

Schriftlicher Bericht

**Daten und Fakten zu den Auswirkungen des Klimawandels in
Nordrhein-Westfalen**

„Welche aktuellen Daten und Fakten liegen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen vor?“

Allgemeines zur Datenlage für Nordrhein-Westfalen zu den Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels

Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen bereitet das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MULNV) umfassende Daten hinsichtlich des beobachteten Klimas sowie der aktuell projizierten zukünftigen Klimaentwicklungen, wie sie unter bestimmten Emissionsszenarien wahrscheinlich eintreffen werden, auf und stellt sie der Öffentlichkeit barrierefrei zur Verfügung. Das LANUV betreibt drei Informationsplattformen zum Thema Klima: den Klimaatlas NRW, das Klimafolgenmonitoring NRW und das Fachinformationssystem (FIS) Klimaanpassung NRW. Darüber hinaus werden in regelmäßigen Abständen beziehungsweise anlassbezogen Publikationen zum Thema Klima und anthropogener Klimawandel und -anpassung, aber auch Klimaschutz, vom LANUV veröffentlicht. In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Informationsplattformen sowie wichtige Publikationen unter Berücksichtigung zentraler Fakten und Daten zum anthropogenen Klimawandel in Nordrhein-Westfalen vorgestellt.

Klimaatlas Nordrhein-Westfalen

Der Klimaatlas Nordrhein-Westfalen bietet u.a. flächendeckende Informationen über die Klimaparameter Lufttemperatur und Niederschlag. Sämtliche hier für Nordrhein-Westfalen zugeschnittenen und aufbereiteten Klimadaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt. Der Klimaatlas Nordrhein-Westfalen gliedert sich in einen Kartenteil und einen Textteil, wo die jeweiligen Klimaparameter, wiederum unterteilt nach Beobachtungsdaten (siehe hierzu auch den aktuellen Klimawandelbericht – Fachbericht 74 „Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen - Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016“) und Projektionsdaten, ausführlich dargestellt werden. In Anlehnung an die Zusammenfassungen des monatlichen und saisonalen Witterungsverlaufs durch den DWD wird eine speziell für Nordrhein-Westfalen ausgerichtete Einordnung des Witterungsverlaufs der Monate und Jahreszeiten im Klimaatlas Nordrhein-Westfalen angeboten.

Klimafolgenmonitoring Nordrhein-Westfalen

Das Klimafolgenmonitoring Nordrhein-Westfalen liefert anhand von 28 Indikatoren aus 7 Umweltbereichen Zeitreihen von Klimakenngrößen und daran gekoppelte Parameter zur Beschreibung der Veränderungen des Klimas. Die einzelnen Klimaindikatoren sind: Temperatur, Jahreszeiten Temperatur, Temperaturkentage kalt, Temperaturkentage warm, Niederschlag, Jahreszeiten Niederschlag, Starkniederschlagstage, Niederschlagsextreme und Schnee. Der zweite Umweltbereich „Wasser“ stellt Zeitreihen von Indikatoren dar, die bereits direkte Folgen von Klimaveränderungen darstellen können. Die Indikatoren zu „Wasser“ sind: Klimatische Wasserbilanz, Gewässertemperatur, Mittlerer Abfluss, Grundwasserstand, Grundwasserneubildung und Evapotranspiration. Beim dritten Umweltbereich „Ökosysteme und Biodiversität“ gibt es Zeitreihen zu fol-

genden Indikatoren: Länge der Vegetationsperiode, Beginn der phänologischen Jahreszeiten, Dauer phänologische Jahreszeiten und klimasensitive Vogelarten. „Boden“ stellt den vierten Umweltbereich dar und wird durch die Indikatoren Bodentemperatur und Regenerosivität abgedeckt. Der Umweltbereich „Landwirtschaft“ kommt als fünfter Bereich und deckt die Indikatoren Beginn der Apfelblüte und Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen ab. Der sechste Umweltbereich „Forstwirtschaft“ beinhaltet Zeitreihen zu den Indikatoren Waldbrandgefahr und Phänologie der Buche. Als siebter und letzter Umweltbereich enthält „Menschliche Gesundheit“ die Indikatoren Wärmebelastung, Hitzewarnung und Wärmeinselintensität. In einem aktuellen Forschungsvorhaben wird eine Weiterentwicklung und Ergänzung des Klimafolgenmonitorings Nordrhein-Westfalen um weitere Indikatoren auch aus Nicht-Umweltbereichen geprüft.

Fachinformationssystem Klimaanpassung

Ziel des Fachinformationssystems (FIS) Klimaanpassung ist es, eine landesweite Daten- und Informationsgrundlage zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels zu liefern, auf deren Basis Konzepte und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt werden können. Das FIS Klimaanpassung liefert somit eine umfangreiche Datengrundlage. Zurzeit stehen folgende Handlungsfelder im FIS Klimaanpassung sowohl als interaktives Kartenwerk als auch in vertiefender Textform zur Verfügung: Klimaanalyse, Menschliche Gesundheit, Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz, Boden, Biologische Vielfalt und Naturschutz, Landwirtschaft, Wald und Forstwirtschaft sowie Planung. Die Klimaanalyse stellt unter den acht Handlungsfeldern die neueste Ergänzung des FIS Klimaanpassung dar. Sie gibt detaillierte Informationen zur aktuellen und zukünftigen Hitzebelastung der Bevölkerung in Nordrhein-Westfalen und liefert somit wichtige Grundlagen für die Planung. Die Ergebnisse der Klimaanalyse gingen bereits aktuell als Fachbeiträge „Klima“ für die in Aufstellung befindlichen Regionalpläne Detmold und Köln ein.

Veröffentlichungen zu den Themen Klima und Klimawandel

Folgende Veröffentlichungen des LANUV zu den Themen Klima und Klimawandel sowie Klimafolgenanpassung liegen in chronologischer Reihenfolge vor:

- LANUV 2010: Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen Daten und Hintergründe, Fachbericht 27
- LANUV 2013: Klimawandelgerechte Metropole Köln – Abschlussbericht, Fachbericht 50
- LANUV 2016: Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen - Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016, Fachbericht 74
- LANUV 2017: Auswirkungen des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen - Klimafolgenmonitoring 2016, LANUV-Info 38
- LANUV 2018: Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen, Fachbericht 86
- LANUV 2018: Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen - Hitzebelastung der Bevölkerung, LANUV-Info 41
- LANUV 2018: Fachbeitrag Klima für die Planungsregion Detmold
- LANUV 2018: Fachbeitrag Klima für die Planungsregion Köln

- LANUV 2018: Wald und Klima in Nordrhein-Westfalen - Ein Beitrag zum Landeswaldbericht
- LANUV 2018: Daten und Fakten zum Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Datenblätter für die acht Großlandschaften NRWs

Zentrale Erkenntnisse aus den Daten des LANUV

Im Zeitraum 1881 bis 2017 hat sich die mittlere Jahrestemperatur in Nordrhein-Westfalen um 1,5° C erhöht. Der globale Temperaturanstieg von ca. 0,8 °C im ungefähr gleichen Zeitraum (Land und Ozeane) ist etwa zehn Mal schneller als beim Übergang von der letzten Eiszeit in die aktuelle Warmzeit. Deshalb ist diese starke Erderwärmung innerhalb einer bereits bestehenden Warmzeit aus geowissenschaftlicher Sicht sehr besorgniserregend. Für Nordrhein-Westfalen lässt sich feststellen, dass sich neben dem starken Temperaturanstieg sämtliche Temperaturkennwerte entsprechend signifikant verändert haben (Sommertage +17, Heiße Tage +6, Frosttage -17 und Eistage -7 im Zeitraum 1951-2017). Das Gleiche gilt zum Beispiel für die mittleren Gewässertemperaturen am Rhein (Anstieg um 1,4 °C zwischen 1974-2016) und zahlreiche weitere Temperaturparameter. In den Ballungsräumen sind bereits heute schon insgesamt 5,3 Mio. Menschen von Hitzebelastung in Nordrhein-Westfalen betroffen. In Zukunft (2050) werden es voraussichtlich bis zu 9 Mio. Menschen werden.

