

Dietrich Spänkuch (MLS)

Auswirkungen des Klimawandels auf Natur und Gesellschaft in Europa*

„Der Klimawandel ist nicht nur eine umweltpolitische Angelegenheit von äußerster Dringlichkeit, sondern zugleich die größte soziale Herausforderung der Moderne.“ H. Welzer (1)

1. Einleitung

Der Klimawandel ist nicht das einzige dringend zu lösende globale Problem. Die Vereinten Nationen listeten 2014 sechzehn globale Probleme auf (2). Aus europäischer Sicht sind einige dieser Probleme nicht relevant, dafür sind aber andere hinzuzufügen (3), (Tab. 1). Die Aussage der Existenz einer Vielzahl globaler Probleme ist trivial, nicht aber ihre Konsequenzen. Beschränkte Mittel und Kräfte lassen nur bedingt Lösungen zu, auch wenn zum Teil beträchtliche Synergieeffekte bestehen. Die UN nimmt daher auch keine Rangordnung vor.

Der Klimawandel nimmt in der Problemliste eine Sonderstellung ein. Ursache und Wirkung sind entkoppelt, weil sie sowohl räumlich als auch zeitlich getrennt sind. Die Wirkung einer klimabeeinflussenden Tätigkeit macht sich zeitlich verzögert, oft erst nach Jahrzehnten und Jahrhunderten, spürbar bemerkbar. Der Klimawandel „ist eine *gewusste, jedoch nicht gefühlte Katastrophe*“ (1), die zu mangelndem Verantwortungsbewusstsein führt. Auch wird beim Klimawandel gelegentlich von Gewinnern und Verlierern gesprochen, wobei als Gewinn z.B. auf die ganzjährige Schiffbarkeit der Nordostpassage oder die polwärtige Ausdehnung von Anbauflächen verwiesen wird, wohingegen bei den übrigen Problemen nur Gewinner zu verzeichnen wären, wenn man von solchen sozialen Randgruppen wie korrupten Eliten absieht. Die Gewinn-/Verlustdiskussion ist äußerst kurzfristig und

* Erweiterte Fassung des Vortrags auf dem Kolloquium „Klima und Menschheit“, Berlin 14.04.2016.

lässt die gravierenden Langzeitänderungen des Klimawandels völlig außer Acht (4, 5).

Aussagen über zukünftige Entwicklungen sind per se mit großen Unsicherheiten behaftet (Abb. 1). Das IPCC (6) hat bei Abschätzungen möglicher Entwicklungen von Bevölkerungswachstum, technischem Fortschritt, politischen und sozioökonomischen Faktoren Emissionsszenarien (RCPs: Representative Concentration Paths) für die Treibhausgase abgeleitet, mit denen die zu erwarteten Klimaänderungen abgeschätzt werden können (Tab. 2). Die Emissionsszenarien des 5. Sachstandsberichts des IPCC reichen von wirksamen Maßnahmen zur Emissionsminderung (RCP 2.6 mit einem

Tab. 1: Globale Probleme (nach (2) und (3))^a

Ungerechte Sozialsysteme
Schlechte medizinische Versorgung
Mangelnde Hygiene
Hunger
Verbrechen
Energieversorgung
Fehlende Infrastruktur
Klimawandel
Ungleichheit zwischen Mann und Frau
Kein Zugang zu Telefon und Internet
Zerstörte Umwelt
Politische Verfolgung
Schlechte Bildung
Diskriminierung
Arbeitslosigkeit
Diktatorische und korrupte Regierungen
<i>Internationaler Terrorismus</i>
<i>Bewaffnete Konflikte</i>
<i>Weltweite Wirtschaftskrise</i>
<i>Verbreitung ansteckender Krankheiten</i>
<i>Verbreitung von Nuklearwaffen</i>
<i>Bevölkerungswachstum</i>

a – Die ersten 16 gelisteten Probleme nach UN (2), die kursiv gedruckten Probleme nach Umfragen in der EU (3).

Strahlungsantrieb von $2,6 \text{ W/m}^2$ zum Ende des Jahrhunderts) bis zum Szenario 8.5 (Strahlungsantrieb $8,5 \text{ W/m}^2$) bei unvermindertem Anstieg der Treibhausgasemissionen. RCP2.6 erfordert entweder erhebliche sofortige Emissionsreduzierung um 40 bis 70% mit nachfolgender Nullemission oder beträchtliche negative Emissionen von etwa $2 \text{ GtCO}_2/\text{Jahr}$ um 2100 bei geringerer Emissionsreduzierung (6). Aber selbst diese Maßnahmen reichen wahrscheinlich nicht aus, die Erwärmung unter 2°C zu halten (IPCC (6): „more unlikely than likely“).

Tab. 2: Emissionsszenarien des 5. IPCC-Sachstandberichts mit erwarteten Änderungen um 2100. Angaben über Konzentration der Treibhausgase, Temperatur- und Meeresspiegelanstieg nach (6, Tab. 13.5), über pH-Wert und -Änderung nach (7). Der Temperaturanstieg ist bezogen auf die Periode 1986–2005. In der Nordsee werden für pH um bis zu 0,2 stärkere Änderungen erwartet (8).

Szenario	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 2.6
Äquivalent zu IPCC 4	A2	B2	B1	Kein Äquivalent
Strahlungsantrieb W/m^2	8,5	6,0	4,5	2,6
Konzentration Treibhausgase (ppm CO_2eq)	1370	850	650	490
Globaler Temperaturanstieg ($^\circ\text{C}$)	3,7 (2,6–4,8)	2,2 (1,4–3,1)	1,8 (1,1–2,6)	1,0 (0,3–1,7)
mittl. globaler Meeresspiegelanstieg (m)	$0,74 \pm 0,24$ –0,18	$0,55 \pm 0,18$	$0,53 \pm 0,18$	$0,44 \pm 0,15$
mittl. pH-Wert	7,8	7,91	7,97	8,05
mittl. pH-Änderung	–0,29	–0,20	–0,14	–0,06

Die Gewinn-/Verlustdiskussion wurde in der Annahme geführt, dass die Klimaänderung eine gewisse Schranke nicht überschreitet. Das international angestrebte Ziel, die Erderwärmung unter der 2°C -Marke, bezogen auf die vorindustrielle Ära um 1850 zu halten, suggeriert, dass die Folgen einer solchen Erwärmung erträglich gestaltet werden können. Diese „Erträglichkeit“ geht zu Lasten vieler Entwicklungsländer, insbesondere solcher mit tiefliegenden Küsten. Es sind diese besonders bedrohten Staaten und Gesellschaften, die eine Verschärfung der Zielstellung – Erwärmung nicht über $1,5^\circ\text{C}$ gegenüber der vorindustriellen Ära – fordern (9).