Die Niederschlagsmenge hat sich im Zeitraum 1881-2017 insgesamt um ca. 102 mm/a erhöht, gleichzeitig hat es in den Sommermonaten aber keine Zunahmen der Niederschlagsmengen gegeben. Dadurch hat und wird sich voraussichtlich der sommerliche Trockenstress in der Land- und Forstwirtschaft weiter ausprägen. Die Tage mit Niederschlagsmengen von über 10, 20 und 30 mm/Tag haben tendenziell, bisher jedoch nicht signifikant, zugenommen. Das Gleiche gilt für extreme Niederschläge von kürzerer Dauer, die gleichwohl tendenziell zugenommen haben, aber ebenfalls noch keine Signifikanz besitzen. Hier werden in naher Zukunft neue statistische Auswertung unter erstmaliger Einbeziehung von Radarniederschlagsdaten belastbarere Daten bringen. Insgesamt belegen die zahlreichen Quellen, über die das LANUV verfügt, dass der anthropogene Klimawandel auch in Nordrhein-Westfalen seine Folgen hinterlässt.

„Wie beurteilt das Ministerium den anthropogenen Einfluss auf die Erwärmung des Klimas?“

Das MULNV stützt sich in seiner Beurteilung auf vorliegende Studien (s. Anlage), die sich in zahlreichen internationalen Berichten widerspiegeln und auf die Bewertungen der fachlichen Gutachten durch das LANUV.

Der gegenwärtige Klimawandel

Obwohl es in den letzten 12.000 Jahren zahlreiche Klimaschwankungen gegeben hat, können diese Veränderungen nicht mit der Intensität und insbesondere der Temperaturschwankungen des heutigen Klimawandels verglichen werden. Der

Übergang von der letzten Eiszeit zum Holozän ging mit 0,3 - 0,8 Kelvin pro 1000 Jahren vonstatten. Nun hat sich, bereits von einer natürlichen Warmzeit ausgehend, seit 1881 die globale Temperatur (Land und Ozeane) mit einem Trend von 0,7 Kelvin in 100 Jahren erhöht. Ab 1970 hat sich der globale Trend der Erwärmung noch einmal deutlich verstärkt, was einer Steigerung der Temperaturänderung von dem 10-fachen hin zum ungefähr 20-fachen gegenüber dem Ende der letzten Eiszeit bedeutet, und das von einer Warmzeit ausgehend.

Ursachen für die derzeitige Klimaerwärmung

Der Grund für die Klimaänderung seit Beginn der Industrialisierung liegt vor allem im erhöhten Treibhausgasausstoß in die Atmosphäre bedingt durch anthropogene Einflüsse. Dies führt zu einer Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes, d. h. dass die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen die Rückstrahlung langwelliger Wärmestrahlung zur Erde verstärkt und immer weniger dieser Wärmestrahlung ins Weltall entweichen kann (<https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/fragen-zu-klima-faq/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt/>). Treibhausgasquellen sind beispielsweise fossile Energieträger wie Kohle und Gas. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe sorgt dafür, dass der Energiesektor mit circa 84,9% (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1>) im Jahr 2016 weltweit die größte Quelle anthropogener Treibhausgasemissionen, vornehmlich Kohlenstoffdioxid (CO₂), ist. Weitere anthropogene Emissionsquellen sind Verkehrsemissionen, Viehzucht, Güterproduktion und -transport, Ackerbau und Veränderungen der Landnutzungen.

Der hohe CO₂-Ausstoß übersteigt die Kapazität der natürlichen Kohlestoffsinken (vor allem Wälder und Ozeane), das zusätzlich emittierte CO₂ gänzlich zu binden bzw. in Biomasse umzuwandeln. In der Folge steigt die Sättigung der Atmosphäre mit Kohlenstoffdioxid, der Treibhauseffekt nimmt zu und das Erdklima erwärmt sich. Somit stehen der menschenverursachte Treibhausgasanstieg und die Erwärmung des Klimas unumstritten in direktem Bezug.

„Welche politischen Herausforderungen ergeben sich aus dieser Entwicklung?“

Nordrhein-Westfalen hat früh auf die Änderung des Klimas reagiert und schon 2009 eine Anpassungsstrategie entwickelt, die auf Basis des Klimaschutzgesetzes (2013) im Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen (2015) fortgesetzt und im Landesentwicklungsplan als Grundsatz aufgenommen wurde.

Die Landesregierung hält an dem Ziel fest, bis 2050 die Treibhausgas-Emissionen um mindestens 80 Prozent zu senken. Aus dem aktuellen Bericht des Weltklimarates geht hervor, dass die Folgen des Klimawandels nur mit der Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 Grad noch beherrschbar wären und selbst dann mit gravierenden Folgen zu rechnen sei.

Folgende Herausforderungen ergeben sich für die Landesregierung für den Bereich Anpassung an den Klimawandel:

1. Unterstützung Präventiver Maßnahmen

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Klimawandel muss in allen Politikfeldern und Gesellschaftsbereichen deutlich erhöht werden. Dafür müssen die Folgen von Klimaänderungen abgeschätzt werden, um geeignete Anpassungsmaßnahmen einzuleiten. Diese Anpassungsmaßnahmen müssen aufgrund der großen regionalen Unterschiede insbesondere auf der kommunalen und regionalen Ebene ansetzen. So ist es von großer Bedeutung, sich auf Extremwetterereignisse vorzubereiten. Dabei geht es vorrangig nicht um die nachträgliche Beseitigung von entstandenen Schäden, sondern darum, frühzeitig vorsorgend anzusetzen. Dafür gilt es sicherzustellen, dass Nordrhein-Westfalen in Zukunft besser gewappnet ist insbesondere für Starkregen und andere Extremwetterereignisse. Dabei ist die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung zum Teil eine ganz neue Herausforderung. Zum Teil besteht die Herausforderung aber auch darin, Anpassungserfordernisse in bereits bestehende Verfahren und geübte Abläufe zu integrieren.

2. Sensibilisierung von Bevölkerung und der (Kommunal-)Politik

Die konkrete Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen muss meist auf lokaler oder regionaler Ebene erfolgen. Kommunen spielen somit eine Schlüsselrolle darin, Lebens- und Arbeitsumfelder zu gestalten, die auch unter zukünftigen klimatischen Bedingungen eine hohe Lebensqualität gewährleisten. Dies stellt Kommunen vor große Herausforderungen. Diese liegen sowohl in der strukturellen Organisation als auch bei der Berücksichtigung klimatischer Belange in der Planung bei gleichzeitiger Nachfrage nach Wohnraum- und Gewerbeflächen.

Zur Unterstützung der Kommunen fördert die Landesregierung – insbesondere im Rahmen von Aufrufen und Wettbewerben – Einzelmaßnahmen zu Klimaschutz- und Klimafolgenanpassung und stellt Handbücher und Leitfäden zur Verfügung, wie Kommunen das Thema Klimaanpassung in ihre Entscheidungen und Planungen integrieren sollten. Im April 2018 fand der erste kommunale Klimaanpassungskongress in Düsseldorf statt. Mehr als 120 Teilnehmerinnen und Teilnehmer informierten sich dort zu „Kommunalen Konzepten“ und Best-Practice Beispielen. Diese Veranstaltung galt als Auftakt für insgesamt sechs Regionalforen zur Klimafolgenanpassung, die das MULNV gemeinsam mit den Bezirksregierungen, dem LANUV und der EnergieAgentur.NRW durchführt. Die Regionalforen decken die unterschiedlichen Räume in Nordrhein-Westfalen ab und orientieren sich an den Grenzen der Bezirksregierungen: Region Ostwestfalen-Lippe, Region Niederrhein, Region Aachen/Eifel, Region Südwestfalen, Region Münsterland. Zusätzlich soll es ein thematisches Forum speziell für die Großstädte in Nordrhein-Westfalen geben. Ziel ist es, breit über die Folgen des Klimawandels in den einzelnen NRW-Regionen sowie Handlungserfordernisse und –optionen zu informieren. Zwei Termine, in den Regionen Ostwestfalen-Lippe und Niederrhein,

haben bereits stattgefunden. Das nächste Regionalforum findet am 22. November 2018 in der Region Aachen/Eifel statt. Weitere folgen für die Regionen Münster und Arnsberg, sowie das spezielle Forum für die Großstädte in NRW in 2019. Darüber hinaus bietet die Landesregierung konkrete Beratungsmöglichkeiten an, z. B. auch die Unterstützung bei der Beantragung der Förderung von Klimakonzepten. In wenigen Wochen wird den Kommunen zusätzlich eine Förderung zur Teilnahme an einem Programm für interne Managementprozesse zur Klimaanpassung bereit stehen. Der Klimaanpassungsnetzwerker der EnergieAgentur.NRW leistet ebenfalls in unserem Auftrag Initialberatung und unterstützt bei der regionalen Kooperation in Anpassungsfragen.

3. Hilfen bei Extremwetterereignissen

Selbst wenn alle Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz ergriffen werden, sind in Folge schwerer Unwetterereignisse auch immer wieder erhebliche substantielle Schäden an privaten sowie öffentlichen Gebäuden und Infrastrukturen zu befürchten. Hier hat die Landesregierung den Bürgerinnen und Bürgern in den betroffenen Gebieten, denen der Abschluss einer entsprechenden Versicherung tatsächlich oder aufgrund ihrer wirtschaftlichen Verhältnisse nicht möglich war, mit einer Soforthilfe von der Landesregierung geholfen. Damit wurde eine erste Hilfe in akuten Notlagen geleistet.

4. Engagement auf nationaler und internationaler Ebene

Auch wenn die Folgen des Klimawandels sich konkret auf lokaler, regionaler Ebene bemerkbar machen, ist eine nationale bzw. internationale Abstimmung zu Anpassungsstrategien notwendig.

Insbesondere vor dem Hintergrund der Belastung der Landwirtschaft hat Nordrhein-Westfalen als Vorsitzland der Agrarministerkonferenz das Thema auf die Tagesordnung gesetzt. Ebenso beschäftigen sich die Umweltministerkonferenz, sowie die Verbraucherschutzministerkonferenz mit Möglichkeiten der Anpassung sowie Hilfen für Betroffene.

Um Anpassung an den Klimawandel auch gesetzlich zu verankern und damit eine höhere Verbindlichkeit herzustellen, ist eine Aufnahme in das derzeit in Erarbeitung befindliche Bundesklimaschutzgesetz anzustreben und mit den Ländern abzustimmen.

Auf der Weltklimakonferenz im Dezember 2018 im polnischen Katowice (COP 24) wird man sich neben dem Klimaschutz auch mit dem Thema Anpassung auseinandersetzen. Auf der Konferenz geht es zum einen darum die Detailregeln des Pariser Abkommens zu verabschieden, als auch darum stärkere Klimaschutzmaßnahmen in den Ländern anzustoßen. Ministerin Heinen-Esser nimmt an der COP 24 als Vertreterin der Umweltministerkonferenz teil. Für die

Landesregierung wird Minister Prof. Dr. Pinkwart hinsichtlich des Bereichs Klimaschutz ebenfalls teilnehmen.

5. Ruhrkonferenz

Aufgrund des großen Handlungsbedarfs sind Klimaanpassung und Grüne Infrastruktur derzeit Gegenstand unseres Themenforums bei der Ruhrkonferenz. Dem Schutz und der Entwicklung von Frei- und Grünflächen in städtischen Verdichtungsräumen muss bei allen künftigen städteplanerischen Entscheidungen weiterhin eine hohe Bedeutung beigemessen werden. Aktueller Anlass ist vor allem aber der Klimawandel. Grüne Infrastruktur wie Grünflächen oder auch begrünte Fassaden können nachweislich sommerliche Hitzepeaks abmildern und wirken insgesamt ausgleichend auf das Klima in verdichteten Ballungsräumen wie dem Ruhrgebiet. Dabei bieten sie zudem wichtige Lebensräume für die Tier- und Pflanzenwelt und verbessern die Lebensqualität für die Menschen.

Fazit: Die o. g. derzeitigen Initiativen des Landes gilt es fortzusetzen und angesichts der zunehmenden Bedeutung des Themas zu verstärken.

„Wie sind die Möglichkeiten der Landwirtschaft, sich auf Dürrejahre einzustellen?“

Vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden Klimaveränderung sind Anpassungsstrategien der Landwirtschaft an die Folgen des Klimawandels unverzichtbar, um Risiken und Schäden in landwirtschaftlichen Betrieben sowie negative Umweltwirkungen zu mindern.

Die Agrarministerkonferenz (AMK) hat am 28.09.2018 auf die Notwendigkeit zur Erarbeitung und Umsetzung konkreter Maßnahmen zur Klimaanpassung hingewiesen und eine eigene Agenda zur Klimaanpassung der Landwirtschaft und eine Einbeziehung dieser Thematik in die zukünftige Ackerbaustrategie des Bundes gefordert.

Der Umgang mit produktions- und marktbedingten Risiken ist dabei zuvorderst Aufgabe des landwirtschaftlichen Unternehmers. Der Staat kann dieses durch geeignete Rahmenbedingungen unterstützen.

Anpassungsmöglichkeiten bei vorbeugenden Maßnahmen wie

- angepasste Produktionsweise, hierzu gehören insbesondere Fruchtfolgegestaltung, Bodenbedeckung durch Anbau von Zwischenfrüchten, Auswahl angepasster Arten und Sorten,
- Diversifizierung im Anbau,
- Beregnungsmanagement und Beregnungsinfrastruktur sowie Erosionsschutz.
- In der Tierhaltung geht es vor allem um Zucht auf Robustheit, bauliche Maßnahmen im Stall zur Klimatisierung, Haltungssysteme und Wasserversorgung.