Bereits die 2°C -Marke ist das Ergebnis eines zähen Ringens auf diplomatischem Parkett (5, 9, 10), ein Kompromiss zwischen politisch mögli-

cherweise realistisch Erreichbarem und tolerierbaren Konsequenzen für Natur und Gesellschaft (11). Um dieses Ziel zu erreichen, und zwar mit einer Wahrscheinlichkeit von nur mehr als 66%, darf die zukünftige Emission von Treibhausgasen 590–1.240 GtCO₂ nicht übersteigen (6, 12, 13) (siehe Tab. 3). Bei gleichbleibender Emissionsrate von etwa 40 GtCO₂ in 2014 bedeutet dies Nullemission ab etwa 2030 bis 2045 bzw. negative Emission durch technische Maßnahmen (Geoengineering) bei zeitweiligem Überschreiten dieser Quote. Das 2°C-Ziel ist schwer, wenn überhaupt, zu erreichen und bedarf allergrößter Anstrengungen (5).

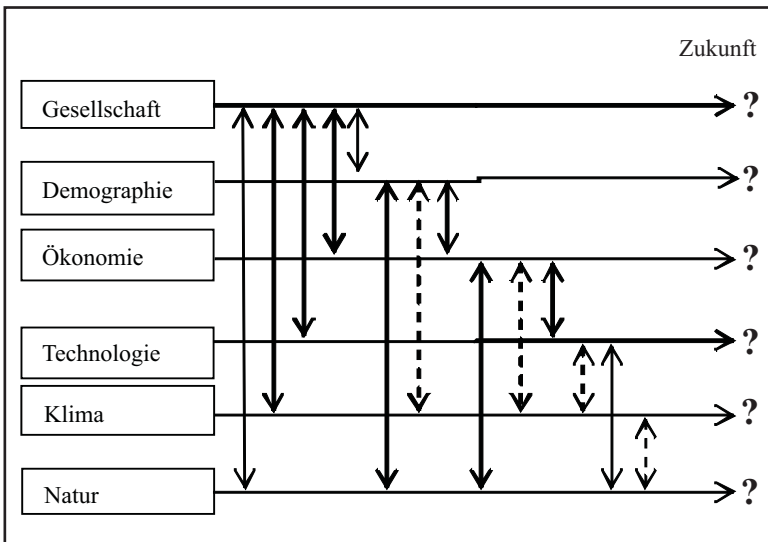


Abb. 1: Die (ungewisse) Zukunft aller Felder ist nicht unabhängig voneinander. In den IPCC-Szenarien in gewissem Grad berücksichtigte Einflüsse sind durch gestrichelte Pfeile gekennzeichnet.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind vielfältig und betreffen alle Aspekte des Lebens auf unserem Planeten, also auch die der menschlichen Gesellschaft. Sie in einem kurzen Artikel zu behandeln, ist unmöglich. Die Darstellung ist daher notgedrungen lückenhaft.

Tab. 3: Notwendige Emissionsgrenzen für globalen Temperaturanstieg unter 2°C und Folgen (Auswahl), (6, 12, 19, 21)

T-Anstieg/ Wahrscheinlichkeit	zugelassene Emission ab 2015 (GtCO ₂)	verbleibende Jahre bei Emission von 2014	Ökologische Konsequenzen
2°C (> 66%)	590–1240	15–30	Nahezu vollständiges Verschwinden alpiner Gletscher Verlust einzigartiger Ökosysteme Zunahme extremer Wetter- und Witterungsereignisse Zunehmendes gesellschaftliches Konfliktpotenzial

2. Überblick über die Folgen des Klimawandels

Die Folgen des Klimawandels in den einzelnen europäischen Regionen bis zum Ende des Jahrhunderts sind übersichtlich in Tabelle 4 zusammengestellt (nach 6, 14). Während Nord- und teilweise auch Nordwesteuropa durch den Klimawandel in dieser Zeitspanne in einigen Feldern günstigere Bedingungen erwarten (geringerer Energiebedarf durch mildere Winter, Zunahme des Wasserkraftpotenzials, Verlängerung der Vegetationsperiode und nordwärtige Ausbreitung landwirtschaftlicher Flächen, Zunahme des Sommertourismus), sind insbesondere die Mittelmeer- und Balkanländer durch zunehmende Hitze im Sommer und gleichzeitige Abnahme der Sommerniederschläge besonders hart betroffen. Damit verschärft der Klimawandel den Konflikt zwischen den reichen Ländern im Norden und den ärmeren südlichen europäischen Ländern. Diese sind wegen der geringeren materiellen Mittel für Vorsorge, Anpassung und Beseitigung von Schäden nach Naturkatastrophen besonders vulnerabel. Hinzu kommt, dass durch den Klimawandel sich auch die Bedingungen in Afrika mit wachsendem Konfliktpotenzial verschlechtern, sodass mit verstärkter Zuwanderung zu rechnen ist (15–18), die zunächst wegen der geographischen Nähe auf diese Staaten trifft.

Im Folgenden beschränken wir uns auf Klimafolgen durch Temperaturzunahme und Meeresspiegelanstieg, beide in der Tendenz unstrittig, jedoch mit erheblichen Unsicherheiten in ihrem Betrag und demzufolge auch mit entsprechender Bandbreite in ihren Wirkungen. Diese Beschränkung der Diskussion ist ausschließlich dem Platzmangel geschuldet und bedeutet keinesfalls eine Bagatellisierung von Starkregen und Dürreperioden mit ihren

Tab. 4: Zu erwartende (und bereits beobachtbare) Klimaänderungen und deren Auswirkungen bis 2100 für europäische Regionen (nach [6, 14])