Obwohl ein zunehmendes Risiko für Wetterextreme wie Dürren festzustellen ist, bestehen in Deutschland dafür keine annehmbaren Versicherungsangebote am Markt.

In diesem Zusammenhang hat die AMK beschlossen, geeignete Rahmenbedingungen für ein klimaangepasstes Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft zu schaffen. Als Maßnahmen können die Etablierung über Fonds auf Gegenseitigkeit, Einkommensstabilisierungsinstrumente oder Mehrgefahrenversicherungen dienen. Der Bund wurde gebeten, eine Studie zu konkreten Varianten verschiedener Versicherungslösungen mit und ohne staatliche Bezuschussung in Auftrag zu geben.

„Welche Möglichkeiten bestehen für die Forstwirtschaft sich auf den Klimawandel einzustellen, wenn es für die Fichte, den Brotbaum der Forstwirtschaft, zunehmen schwerer wird zu bestehen. Wie weit reichen die Erkenntnisse, andere widerstandsfähigere Nadelbaumarten zu etablieren?“

Die Herausforderung des Klimawandels ist für die Forstwirtschaft nicht neu. So wurde bereits 2015 von der Landesregierung eine Anpassungsstrategie für Nordrhein-Westfalen zum Thema „Wald und Waldmanagement im Klimawandel“ erarbeitet. Priorität hatte hierbei die Erarbeitung eines neuen Waldbaukonzepts und eines Fachinformationssystems für den Wald. Diese neuen Instrumente für den Waldbesitz werden im Rahmen einer Fachveranstaltung des MULNV am 7.12.2018 in Düsseldorf öffentlich vorgestellt.

Von grundlegender und entscheidender Bedeutung sind die Standortgerechtigkeit und die Mischung geeigneter Baumarten. Daneben ist die Verwendung von geeignetem Vermehrungsgut und eine angepasste Bewirtschaftungsform (strukturierte Bestände, verkürzte Produktionszeit) wesentlich, um die waldbaulichen Risiken zu streuen bzw. zu reduzieren.

Grundsätzlich werden heimische Baumarten zum Anbau empfohlen. Eingeführte und standortgerechte Baumarten empfehlen sich im Hinblick auf die Klimaveränderung v. a. als Mischung.

Der Erhalt eines angemessenen Nadelholzanteils ist für die Forst- und Holzwirtschaft in Nordrhein-Westfalen von zentraler wirtschaftlicher Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die Fichte, die inzwischen nur noch einen Anteil von 30% der Waldfläche hat. Dort, wo die Fichte im Klimawandel nicht mehr standortgerecht ist, bieten sich außerhalb von Schutzgebieten je nach Standort alternativ Weißtanne, Douglasie, Küstentanne oder auch Lärche und Kiefer an. In der Regel sollte hierbei auch ein gewisser Laubholzanteil mit eingebracht werden.

Insbesondere die Douglasie stellt eine wirtschaftliche Alternative zur Fichte dar, da sie sich in der Praxis als überzeugend in ihrer Wuchs- und Wertleistung und ihrer Bestandesstabilität erwiesen hat. Die Douglasie ist zudem bodenpfleglich und nicht

übermäßig anfällig gegenüber biotischen und abiotischen Schadfaktoren. Nach über 100 Jahren Anbauerfahrung in Deutschland ist die Douglasie wie keine andere eingeführte Baumart wissenschaftlich untersucht.

„Gibt es neue Erkenntnisse für den Hochwasserschutz, in Bezug auf die sich ändernden Bedingungen?“

Erkenntnisse zu Klimaänderungen mit Auswirkungen auf den Hochwasserschutz werden durch die regelmäßige Bewertung der hydrologischen Grundlagendatensätze gewonnen. Allerdings lassen sich zu den hochwasserrelevanten Abflüssen noch keine so gesicherten Erkenntnisse für den Vollzug in Nordrhein-Westfalen ableiten, dass sie unmittelbare Auswirkungen auf die Dimensionierung und Bemessung von Hochwasserschutzanlagen haben. Es besteht diesbezüglich innerhalb der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) ein enger Austausch mit den anderen Bundesländern, zusätzlich im Rheineinzugsgebiet auch mit den benachbarten Niederlanden. Mit den alle sechs Jahre fortzuschreibenden Elementen der Hochwasserrisikomanagementplanung (Bewertung der Hochwassergefährdung, Aktualisierung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikomanagementplänen) werden auch explizit notwendige Anpassungen auf Grund von Klimaänderungen geprüft.

Literaturüberblick zum anthropogenen Klimawandel

Als Anlage beigefügt ist ferner ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand zum anthropogenen Klimawandel mit Literaturangaben auf Basis einer Auswertung des LANUV.

Literaturüberblick zum anthropogenen Klimawandel

Einführung

Dieser Literaturüberblick gibt einen Einblick über den Forschungsstand zum anthropogenen Klimawandel. Zunächst werden im Absatz „Allgemeiner Kenntnisstand“ die wichtigsten Zusammenfassungen zum Thema genannt, worunter die Berichte des Weltklimarates (Intergovernmental Panels on Climate Change, IPCC) zentrale Bedeutsamkeit besitzen. Darunter werden auch einzelne Studien kurz vorgestellt, die nach fachlicher Einschätzung besonders klar auf die Folgen eines ungebremsen, aber auch zum Teil eines innerhalb der in Paris 2015 vereinbarten Klimaziele liegenden anthropogenen Klimawandels aufmerksam machen. Anschließend werden anhand aktueller Veröffentlichungen Studien zu speziellen Sachverhalten vorgestellt.

Allgemeiner Kenntnisstand – die Arbeit des IPCC als Faktenbasis

Einen sehr guten ersten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung (2012) gibt die Zusammenfassung (IPCC 2014) für Entscheidungsträger des Fünften Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Ergänzend hierzu ist auch der Fünfte Sachstandsbericht selbst zu nennen (IPCC 2013), der insbesondere auch ein wichtiges Grundlagen- und Nachschlagewerk darstellt. Insgesamt bieten die Berichte des IPCC, die eher konservativ gehalten sind, einen verlässlichen Überblick über den Stand der Forschung und kommunizieren explizit, wie belastbar welche Aussagen zum anthropogenen Klimawandel sind, inwieweit methodische Schwächen bestehen und wo noch geforscht werden muss.

Weitere Berichte als Ergänzung zum 5. Sachstandsbericht des IPCC

Einen aktuelleren Überblick (2016) über den anthropogenen Klimawandel, allerdings mit Fokus auf Nord- und Südamerika, gibt der 2017 erschienene Bericht des amerikanischen Global Change Research Program, der als Zusammenfassung (Wuebbles et al. 2017) und Langfassung (USGCRP 2017) vorliegt. Dieser Bericht ist nach dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013) bisher die umfangreichste Veröffentlichung zum anthropogenen Klimawandel.

Zusätzlich hat die britische Royal Society im Zuge der 23. UN-Klimakonferenz, die 2017 in Bonn stattfand, eine Aktualisierung zum 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013) veröffentlicht, wo viele zentrale Punkte des 5. Sachstandsberichtes bestätigt wurden (Royal Society 2017).

Wichtige jährliche Berichte zur Einordnung aktueller Jahrestrends

Die World Meteorological Organization (WMO) gibt jährliche Reporte zum Zustand des weltweiten Klimas heraus (vgl. World Meteorological Organization (WMO) 2017, 2018),

genauso wie die American Meteorological Society (vgl. Blunden und Arndt 2017; Herring et al. 2017). Dort werden auch extreme Wetterereignisse, wie zum Beispiel Hurrikan Harvey oder die extreme Dürre in der Kapregion Südafrikas, auf ihren Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel besprochen. All diese jährlich erscheinenden Berichte geben sehr detaillierte und belastbare Daten und Fakten über die Entwicklung des globalen Klimas.

Deutsche Quellen

Die Homepage des Deutschen Klima Konsortiums, bestehend aus den renommiertesten Wissenschaftseinrichtungen Deutschlands, fasst auf Deutsch unter Klimafakten (<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klima-themen.html>) zahlreiche Hintergrundinformationen zusammen, darunter auch die wichtigsten Fakten des 5. Sachstandsberichtes des IPCC (IPCC 2013).

Auch das Umweltbundesamt bietet auf seiner Homepage zum Klimawandel (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel>) ebenfalls zahlreiche fundierte Informationen zum anthropogenen Klimawandel. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) gibt auf seinen Internetseiten ebenfalls zahlreiche gute und vor allem leicht verständliche allgemeine Informationen zum anthropogenen Klimawandel

(https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick_node.html) und liefert darüber hinaus auch weitere Informationen zum bereits eingetretenen anthropogenen Klimawandel

(https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaueberwachung/klimaueberwachung_node.html) und den zu erwartenden Klimaveränderungen (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_home_node.html). Nicht zuletzt können die bereits eingetretene sowie mögliche zukünftige Klimaentwicklung für Deutschland im Deutschen Klimaatlas des DWD visualisiert werden (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html).

Für Nordrhein-Westfalen bietet das LANUV NRW mit seinen Fachinformationssystemen www.klimaatlas.nrw.de und www.klimafolgenmonitoring.nrw.de weitere Karten und Zeitreihen zum Klimawandel an.

Einzelne Publikationen mit deutlichen Warnungen vor den Folgen von zu geringem Klimaschutz

Mittlerweile gibt es zahlreiche ergänzende Publikationen zum 5. und aktuellen Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013), deren Warnungen vor einem Nichteinhalten der Klimaziele von Paris immer deutlicher formuliert werden. Eine übersichtliche Zusammenfassung über die Notwendigkeit zur Erhaltung des 2 °C (besser 1,5 °C) – Ziels des Paris-Abkommens von 2015 bzw. über die möglichen Risiken der Nichteinhaltung dieses Ziels -gibt auch das Papier der NGOs Future Earth und Earth League mit dem Titel „The 10 Science ‚Must Knows‘ on Climate Change“ (Earth League

and Future Earth 2017), wo die wichtigsten Fakten inkl. Literaturangaben der relevantesten Studien dargestellt sind. Dieses Papier beruht auch auf der detaillierteren Veröffentlichung von Schellnhuber et al. 2016, welche dezidiert davor warnt, den ‚sicheren Betriebskorridor‘ des Klimasystems für die Menschheit, dem 2 °C bzw. dem 1,5 °C-Ziel von Paris, zu verlassen. Innerhalb dieses Korridors werden die Folgen des anthropogenen Klimawandels als für die globale Gemeinschaft gerade noch handhabbar beschrieben, auch wenn noch zahlreiche Unsicherheiten darüber bestehen, ob dies auch wirklich der Fall ist.

Innerhalb dieses Korridors werden wahrscheinlich die meisten Kippelemente im Klimasystem, den sogenannten „tipping points“ noch nicht aktiviert, was zu plötzlichen und dramatischen Veränderungen auf der Erde (z.B. dem totalen Kollaps des Grönlandeisschildes oder massiver Methanausgasung durch fortgeschrittenen Permafrostschwund), die eine unkontrollierbare Selbstverstärkung des anthropogenen Klimawandels zur Folge haben werden.

„Heißzeit“-Studie unter Mitarbeit des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung

In einer kürzlich erschienenen Studie, an dem das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung beteiligt ist, stellen Steffen et al. 2018 nochmals deutlich die Gefahren eines Verfehlens des 2 °C bzw. 1,5 °C-Ziels dar, zu welchem sich die Staaten im Jahr 2015 in Paris verpflichtet haben. Aufbauend auf zahlreichen neueren Studien als im 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013), mit aktualisierten Erkenntnissen, gehen Steffen et al. 2018 weiter als Schellnhuber et al 2016 und diskutieren die Möglichkeit, dass unser Klimasystem selbst bei der Einhaltung des 2 °C-Ziels von Paris durch die Aktivierung der bekannten Kippelemente im Klimasystem in eine neuartige „Heißzeit“ rutschen könne. Mit einer „Heißzeit“ bezeichnen die Autoren Klimabedingungen, wie sie es zuletzt vor 55 Millionen Jahren gab, als der CO₂-Gehalt bei dem dreifachen des aktuellen Wertes lag und die Temperaturen auf der Erde 9 bis 14 Kelvin wärmer waren als in der vorindustriellen Zeit (1850-1899/1900). Durch das Anstoßen von verschiedenen Kippelementen schon bei aktuellen Temperaturen, spätestens in Reichweite von 2°C gegenüber dem Temperaturniveau der vorindustriellen Zeit, so warnen die Autoren, könnten Kaskaden von Kippelementen analog zu Dominosteinen ausgelöst werden und so die Klimaerwärmung durch Rückkopplungseffekte weiter anfachen. Daher drängen Steffen et al 2018 auch auf eine Begrenzung der anthropogenen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C (1,5 °C), wofür auch die breite Fachwelt plädiert.

Weitere Studien zur Verdeutlichung der Größenordnung des menschlichen Eingriffs in die Atmosphäre

Betrachtet man die Geschwindigkeit, mit der die Menschheit das für den anthropogenen Treibhauseffekt wichtigste Treibhausgas Kohlendioxid in der Vergangenheit emittiert hat, so gibt es in den letzten 66 Millionen Jahren kein vergleichbares Ereignis in

geologischer Zeit, welches der menschlichen Kohlendioxid (CO₂) - Emission gleichkommt (Zeebe et al. 2016), auch nicht durch Kometeneinschläge oder massive Vulkanausbrüche (vgl. Gutjahr et al. 2017). Tatsächlich warnen Foster et al. 2017, dass der Mensch, sollte er auch bis in die Zeit bis 2250 beim „Weiter-wie-bisher“ CO₂-Ausstoß bleiben, den CO₂-Gehalt der Atmosphäre bis auf das Niveau von vor über 220 – 200 Millionen anheben wird.