Arktis	Nordeuropa
T-Anstieg wesentlich größer als globales Mittel	T-Anstieg wesentlich größer als globales Mittel
Abnahme der Meereisbedeckung	Abnahme von Schnee- und Eisbedeckung
Abnahme von Grönlandeis	Zunahme der Wasserführung von Strömen und Flüssen
Abnahme des Permafrostgebiets	Nordwärtsbewegung von Arten
Verlust an Artenvielfalt	Zunahme der Ernteerträge
Intensiverer Schiffsverkehr	Abnahme von Heizkosten
Vermehrte Ausbeutung von Lagerstätten	Zunahme des Wasserkraftpotenzials
	Zunahme von Winterstürmen
	Zunahme des Sommertourismus
Küsten und Seen	Hochgebirgsregionen
Meeresspiegelanstieg	T-Zunahme größer als europäischer Durchschnitt
T-Zunahme des Oberflächenwassers	Abnahme des Permafrostareals
Zunehmende Ozeanversauerung	Abnahme von Gletscherausdehnung und -volumen
nordwärtige Expansion von Fisch- und Planktonarten	Hohes Risiko des Aussterbens alpiner Spezies
Änderung der Phytoplanktonzusammensetzung	Zunehmende Bodenerosion
Zunehmendes Risiko für Fischbestände	Abnahme des Skitourismus
	Mittelmeergebiet
Nordwesteuropa	Abnahme von Jahresniederschlag
Zunahme der Winterniederschläge	T-Anstieg höher als europäischer Durchschnitt
Zunahme der Stromabflüsse	Abnahme der jährlichen Flussführung
Nordwärtige Wanderung von Arten	Zunehmender Wasserbedarf
Abnehmende Heizkosten	Zunehmende Mortalität durch Hitzewellen
Zunehmendes Risiko für Fluss- und Küstenüberschwemmungen	Zunehmende Desertifikationsgefahr
	Abnahme der Ernteerträge
Mittel- und Osteuropa	Zunehmende Waldbrandgefahr
Zunahme von Hitzeperioden	Abnahme des Wasserkraftnutzung
Abnahme von Sommererschlag	Abnahme des Sommertourismus
Zunahme der Wassertemperaturen	Zunehmende Extinktionsgefahr von Arten
Zunehmende Waldbrandgefahr	Habitatexpansion für südliche Krankheitsvektoren
Werteverlust von Holz	

Folgen (Hoch- und Niedrigwasser von Gewässern, Ernteausfälle, Zunahme der Waldbrandgefahr, u.a.), deren Zunahme vom IPCC immerhin mit sehr wahrscheinlich (90–100%) und wahrscheinlich (66–100%) eingeschätzt wird (19, S. 7). Es sind gerade diese extremen Wetter- und Witterungsereignisse, die, wenn zum Teil auch regional oder sogar lokal begrenzt und damit generell schwer vorhersagbar, zu beträchtlichen volkswirtschaftlichen Schäden führen und deshalb in der öffentlichen Wahrnehmung des Klimawandels wesentlich wirksamer sind als die stetigen und sich relativ langsam vollziehenden Änderungen der Temperatur und des Meeresspiegels.

3. Temperaturzunahme

Zur ziemlich sicheren Prognose (virtually certain 99–100% Wahrscheinlichkeit) des IPCC (6, 19) gehört eine weltweite Temperaturzunahme, die bereits jetzt spürbar ist mit 0,8°C gegenüber der Referenzperiode. Für Europa sind in www.atlas.impact2c/eu/en (20) Karten zu Auswirkungen des Klimawandels bei 2°C und teilweise 3°C Temperaturänderung bereitgestellt. Eine Temperaturzunahme von 2°C in Europa führt zu einem nahezu vollständigen Verschwinden der bereits heute gegenüber dem Stand um 1850 stark reduzierten (um etwa 50% Volumenverlust) alpinen Gletscher mit folglich reduziertem Abfluss in den Sommermonaten und Tauen von alpinem Dauerfrostboden mit zunehmender Gefahr von Bergrutschen und Gerölllawinen (Tab. 3, 21). Die Erwärmung in Europa ist sowohl geographisch als auch saisonal nicht gleichmäßig mit stärkerer Erwärmung im Winter in Nord- und Osteuropa mit teilweise über 3,5°C in Nordskandinavien. Im Sommer sind insbesondere die Hochgebirgsregionen mit mehr als 3°C und der Mittelmeerraum betroffen. Bezüglich detaillierten Kartenmaterials über entsprechende Folgen (Verlängerung der Vegetationsperiode, Anzahl der Tropennächte, Vulnerabilität u.a.) sei hier nochmals auf den Impactatlas (20) verwiesen. Generell findet eine Polwärtsverschiebung der Klimazonen statt (22). Mildere Winter bedeuten geringere Heizkosten und weniger Kältetode, heißere Sommer eine größere Wärmebelastung.

Hitzestress betrifft alle Lebewesen und bedeutet Beeinträchtigung ihrer Lebensfunktionen mit signifikanter Leistungsreduzierung. Zur Beschreibung und Quantifizierung von Hitzestress existieren mehr als 100 Indizes, die in der Mehrzahl Lufttemperatur T und relative Luftfeuchte RH verwenden (23). Eine vollständige Beschreibung der Wärmebelastung eines Menschen erfordert die Lösung der Wärmehaushaltsgleichung, in die neben den externen meteorologischen Parametern (zusätzlich Windgeschwindigkeit und

kurz- und langwellige Strahlung) individuelle Parameter wie Kleidung, Metabolismusrate, Größe, Gewicht, Geschlecht und Alter eingehen (23). Im Deutschen Wetterdienst (DWD) wird die Hitzebelastung des Menschen auf der Basis eines vollständigen Wärmehaushaltsmodells des menschlichen

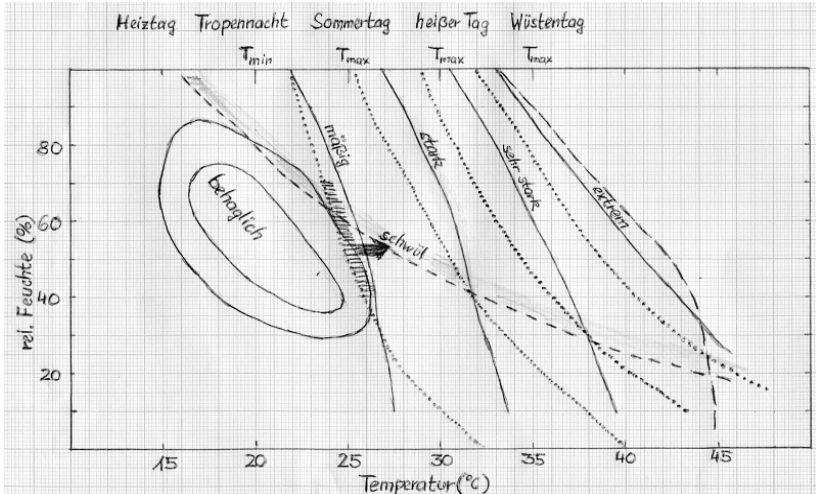


Abb. 2: Hitze stress im Temperatur-Feuchte-Diagramm: Ausgezogene Kurven nach dem Universellen thermischen Klimaindex (UTCI) (25), punktiert nach dem Temperature Humidity Index (THI) (27) bzw. Hitze Index (Heat Index HI) (26). Lang gestrichelt: Grenze der maximal erlaubbaren Exposition von sechs Stunden nach dem Predicted Strain Index (PSI) (28). Die Belastungsgrenzen für Menschen gelten für Militärpersonal und Athleten und sind somit nicht für die gesamte Bevölkerung repräsentativ, für die geringere Belastungsgrenzen zu veranschlagen sind. Für das Holstein-Rind zeigt die dritte punktierte Kurve von links bereits extremen Hitze stress an. Weiterhin angegeben sind der Bereich der Schwüle rechts der kurz gestrichelten Kurve und der Behaglichkeitsbereich bei weitgehender Anpassung (äußerer Bereich) und bei sitzender Beschäftigung in Räumen ohne Luftbewegung (innerer Bereich). An der Abszisse oben sind die klimatologischen Kenntage angegeben wie Tropennacht $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$, usw. Gestrichelter Bereich: mittlere sommerliche Werte im Mittelmeerraum (27). Der Pfeil zeigt die Änderung bei Klimawandel an.

Körpers durch die Gefühlte Temperatur (GT) für eine Normalperson beschrieben, den sogenannten Klima-Michel (Größe 175 cm, 75 kg Gewicht, 35 Jahre, normale Tätigkeit (schnelles Spazierengehen), der Witterung angepasste Kleidung). Diese GT wird unter Berücksichtigung von Akklimatisation vom DWD täglich neben der Schwüle auf der Webseite des DWD unter www.de/DE/leistungen/geftempschwuele/geftempschwuele.htm, bei starker Wärmebelastung ($GT > 32^{\circ}\text{C}$) auch unter www.de/DE/gefahren/indizesthermisch/gefahrenindizesthermisch.de veröffentlicht (24). Ebenfalls auf der vollständigen Wärmebilanzgleichung plus Berücksichtigung von Akklimatisation beruht der Universal Thermal Climate Index UTCI (23, 25). Zur Abschätzung von Hitzestress auf Tiere werden einfache Zwei-Parameter-Indizes verwendet. Abbildung 2 zeigt im T-RH-Diagramm, ab wann mit welchem Grad von Wärmebelastung gerechnet werden muss. Die punktierten Kurven zeigen die Wärmebelastung für den Hitzeindex (26) und Temperatur-Feuchteindex (27), die zwar nach unterschiedlichen Formeln berechnet werden, bezüglich der Klasseneinteilung aber nahezu identisch sind. Das heißt aber nichts anderes, als dass die Wärmeempfindlichkeit von Menschen und Rindern in etwa gleich sind. Die ausgezogenen Kurven zeigen die Belastung nach dem UTCI, der für geringe Feuchten die Belastung bei niedrigeren Temperaturen, für hohe Feuchten bei bis zu 2°C höheren Temperaturen zulässt als THI und HI. Die lang gestrichelte Kurve gilt als Grenze für einen sechsständigen Aufenthalt nach dem Predicted Heat Strain Index (PHS) (28), einem Index, der für berufliche und sportliche Tätigkeiten benutzt wird. Ihm liegt eine Rektaltemperatur größer als 38°C oder ein Schweißverlust größer als 7,5% der Körpermasse zu Grunde. Die Belastungsgrenzen für Menschen gelten für Militärpersonal und gut trainierte Athleten und sind somit nicht für die gesamte Bevölkerung repräsentativ, für die geringere Belastungsgrenzen zu veranschlagen sind (29). Die durchschnittlichen sommerlichen Bedingungen im Mittelmeerraum sind durch den gestrichelten Bereich markiert (27), und der Pfeil gibt die zukünftige Richtung mit zunehmender Wärmebelastung an. Mit zunehmender Hitzebelastung treten bei Rindern und Schweinen erhöhte Atemfrequenz, Rückgang der Futteraufnahme, vermehrte Stoffwechselprobleme, vermindertes Brunstgeschehen, erhöhte Krankheitsanfälligkeit, absinkende Milchleistung und Fleischproduktion auf. Die Gefahr eines Hitzschlags ist für hochgezüchtete Milchkühe bei bis zu 5°C niedrigeren Temperaturen zu befürchten als bei Menschen und Milchziegen (30). Ähnliche Differenzen der Hitzeempfindlichkeit sind auch bereits zwischen Rassen gleicher Gattung zu verzeichnen wie zwischen dem besonders empfindlichen Holstein-Rind und dem weni-

ger empfindlichen Jersey-Rind (31). Abbildung 3 zeigt die Hitzebelastung eines Holstein-Rinds an einem Strahlungstag bei 20°C Lufttemperatur, wo teilweise Hauttemperaturen bis zu 46°C gemessen werden (32). Dementsprechend sind bei Hitzewellen auch beträchtliche Verluste in der Milchwirtschaft zu verzeichnen. So war als Folge der Hitzewelle 2003 die Mortalität bei Milchkühen in Frankreich um 20% erhöht (33).

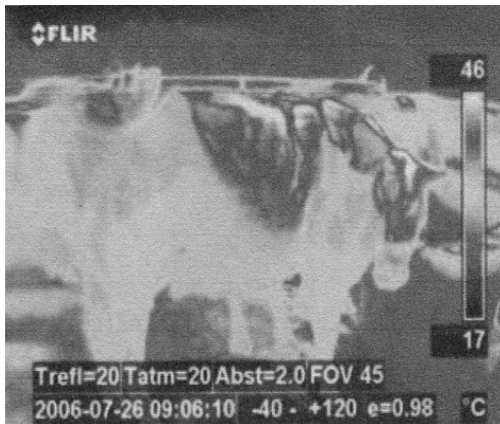


Abb. 3: Wärmebild einer Holsteiner Milchkuh bei 20°C Lufttemperatur. An den dunklen Stellen werden bis 46°C gemessen. Foto: J. Gasteiner, HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Mit freundlicher Genehmigung von Dr. J. Gasteiner