Um die in Paris vereinbarten Klimaziele noch zu erreichen, muss so früh und ambitioniert wie möglich eine Dekarbonisierung der Wirtschaft erfolgen. Je eher damit wirklich begonnen wird, desto einfacher und kostengünstiger wird es für die Gesellschaft werden, die schlimmsten Folgen des anthropogenen Klimawandels abzuwenden (Figueres et al. 2017). Es bleibt nur noch wenig Zeit, das 2 °C-Ziel von Paris 2015 zu erreichen, bevor ein „Punkt ohne Rückkehr“ dafür erreicht wird (Aengenheyster et al. 2018).

Natürlicher Klimawandel und anthropogener Klimawandel

In manchen öffentlichen Debatten wird versucht, den derzeitigen anthropogenen Klimawandel zu relativieren, in dem der anthropogene Klimawandel mit den Klimaschwankungen der letzten 12.000 Jahre (Holozän) verglichen wird. Dabei wird darauf verwiesen, dass es in den letzten 12.000 Jahren schon wärmer als jetzt gewesen sei. Einzelfallstudien von Temperaturrekonstruktionen aus Höhlen in Nordrhein-Westfalen sollen dabei belegen, dass sich das Klima genauso abrupt geändert hatte, wie es zurzeit zu beobachten ist. Anhand von diesen sehr lokalen Studien werden Aussagen über die globale Klimageschichte geschlussfolgert.

Kapitel 5, Tabelle 5.1 des aktuellen IPCC-Berichtes (IPCC 2013) gibt einen guten Überblick zu Studien über die Klimageschichte der Erde, die bis zur Kreide/Tertiär-Grenze zurückreicht. Dabei beziehen sich die Autoren des IPCC-Berichtes auf groß angelegte Metastudien zahlreicher Klimarekonstruktionen, die aus unterschiedlichsten Archiven kommend gründlich geprüft und dann verknüpft wurden. Diese Datensätze sind wissenschaftlich belastbarer. Auch wenn es in der Klimageschichte immer wieder abrupte Schwankungen gegeben hat, so ist der derzeitige Klimawandel in seiner Magnitude und Geschwindigkeit nicht vergleichbar, insbesondere nicht mit Temperaturschwankungen innerhalb der aktuellen Warmzeit, also des Holozäns und den letzten 20.000 Jahren (Björck 2011; IPCC 2013; Marcott et al. 2013; Mann et al. 2008). Der Übergang von der letzten Eiszeit zum Holozän ging mit 0,3 - 0,8 Kelvin pro 1.000 Jahren vonstatten. Nun hat sich, bereits von einer natürlichen Warmzeit ausgehend, seit 1881 die globale Temperatur (Land und Ozeane) mit einem Trend von 0,7 Kelvin in 100 Jahren (Datenquelle: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>) erhöht. Ab 1970 hat sich der Trend der Erwärmung noch einmal deutlich verstärkt, was einer Steigerung der Temperaturänderung von dem 10-fachen hin zum ungefähr 20-fachen

gegenüber dem Ende der letzten Eiszeit bedeutet, und das von einer Warmzeit ausgehend.

Ursachen früherer Klimaschwankungen der letzten 2,5 Millionen Jahre

Seit dem Beginn der Eiszeiten, dem Erdzeitalter des Pleistozäns, schwankte der CO₂-Gehalt auf einem deutlich geringeren Niveau wie heute (Lüthi et al. 2008; Bereiter et al. 2015), nämlich zwischen 172–300 ppm. Abbildung 6.6 in Kapitel 6 des aktuellen IPCC-Berichtes (IPCC 2013) zeigt für das gesamte Holozän eindeutig stabile CO₂-Konzentrationen zwischen 260 - 270 ppm bis 6.000 Jahre vor heute, gefolgt von leicht ansteigenden Konzentrationen bis knapp 285 ppm in vorindustrieller Zeit. Sämtliche Warmphasen der letzten 2,5 Mio. Jahre wurden durch Schwankungen der Erdbahnparameter ausgelöst und durch sekundäre CO₂-Schwankungen verstärkt (Past Interglacials Working Group of PAGES 2016). Während des Holozäns waren die Klimaschwankungen erheblich weniger dramatisch im Vergleich zu den Wechseln zwischen Warm- und Eiszeiten (Marcott et al. 2013). Die holozänen Klimaschwankungen wurden primär durch Schwankungen der Sonnenaktivität und Aerosole durch Vulkanausbrüche ausgelöst, wobei klimainterne Wechselwirkungen lokal bis regional für durchaus starke Temperaturanstiege gesorgt haben. Aber es gibt keine globalen Signale eines ähnlich starken Temperaturanstieges während der letzten 20.000 Jahre, die vergleichbar sind mit dem derzeit stattfindenden anthropogenen Klimawandel (Björck 2011), der eine unmittelbare Folge des starken Treibhausgasausstoßes durch die Menschen ist (Zeebe et al. 2016; IPCC 2014; Foster et al. 2017).

Die Wirkung von CO₂ als wichtigstes Treibhausgas

Die Treibhauswirksamkeit von CO₂ wurde bereits durch Fourier (Fourier 1827) und Tyndall (Tyndall 1861) nachgewiesen. Der gesamte Treibhauseffekt und die zentrale Rolle von CO₂ wurde von Arrhenius (Arrhenius 1896) für die damalige Zeit extrem gut beschrieben. Einen späteren Überblick über die Klimawirksamkeit von CO₂ wurde von (Hansen et al. 1981)) geliefert. Dort steht auch genau beschrieben, dass dieses Treibhausgas durch seine Absorptionsbänder im Frequenzbereich der größten Infrarot-Rückstrahlung der Erde auch als Spurengas so wirksam ist. Das teilweise angeführte Argument, dass der Absorptionseffekt von CO₂ schon gesättigt bzw. „saturiert“ sei, beruht auf einem Experiment von Ångström über das Absorptionsverhalten von CO₂ im Infrarotbereich (Ångström 1900), welches in einem 30 cm langem Glaszylinder durchgeführt wurde. Innerhalb dieses Glaszylinders bzw. im einfachen Versuchsaufbau trifft das „Saturierungs-Argument“ zu, weshalb die bahnbrechende Arbeit von Arrhenius für längere Zeit als widerlegt schien. Allerdings führten später Studien des US-Militär während des Kalten Krieges zu der Bestätigung von Arrhenius. Hierzu gibt es zahlreiche Studien und Quellen, die auf der Plattform „The Discovery of Global Warming“ (<https://history.aip.org/climate/index.htm>) umfassend dargestellt sind. Kürzere

Zusammenfassungen gibt es beim Portal „Real Climate“ (<http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument>) sowie auf „CO₂-Earth“ (<https://de.co2.earth/1820-1930-fourier-to-arrhenius>), welche von Klimawissenschaftlern betrieben werden. Tatsächlich steigt die Treibhausgaswirkung von CO₂ mit steigender Konzentration weiter an. Durch den Aufbau der Atmosphäre wirkt der Treibhauseffekt von CO₂ gerade in den obersten Schichten besonders effektiv, weil es dort sehr trocken und sehr kalt ist, so dass Energie in Form von Infrarotstrahlung nur sehr begrenzt abgegeben werden kann.

Literaturverzeichnis

Aengenheyster, Matthias; Feng, Qing Yi; van der Ploeg, Frederik; Dijkstra, Henk A. (2018): Risk and the Point of No Return for Climate Action. In: *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, S. 1–26. DOI: 10.5194/esd-2018-17.

Ångström, Knut (1900): Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. In: *Ann. Phys.* 308 (12), S. 720–732. DOI: 10.1002/andp.19003081208.

Arnell, Nigel W.; Lowe, Jason A.; Lloyd-Hughes, Ben; Osborn, Timothy J. (2018): The impacts avoided with a 1.5 °C climate target. A global and regional assessment. In: *Climatic Change* 147 (1), S. 61–76. DOI: 10.1007/s10584-017-2115-9.

Arrhenius, Svante (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: *Philosophical Magazine and Journal of Science* (Series 5, Volume 41), S. 237–276. Online verfügbar unter http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2017.

Baker, Jonathan L.; Lachniet, Matthew S.; Chervyatsova, Olga; Asmerom, Yemane; Polyak, Victor J. (2017): Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing. In: *Nature Geosci* 10, 430 EP -. DOI: 10.1038/ngeo2953.

Bereiter, Bernhard; Eggleston, Sarah; Schmitt, Jochen; Nehrbass-Ahles, Christoph; Stocker, Thomas F.; Fischer, Hubertus et al. (2015): Revision of the EPICA Dome C - CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. In: *Geophys. Res. Lett.* 42 (2), S. 542–549. DOI: 10.1002/2014GL061957.

Björck, S. (2011): Current global warming appears anomalous in relation to the climate of the last 20000 years. In: *Clim. Res.* 48 (1), S. 5–11. DOI: 10.3354/cr00873.

Blunden, Jessica; Arndt, Derek S. (2017): State of the Climate in 2016. Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society. Unter Mitarbeit von Jessica Blunden und Derek S. Arndt. Hg. v. American Meteorological Society. American Meteorological Society (Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 98, No. 8,), zuletzt geprüft am 14.11.2017.

Dowsett, Harry J.; Chandler, Mark A.; Robinson, Marci M. (2009): Surface temperatures of the Mid-Pliocene North Atlantic Ocean. Implications for future climate. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367 (1886), S. 69. DOI: 10.1098/rsta.2008.0213.

Dowsett, Harry J.; Robinson, Marci M.; Haywood, Alan M.; Hill, Daniel J.; Dolan, Aisling M.; Stoll, Danielle K. et al. (2012): Assessing confidence in Pliocene sea surface temperatures to evaluate predictive models. In: *Nature Climate Change* 2, 365 EP -. DOI: 10.1038/nclimate1455.

Earth League and Future Earth (2017): The 10 Science 'Must Knows' on Climate Change. Online verfügbar unter http://www.the-earth-league.org/uploads/2/4/5/9/24599880/the_10_science_must_knows_on_climate_change.pdf, zuletzt geprüft am 14.11.2017.

Figueres, Christiana; Schellnhuber, Hans Joachim; Whiteman, Gail; Rockström, Johan; Hobley, Anthony; Rahmstorf, Stefan (2017): Three years to safeguard our climate. In: *Nature* 546 (7660), S. 593–595. DOI: 10.1038/546593a.

Fischer, E. M.; Knutti, R. (2015): Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. In: *Nature Climate Change* 5, 560 EP -. DOI: 10.1038/nclimate2617.

Foster, Gavin L.; Royer, Dana L.; Lunt, Daniel J. (2017): Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. In: *Nature communications* 8, S. 14845. DOI: 10.1038/ncomms14845.

Fourier, J. B. J. (1827): Memoire Sur Les Températures Du Globe Terrestre ·Et Des Espaces Planétaires. In: *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (7), S. 569–604.

Geden, Oliver (2018): Politically informed advice for climate action. In: *Nature Geosci* 11 (6), S. 380–383. DOI: 10.1038/s41561-018-0143-3.

Graham, Robert M.; Cohen, Lana; Petty, Alek A.; Boisvert, Linette N.; Rinke, Annette; Hudson, Stephen R. et al. (2017): Increasing frequency and duration of Arctic winter warming events. In: *Geophys. Res. Lett.* 44 (13), S. 6974–6983. DOI: 10.1002/2017GL073395.

Gutjahr, Marcus; Ridgwell, Andy; Sexton, Philip F.; Anagnostou, Eleni; Pearson, Paul N.; Pälike, Heiko et al. (2017): Very large release of mostly volcanic carbon during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum. In: *Nature* 548, 573 EP -. DOI: 10.1038/nature23646.

Hansen, J.; Johnson, D.; Lacis, A.; Lebedeff, S.; Lee, P.; Rind, D.; Russell, G. (1981): Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. In: *Science (New York, N.Y.)* 213 (4511), S. 957–966. DOI: 10.1126/science.213.4511.957.

Hansen, James; Sato, Makiko; Kharecha, Pushker; Schuckmann, Karina von; Beerling, David J.; Cao, Junji et al. (2017): Young people's burden. Requirement of negative CO₂ emissions. In: *Earth Syst. Dynam.* 8 (3), S. 577–616. DOI: 10.5194/esd-8-577-2017.

Hansen, James E.; Sato, Makiko (2012): Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change. Unter Mitarbeit von André Berger, Fedor Mesinger und Djordje Sijacki. In: André Berger/Fedor Mesinger/Djordje Sijacki (Hg.): *Climate Change. Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects. Conference proceedings.* Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-7091-0973-1_2#citeas.

Herring, Stephanie C.; Christidis, Nikolaos; Hoell, Andrew; Kossin, James P.; Schreck III, Carl J.; Stott, Peter A. (Hg.) (2017): EXPLAINING EXTREME EVENTS OF 2016 FROM A CLIMATE PERSPECTIVE. American Meteorological Society (Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society, 98), zuletzt geprüft am 15.12.2017.

Hulbe, Christina (2017): Is ice sheet collapse in West Antarctica unstoppable? In: *Science (New York, N.Y.)* 356 (6341), S. 910–911. DOI: 10.1126/science.aam9728.

IMBIE (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. In: *Nature* 558 (7709), S. 219–222. DOI: 10.1038/s41586-018-0179-y.

IPCC (Hg.) (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press. Online verfügbar unter

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html, zuletzt geprüft am 13.10.2017.

IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change []. Unter Mitarbeit von Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken et al. Hg. v. Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, et al. IPCC. Cambridge, UK,. Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf.

IPCC (Hg.) (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. Unter Mitarbeit von Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Unter Mitarbeit von R. K. Pachauri und L. A. (Hrsg) Meyer. Hg. v. IPCC. IPCC Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. Bonn. Online verfügbar unter http://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf.

Jevrejeva, Svetlana; Jackson, Luke P.; Riva, Riccardo E. M.; Grinsted, Aslak; Moore, John C. (2016): Coastal sea level rise with warming above 2 °C. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (47), S. 13342–13347. DOI: 10.1073/pnas.1605312113.

Khanna, Pankaj; Droxler, André W.; Nittrouer, Jeffrey A.; Tunnell, John W.; Shirley, Thomas C. (2017): Coralgall reef morphology records punctuated sea-level rise during the last deglaciation. In: *Nature communications* 8 (1), S. 1046. DOI: 10.1038/s41467-017-00966-x.

Liu, Zhengyu; Zhu, Jiang; Rosenthal, Yair; Zhang, Xu; Otto-Bliesner, Bette L.; Timmermann, Axel et al. (2014): The Holocene temperature conundrum. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (34), E3501. DOI: 10.1073/pnas.1407229111.