Hohe Temperaturen beeinträchtigen nicht nur das subjektive Wohlbefinden des Menschen (34). Es gibt zahlreiche Untersuchungen, meist in geschlossenen Räumen, die eine Abnahme der körperlichen Aktivitäten und kognitiven Fähigkeiten und damit der Arbeitsleistung feststellen (29, 35). Die daraus resultierenden zukünftigen Verluste und Einschränkungen sind jedoch schwierig quantifizierbar, da zukünftige technologische Entwicklungen und Verhaltensmuster zu berücksichtigen sind. In der ersten Dekade dieses Jahrhunderts stieg die Zahl der Hitzetode weltweit um 2.300% (36). Die gegenwärtige Erwärmungsrate ist wesentlich höher als jemals zuvor und übersteigt die Kapazität der physiologischen Anpassung langlebiger Lebewesen einschließlich der des Menschen (35). Die Frage, welchen Grad von Erwärmung eine florierende Gesellschaft noch ertragen kann, ist nicht akademisch, sondern existentiell (5, 35).

Die langfristige Hitzetoleranz von Vielzellern (Metazoen) liegt bei 45 bis 47°C (37). Kurzfristig können auch höhere Temperaturen toleriert werden. Wildlebende Tiere verfügen nicht über die Anpassungsfähigkeiten und -möglichkeiten menschlicher Gesellschaften. Bis zu welchem Grad diese die weitere Erwärmung überstehen können, ist bisher kaum untersucht worden.

Natürlich reagieren auch Pflanzen in vielfältiger Weise auf Hitzestress durch morphologische, physiologische, biochemische und molekulare Reaktionen mit negativen Folgen auf gesunde Entwicklung, Wachstum und Reproduktion (38, 39). Bisher wurden die Auswirkungen des Klimawandels nur für Nutzpflanzen, insbesondere die zu erwartenden Ernteerträge, detaillierter untersucht (40). Generell ist in Europa mit Ertragsminderung zu rechnen, da die zu erwarteten Ertragssteigerungen in Nordeuropa nicht die geringeren Ernten in West- und Südeuropa kompensieren (20). Wesentlich größere Einbußen sind anderweitig, insbesondere im Korngürtel der USA und in Indien zu befürchten.

4. Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegelanstieg ist unzweifelhaft. Er betrug im letzten Jahrhundert im globalen Mittel $1,7 \pm 0,2$ mm/Jahr entsprechend 19 ± 2 cm Gesamtanstieg seit 1901, überwiegend (mit etwa 75%) verursacht durch thermische Ausdehnung des Meerwassers und das Abschmelzen von Gletschern (13). Seit den 90er Jahren hat sich die Anstiegsrate fast verdoppelt auf $3,2 \pm 4,4$ mm/Jahr (13, 41). Bis 2100 wird, bezogen auf die Periode 1986–2005, mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% mit einem Anstieg zwischen 0,28 m für das Szenarium RCP 2.6 und 0,98 m für RCP 8.5 gerechnet (13, siehe Tab. 2 dieser Arbeit). Für das 2°C-Ziel beträgt der Meeresspiegelanstieg um 2100 bei dieser Wahrscheinlichkeit etwa $0,5 \pm 0,1$ m (Tab. 2). Dieser Anstieg ist für das ökologisch so bedeutungsvolle Wattenmeer, weltweit die größte zusammenhängende Fläche an Sand- und Schlickwatten, bereits eine große Gefahr, da bei einem jährlichen Anstieg um mehr als 5mm der natürliche Materialtransport nicht ausreicht, um das Watt vor Ertrinken zu retten (42). Maximal könnte der Anstieg bis 2100 1,8 m betragen (43). Durch die große thermische Trägheit des Ozeans wird der Meeresspiegel auch bei negativer Emission noch über mehrere Jahrhunderte ansteigen (13). Die Auswirkungen werden verzögert aber nicht vermieden. Für 2300 wird mit einem Anstieg zwischen 0,6 und 1,0 m für das Szenario RCP 2.6 und 0,7 bis 1,2 m für RCP 8.5 gerechnet (13, 44). Diese Schätzungen beinhalten jedoch nicht die Risiken eines beschleunigten Abschmelzens des Grönländischen und

Antarktischen Eises und des möglichen Zusammenbruchs der thermohalinen Atlantischen Zirkulation, deren Wahrscheinlichkeit immerhin mit 10% geschätzt wird mit einem Beitrag bis zu 1 m (6, 13). Regionale Abweichungen vom globalen Mittel sind zum Teil beträchtlich, bedingt durch isostatische Landhebung (bis zu +4mm/Jahr im Bottnischen Meerbusen und –3mm/Jahr an der südlichen Ostsee (44), geomorphologische Prozesse am Meeresgrund und atmosphärisch-ozeanische Prozesse (46).

Tab. 5: Risiken durch Klimawandel in europäischen Küstenregionen (45, S. 35)^a

Impact	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Region										
Ostsee	+			+		+		+	+	
Nordsee	+	+	+	+	+	+	+			
Nord Nordostatlantik Keltische See		+	+			+	+	+		
Biscaya Spanische Küste		+	+			+				
Macronesien			+			+		+		
westliches Mittelmeer		+	+	+	+	+		+		+
Adria, Ionisches Meer, zentrales. Mittelmeer		+	+	+		+		+		
Ägäis, Levante		+	+	+		+		+		+
Schwarzes Meer		+	+			+		+		

a – Impacts: 1 – Sturmflut, 2 – Überschwemmung von Küsten, 3 – Küstenerosion, 4 – Salzwasserintrusion, 5 – Änderung der Salinität, 6 – Verlust mariner Habitats, Ökosysteme und Biodiversität, 7 – Verlust an Vermögen und Infrastruktur, 8 – sozioökonomische Anfälligkeit, 9 – Flusshochwasser, 10 – Wasserknappheit

Die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs sind vielfältig und in Tabelle 5 für die europäischen Meeresgebiete aufgelistet (nach [45, S. 35]). Die daraus resultierenden erheblichen sozioökonomischen Folgen zeigt Tabelle 6 (nach [46]). Die regionalen Unterschiede (Tab. 5) sind im Wesentlichen bedingt durch die Art der Küste (Steil- oder Flachküste), Besiedlungsdichte und den vor Ort vorherrschenden meteorologischen Bedingungen. In der EU liegen etwa 140.000 km² (etwa 1,4% der Fläche Europas) nur bis zu 1 m über NN, d.h. eine Fläche etwas größer als die Griechenlands. Mehr als 70 Millionen Europäer lebten 2001 in Küstenstädten und das Gesamtvermögen im 500 m

Küstenstreifen betrug geschätzte 500 bis 1.000 Milliarden € (47). Zahlreiche problematische Industrieanlagen wie Ö Raffinerien und Kernkraftwerke befinden sich in unmittelbarer Küstennähe, z.B. die KKW's Brunsbüttel und Brokdorf in der Wilster Marsch (3,5 m unter NN), die einen besonderen Schutz erfordern.

Tab. 6: Sozioökonomische Folgen des Klimawandels in Küstenregionen^a

Sektor	Effekte und Folgen					
	1	2	3	4	5	6
Wohnen	+	+	+	+		
Bauwirtschaft						
Gesundheit	+	+	+			
Sicherheit						
Wasserwirtschaft	+		+	+	+	+
Landwirtschaft	+	+	+	+	+	+
Fischerei	+	+	+		+	+
Aquakultur						
Tourismus	+	+	+			+

a– nach Sterr (46)

1 – Sturmfluten, zeitweilige Überschwemmungen, 2 – Küstenerosion, 3 – Landverlust, 4 – ansteigender Grundwasserspiegel, 5 – Salzwasserintrusion, 6 – Änderung/Gefährdung der Ökosysteme

Durch Erosion waren 2001 etwa 20.000 km entsprechend etwa 20% europäischer Küste bedroht mit Landverlust auf etwa 15.000 km, davon 2.900 km trotz Küstenschutz (47). Am meisten betroffen waren Griechenland mit 3.945 km und Großbritannien mit 3.009 km. Am Mittelmeer erodiert etwa 30% der Küste, an der Nordsee 20% und am Schwarzen Meer 13%. Die erodierende Küste nahm in 15 Jahren von 1986 bis 2001 um 875 km zu, zu zwei Dritteln als Folge ingenieurtechnischer Maßnahmen und verminderten Stromabflusses und zu einem Drittel durch steigenden Meeresspiegel. Als Vergleich: Deutschlands Küste ist zu 30% (1.077 km von 3.524 km Küstenlinie¹) von Erosion bedroht. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 5 mm/Jahr muss mit dreifach erhöhter Küstenabbruchsrate gerechnet werden (48). Die Erosionsrate von Dünen verdoppelt sich bei Erhöhung des Sturmflutwasserstandes um 0,7 m (49, S. 14). Für die Ostseeküste führt ein Anstieg von 0,3 m in einzelnen Küstenabschnitten bereits zu einem Rückgang um 30 m (49, S. 110). Tatsächlich fand Erosion in Europa auf 452 km statt, davon auf

1 Die Angaben über Küstenlängen differieren zum Teil beträchtlich: www.laenderdaten.de/geographie (letzter Zugriff 10.08.2016) gibt für Deutschland 2.389 km an, Sterr (46) 3.700km. Dies gilt auch für andere Länder Europas.

147 km geschützter Küste (47). Ohne entsprechende Schutzmaßnahmen würden Ende des Jahrhunderts Malta 12% und Griechenland 3,5% ihrer Landflächen verlieren (50). Polen und Deutschland hätten die größten ökonomischen Verluste zu tragen (50). Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und eine übermäßig starke Beanspruchung der Trinkwasserreservoirs führen zu vermehrter Salzwasserintrusion, von der gegenwärtig bereits große Küstenabschnitte am Mittelmeer in Spanien, Italien und der Türkei, aber auch in Dänemark betroffen sind. In Cypern sind durch Intrusion zwei Drittel des Grundwassers gefährdet (51). Vermehrte Salzwasserintrusion findet auch in den Flussdeltas statt, da mit steigendem Meeresspiegel salzhaltiges Wasser weiter stromaufwärts gelangt.

Tab. 7: Anteil der Küstenformen und deren Schutz in Europa^a

Küstenform	Länge (km)	Anteil (%)	geschützt (%)
Felsküste	35.727	35,4	0,5
Kreideküste	11.833	11,7	0,8
Sandstrand	41.065	40,7	12,5
Schlammküste	5.399	5,3	2,5
künstliche Küste	6.497	6,4	
Mündungsgebiet	405	0,5	
<i>Summe</i>	<i>100.925</i>	<i>100</i>	<i>2,9</i>

a – Stand 2001 (47)

Nur 2,9% von Europas natürlicher Küste sind gegenwärtig ausreichend geschützt (47, Tab. 2). In der Vergangenheit wurde die erforderliche Deichhöhe aus der Summe von mittlerem Tidehochwasser plus größter Springtiderhöhung, dem maximalen Windstau in Sturmfluten und dem Wellenaufbau berechnet (48, 49). Dem steigenden Anstieg wird in Deutschland zur Zeit durch einen Klimazuschlag von 0,5 m für die Nordsee und 0,3 m für die Ostsee Rechnung getragen (48). Für Schleswig-Holstein mit einer Küstenlänge von 1.088 km und einer Deichlänge von 528 km (52) ergibt sich daraus ein unmittelbarer Handlungsbedarf von 93 km (52). Die Verstärkung bestehender Anlagen ist aber nur begrenzt machbar und dürfte in etwa bei 1 m liegen, sodass gebietsabhängig zum Teil erhebliche Neuanlagen notwendig sind. Sollte der Meeresspiegelanstieg mehrere Meter betragen, können viele Küstenabschnitte nicht mehr geschützt werden. Prinzipiell sind folgende Anpassungsstrategien möglich (49, S. 16):

- Do nothing: Die Küste wird ihrem Schicksal überlassen.
- Linie halten: Die derzeitige Küstenlinie wird verteidigt.
- Seeseitige Vorverlegung der Küste durch entsprechende Küstenschutzanlagen.
- Beschränktes Eingreifen durch lokal erhöhte Aufwendungen, etwa durch Küstenschutzanlagen im Küstenvorfeld zwecks Minderung des Wellenaufbaus.
- Rückverlegung der Küste.