Lüthi, Dieter; Le Floch, Martine; Bereiter, Bernhard; Blunier, Thomas; Barnola, Jean-Marc; Siegenthaler, Urs et al. (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. In: *Nature* 453, 379 EP -. DOI: 10.1038/nature06949.

Mann, Michael E.; Rahmstorf, Stefan; Kornhuber, Kai; Steinman, Byron A.; Miller, Sonya K.; Coumou, Dim (2017): Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. In: *Scientific reports* 7, S. 45242. DOI: 10.1038/srep45242.

Mann, Michael E.; Zhang, Zhihua; Hughes, Malcolm K.; Bradley, Raymond S.; Miller, Sonya K.; Rutherford, Scott; Ni, Fenbiao (2008): Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (36), S. 13252–13257. DOI: 10.1073/pnas.0805721105.

Marcott, Shaun A.; Shakun, Jeremy D.; Clark, Peter U.; Mix, Alan C. (2013): A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. In: *Science (New York, N.Y.)* 339 (6124), S. 1198–1201. DOI: 10.1126/science.1228026.

MARGO Project (2009): Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum. In: *Nature Geosci* 2, 127 EP -. DOI: 10.1038/ngeo411.

Marsicek, Jeremiah; Shuman, Bryan N.; Bartlein, Patrick J.; Shafer, Sarah L.; Brewer, Simon (2018): Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures. In: *Nature* 554, 92 EP -. DOI: 10.1038/nature25464.

Millar, Richard J.; Fuglestedt, Jan S.; Friedlingstein, Pierre; Rogelj, Joeri; Grubb, Michael J.; Matthews, H. Damon et al. (2017): Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. In: *Nature Geosci* 10 (10), S. 741–747. DOI: 10.1038/ngeo3031.

Mora, Camilo; Dousset, Bénédicte; Caldwell, Iain R.; Powell, Farrah E.; Geronimo, Rollan C.; Bielecki, Coral R. et al. (2017): Global risk of deadly heat. In: *Nature Climate change* 7 (7), S. 501–506. DOI: 10.1038/nclimate3322.

Moss, Richard H.; Edmonds, Jae A.; Hibbard, Kathy A.; Manning, Martin R.; Rose, Steven K.; van Vuuren, Detlef P. et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: *Nature* 463 (7282), S. 747–756. DOI: 10.1038/nature08823.

Nerem, R. S.; Beckley, B. D.; Fasullo, J. T.; Hamlington, B. D.; Masters, D.; Mitchum, G. T. (2018): Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*. DOI: 10.1073/pnas.1717312115.

Nicholls, Robert J.; Marinova, Natasha; Lowe, Jason A.; Brown, Sally; Vellinga, Pier; Gusmão, Diogo de et al. (2011): Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369 (1934), S. 161. DOI: 10.1098/rsta.2010.0291.

Nissen, K. M.; Ulbrich, U. (2017): Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17 (7), S. 1177–1190. DOI: 10.5194/nhess-17-1177-2017.

Past Interglacials Working Group of PAGES (2016): Interglacials of the last 800,000 years. In: *Reviews of Geophysics* 54 (1), S. 162–219. DOI: 10.1002/2015RG000482.

Petoukhov, V.; Rahmstorf, S.; Petri, S.; Schellnhuber, H. J. (2013): Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (14), S. 5336–5341. DOI: 10.1073/pnas.1222000110.

Petoukhov, Vladimir; Petri, Stefan; Rahmstorf, Stefan; Coumou, Dim; Kornhuber, Kai; Schellnhuber, Hans Joachim (2016): Role of quasiresonant planetary wave dynamics in recent boreal spring-to-autumn extreme events. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (25), S. 6862–6867. DOI: 10.1073/pnas.1606300113.

Rignot, E.; Mouginot, J.; Morlighem, M.; Seroussi, H.; Scheuchl, B. (2014): Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. In: *Geophys. Res. Lett.* 41 (10), S. 3502–3509. DOI: 10.1002/2014GL060140.

Royal Society (2017): Climate updates. What have we learnt since the IPCC 5th Assessment Report? Hg. v. The Royal Society. The Royal Society. London. Online verfügbar unter www.royalsociety.org/climate-change.

Schellnhuber, Hans Joachim; Rahmstorf, Stefan; Winkelmann, Ricarda (2016): Why the right climate target was agreed in Paris. In: *Nature Climate Change* 6 (7), S. 649–653. DOI: 10.1038/nclimate3013.

Steffen, Will; Rockström, Johan; Richardson, Katherine; Lenton, Timothy M.; Folke, Carl; Liverman, Diana et al. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

Stott, Peter A.; Christidis, Nikolaos; Otto, Friederike E. L.; Sun, Ying; Vanderlinden, Jean-Paul; van Oldenborgh, Geert Jan et al. (2015): Attribution of extreme weather and climate-related events. In: *WIREs Clim Change* 7 (1), S. 23–41. DOI: 10.1002/wcc.380.

Tyndall, J. (1861): On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, Conduction.-The Bakerian Lecture. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* Series 4 (Vol. 22), S. 169–194.

USGCRP (2017): Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I. Hg. v. Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock. U.S. Global Change Research Program. Washington, DC. Online verfügbar unter https://science2017.globalchange.gov/downloads/CSSR2017_FullReport.pdf.

Watts, Nick; Amann, Markus; Ayeb-Karlsson, Sonja; Belesova, Kristine; Bouley, Timothy; Boykoff, Maxwell et al. (2017): The Lancet Countdown on health and climate change. From 25 years of inaction to a global transformation for public health. In: *The Lancet*. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32464-9.

World Meteorological Organization (WMO) (Hg.) (2017): WMO statement on the state of the global climate in 2016. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland (WMO).

World Meteorological Organization (WMO) (2018): WMO Statement on the state of the global climate in 2017. Hg. v. World Meteorological Organization (WMO). World Meteorological Organization. Online verfügbar unter https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

Wuebbles; J, D.; D.W. Fahey; K.A. Hibbard; B. DeAngelo; S. Doherty et al. (2017): Executive Summary of the Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I. Hg. v. D. J. Wuebbles, D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart und T. K. Maycock. U.S. Global Change Research Program. Washington, DC. Online verfügbar unter <https://www.globalchange.gov/browse/reports/climate-science-special-report-fourth-national-climate-assessment-nca4-volume-i>.

Xu, Yangyang; Ramanathan, Veerabhadran (2017): Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. DOI: 10.1073/pnas.1618481114.

Ye, Hengchun; Fetzer, Eric J.; Wong, Sun; Lambrigtsen, Bjorn H. (2017): Rapid decadal convective precipitation increase over Eurasia during the last three decades of the 20th century. In: *Science Advances* 3 (1). DOI: 10.1126/sciadv.1600944.

Zachos, J.; Pagani, M.; Sloan, L.; Thomas, E.; Billups, K. (2001): Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. In: *Science (New York, N.Y.)* 292 (5517), S. 686–693. DOI: 10.1126/science.1059412.

Zeebe, Richard E.; Ridgwell, Andy; Zachos, James C. (2016): Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. In: *Nature Geosci* 9 (4), S. 325–329. DOI: 10.1038/ngeo2681.