Keine Maßnahme ist unproblematisch. So ist ohne jeglichen weiteren Küstenschutz an Flachküsten mit beträchtlichem Landverlust zu rechnen. Insbesondere eine Rückverlegung der Küste birgt wegen unterschiedlicher Interessenslagen erhebliches Konfliktpotenzial. Die Verteidigung der gegenwärtigen Küstenlinie erfordert einen hohen Materialeinsatz und bei Deichschutz durch eine notwendige Verbreiterung des Dünensockels Verlust kostbaren Landes. Für die durch Dünen geschützte Küstenlinie schätzt z.B. das Land Mecklenburg-Vorpommern bis 2100 mit einer benötigten Sandmenge von 76 Millionen m^3 , davon 20 Mill. m^3 zum Ausgleich des Meeresspiegelanstiegs von 0,5 m und 56 Mill. m^3 für Erosionsschutz durch Küstenrückgang und Sturmflutschäden (49, S. 17). Der Vorrat mariner Sande wird mit 50 Mill. m^3 angegeben und sollte theoretisch für 70 Jahre reichen, ist aber nur beschränkt nutzbar, da teilweise munitionsbelastet und zu 60% in Schutzgebieten gelagert (49). Ein weiteres Beispiel: Spanien würde für seinen Sandstrand von 3.000 km bei einem Anstieg von 5 mm/Jahr eine jährliche Sandmenge von 4,5 Mill. m^3 benötigen (53, S. 95). Es ist offensichtlich, dass bei diesem Bedarf an Sand nicht alle Sandstrände gehalten werden können. Insbesondere sind Strände, die wegen steil ansteigenden Hinterlandes nicht ins Landesinnere zurückweichen können wie große Abschnitte der spanischen Biscayaküste, auf Dauer nicht zu halten.

Die Schaffung neuer aufwendiger Küstenschutzanlagen (Deiche, Sperrwerke) erfordert für Planung, Konstruktion und Durchführung einen Zeitvorlauf von mehr als 20 Jahren und hat unerwartet eintretende Änderungen zu berücksichtigen. Von allen Beteiligten ist daher hohe Flexibilität gefordert. Ein Beispiel eines adaptiven Managementplans zum Schutz von London ist im IPCC-Bericht (54, S. 389) enthalten.

5. Ausblick

Die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels sind schwer abschätzbar. Zusätzlich zur Klimavorhersage werden belastbare Daten über die de-

mographischen Veränderungen sowie über politische und technologische Entwicklungen benötigt (Abb. 1). Europa ist vom Klimawandel noch relativ glimpflich betroffen und hat wegen seiner ökonomischen Stärke auch wesentlich mehr Mittel für Adaption zur Verfügung als die besonders bedrohten Gebiete auf anderen Kontinenten, insbesondere Afrikas und Südasiens. Dennoch sind auch in Europa die Auswirkungen nicht vernachlässigbar (Tab. 4). Ciscar et al. (55) schätzten die ökonomischen Auswirkungen in Europa unter der Voraussetzung eines Klimas um 2080 auf die heutigen Volkswirtschaften ein (berücksichtigte Sektoren: Landwirtschaft, Küsten, Flüsse, Tourismus). Sie fanden für die EU gemittelt einen Vermögensverlust von 0,2%–1,5% in Abhängigkeit vom Erwärmungsgrad (angenommen zwischen 2,5°C und 5,4°C) bei einem Meeresspiegelanstieg von 49–59 cm. Wichtiger als diese Zahlen jedoch ist der Befund, dass sich der Wohlstandsgradient zwischen dem ärmeren Süden und dem reicheren Norden verschärft. Während für Nordeuropa insbesondere durch die Verlängerung der Vegetationsperiode nahezu unabhängig vom Temperaturanstieg mit 0,5% Zuwachs an Wohlstand gerechnet wird, steigen die Verluste besonders in Südeuropa mit zunehmender Temperatur stark an. Wie zu erwarten, reagiert vor allem die Landwirtschaft empfindlich auf den Klimawandel. Noch größere Unterschiede zwischen arm und reich sind nach Burke et al. (56) zu erwarten. Ausgehend von dem empirischen Befund, dass die Wirtschaftskraft ein Maximum bei etwa 13°C Jahresmitteltemperatur aufweist und nicht-linear nach beiden Seiten abnimmt, leiden arme Länder der Tropen und Subtropen mehr unter dem Klimawandel als der kühlere Norden, nicht weil sie arm sind und deswegen weniger Mittel zur Klimaanpassung aufwenden können, sondern weil sie sich in dem Temperaturbereich befinden, in dem die Wirtschaftskraft mit weiter zunehmender Temperatur stark abfällt. Die Folge ist weiter zunehmende Ungleichheit mit allen Konsequenzen wie zunehmende Armut, Hunger, erhöhte Kriegsgefahr und Migrationen, Probleme, die über Jahre schon auf der internationalen Agenda stehen (Tab. 1) und nicht gelöst sind. Der Klimawandel verschärft diese Probleme.

Literatur

- (1) Welzer, H. (2010): Klimakriege. Wofür im 21. Jahrhundert getötet wird. Fischer Taschenbuch (2. Aufl.), S. 203
- (2) www.huffingtonpost.de/2014/07/20/die-groessten-probleme-der-menschheit_n_5598843.html, letzter Zugriff 07.04.2016

- (3) de.statista.com/statistik/daten/studie/1828/umfrage/groessten-probleme-der-welt/, letzter Zugriff 07.04.2016
- (4) Tol, R. S. J. (2009): The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspectives* 23: 29–51
- (5) Schellnhuber, H. J. (2015): *Selbstverbrennung*. München: C. Bertelsmann Verlag
- (6) IPPC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. Geneva: IPCC, 151 S.
- (7) Bopp, L. et al. (2013): Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models, *Biogeosciences* 10: 6225–6245, DOI:10.5194/bg-10-6225-2013
- (8) Blackford, J. C.; Gilbert, F. J. (2007): pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea, *J. Marine Syst.* 64: 229–241
- (9) Tschakert, P. (2015): 1.5°C or 2°C: a conduit’s view from the science-policy interface at COP20 in Lima, Peru. *Clim. Change Resp.* 2: 1–11
- (10) Randalls, S. (2010): History of the 2°C target. *WIREs Clim. Change* 1: 598–605
- (11) Knutti, R.; Rogelj, J.; Sedláček, J.; Fischer, E. M. (2015): A scientific critique of the two-degree climate change target. *Nature Geosci.*, published online: 7 Dec 2015, DOI:10.1038/NGEO2595
- (12) Rogelj, J. (2016): Differences between carbon budgets unravelled. *Nature Climate Change* 6: 245–252, DOI:10.1038/nclimate2868
- (13) Church, J. A.; Clark, P. U. et al. (2013): Sea level change, in *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 University Press
- (14) EEA (2016): *Urban adaptation to climate change in Europe 2016. Transforming cities in a changing climate*. EEA Report No 12/2016
- (15) Scheffran, J.; Battaglini, A. (2011): The security risks of global warming. *Regional Environmental Change* 11 (Suppl. 1): 27–39
- (16) Scheffran, J. et al. (2015): *The climate-nuclear nexus. Exploring the linkages between climate change and nuclear threats*. 2015 World Future Council, London. www.worldfuturecouncil.org
- (17) Burke, M. et al. (2009): Warming increases the risk of civil war in Afrika. *PNAS* 106, No. 49, 20670–20674, Dec 8, 2009
- (18) Hsiang, S. M.; Burke, M.; Miguel, E. (2013): Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science* 341, 1235367 (2013). DOI: 10.1126/science.1235367
- (19) IPCC (2013): *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F. et al. eds.] Cambridge University Press
- (20) www.atlas.impact2c.eu/en/, letzter Zugriff 07.08.2016
- (21) Levermann, A. et al. (2012): Potential climatic transitions with profound impact on Europe. *Clim. Change* 110: 845–878, DOI: 10.1007/s10585-011-0126-5

- (22) Rubel, F.; Kottek, M. (2010): Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.* 19, 135–141, DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430
- (23) Havenith, G.; Fiala, D. (2016): Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive Physiology* 6, 255–302
- (24) Koppe, C. (2009): Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes, *UMID* 3(2009), 39–43
- (25) Bröde, P. et al. (2013): The Universal Thermal Climate Index (UTCI) compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment. *Industrial Health* 51, 16–24
- (26) Blazejczyk, K. et al. (2012): Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int. J. Biometeorol.* 56, 515–535, DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2
- (27) Sagnalini, M. et al. (2011): Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin. *Int. J. Biometeorol.* 55, 253–263, DOI:10.1007/s00484-010-0331-3
- (28) Malchaire, J. B. M. (2006): Occupational heat stress assessment by the predicted heat strain model. *Industrial Health* 44, 380–387
- (29) Hanna, E. G.; Tait, P. W. (2015): Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12, 8034–8074, DOI:10.3390/ijerph120708034
- (30) Silanikove, N.; N. Koluman (Darcan) (2014): Impact of climate change on the dairy industry in temperate zones: Predications on the overall negative impact and on the positive role of dairy goats in adaptation to earth warming. *Small Rumin. Res.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.11.005> (letzter Zugriff 08.08.2016)
- (31) www.dairynz.co.nz/animal/health-conditions/heat-stress/ (letzter Zugriff 10.08.2016)
- (32) Gasteiner, J. (2014): Hitzestress bei Milchkühen. *Naturschutztagung Raumberg-Gumpenstein*, 25–28
- (33) Morignat, E. et al. (2014): Assessment of the impact of the 2003 and 2006 heat waves on cattle mortality in France. *PLoS ONE* 9(3):e93176. DOI:10.1371/journal.pone.0093176
- (34) Kunz-Plapp, T.; Hackenbruch, J.; Schipper, J. W. (2016): Factors of subjective heat stress of urban citizens of every day life. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 977–994, DOI: 10.5194/nhess-16-977-2016
- (35) Dell, M.; Jones, B. F.; Olken, B. A. (2014): What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. *J. Economic Literature* 52, 740–798, <http://dx.org/10.1257/ijel.52.3.740>
- (36) WMO (2013): The global climate 2001–2010. A decade of climate extremes. Summary Report, WMO-No. 1119
- (37) Munk, K. (Hg.) (2009): *Taschenlehrbuch Biologie, Ökologie Evolution*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag
- (38) Wahid, A.; Gelanie, S.; Ashraf, A.; Foolad, M. R. (2007): Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61, 199–223
- (39) Bitá, C. E.; Gerats, T. (2013): Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in Plant Science* 4, July 2013, Article 273 DOI: 10.3389/fpls.2013.00273

- (40) Porter, J. R. et al. (2014): Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press
- (41) Clark, P. U.; Church, J. A.; Gregory, J. M.; Payne, A. J. (2015): Recent progress in understanding and projecting regional and global mean sea level change. *Curr. Clim. Change Rep.* 1, 224–246, DOI: 10.1007/s40641-015-0024-4
- (42) Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012, 2013: Hrsg. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, April 2013
- (43) Jevrejeva, S.; Grinsted, A.; Moore, J. C. (2014): Upper limit for sea level projections by 2100. *Environ. Res. Lett.* 9, DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/104008
- (44) Horton, B. P.; Rahmstorf, S.; Engelhart, S. E.; Kemp, A. C. (2014): Expert assessment of sea-level rise by ad 2100 and ad 2300. *Quarterly Science Rev.* 84, 1–6, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.002> (letzter Zugriff 14.08.2016)
- (45) EEA (2013): *Balancing the future of Europe's coasts*. EEA Report No 12/2013 (European Environment Agency) DOI: 10.2800/99116
- (46) Sterr, H. (2007): *Folgen des Klimawandels für Ozeane und Küsten*. edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/86/PDF/86.pdf
- (47) Salman, A.; Lombardo, S.; Doody, P. (2004): *Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. Part II – Maps and statistics*, EUCC
- (48) Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, April 2013: *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012, April 2013*
- (49) RADOST-Verbund (2014): *RADOST-Abschlussbericht und 5. RADOST-Jahresbericht. RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr 27*, Ökologisches Institut Berlin
- (50) Bosello, F. et al. (2012): Economic impacts of climate change in Europe: Sea-level rise. *Climatic Change* 112, 63–81, DOI: 10.1007/s10584-011-0340-1
- (51) EEA (2006): *The changing faces of Europe's coastal areas*. EEA Report No 6/2006
- (52) Statistikamt Nord, *Statistisches Jahrbuch Schleswig-Holstein 2013/2014*: <https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Jahr%2013%2014/Schleswig-Holstein> (letzter Zugriff 22.08.2016)
- (53) Leipprand, A. et al. (2008): *Impacts of climate change on water resources – adaptation strategies for Europe*. UBA 32/08, Dessau-Roßlau August 2008
- (54) Wong, P. P. et al. (2014): *Coastal systems and low-lying areas*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press
- (55) Ciscar, J.-C. et al. (2015): Physical and economic consequences of climate change in Europe. *PNAS* 108, 2678–2683. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1011612108
- (56) Burke, M.; Hsiang, S. M.; Miguel, E. (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235–239 (12 Nov 2015), DOI: 10.1038/nature15725