

Die Freisetzung von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid, in die Erdatmosphäre seit Ende des 19. Jahrhunderts hat zu einem Klima beigetragen, an das die Art *Homo sapiens* nicht gewöhnt ist. Diese Klimaveränderung hat bereits die Epidemiologie verschiedener Infektionskrankheiten modifiziert, und die fortgesetzte Ansammlung von Treibhausgasen in der Atmosphäre wird diese Modifizierung weiter verstärken. In einigen Fällen können dadurch Bedingungen entstehen, die das Auftreten neuer Infektionskrankheiten fördern, während möglicherweise in anderen Gebieten derzeit vorkommende Infektionen verschwinden. Dieses Kapitel erläutert den gegenwärtigen Wissensstand im Hinblick auf bekannte und mögliche zukünftige Auswirkungen der klimatischen Veränderungen auf Infektionskrankheiten.

### ÜBERBLICK

Der Begriff *Klimaveränderung* bezieht sich auf langfristige Veränderungen von Temperatur, Niederschlag, Wind, Feuchtigkeit und anderen Komponenten, die insgesamt das Wetter ausmachen. Während der vergangenen 2,5 Millionen Jahre hat sich die Erde wiederholt erwärmt und abgekühlt, in Zyklen von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten, mit Schwankungen der globalen Durchschnittstemperaturen um 4–7 °C. Während der letzten Eiszeit, die vor etwa 12.000 Jahren zu Ende ging, lagen die Temperaturen auf der Erde im Mittel 5 °C unter denen in der Mitte des 20. Jahrhunderts (Abb. 120-1).

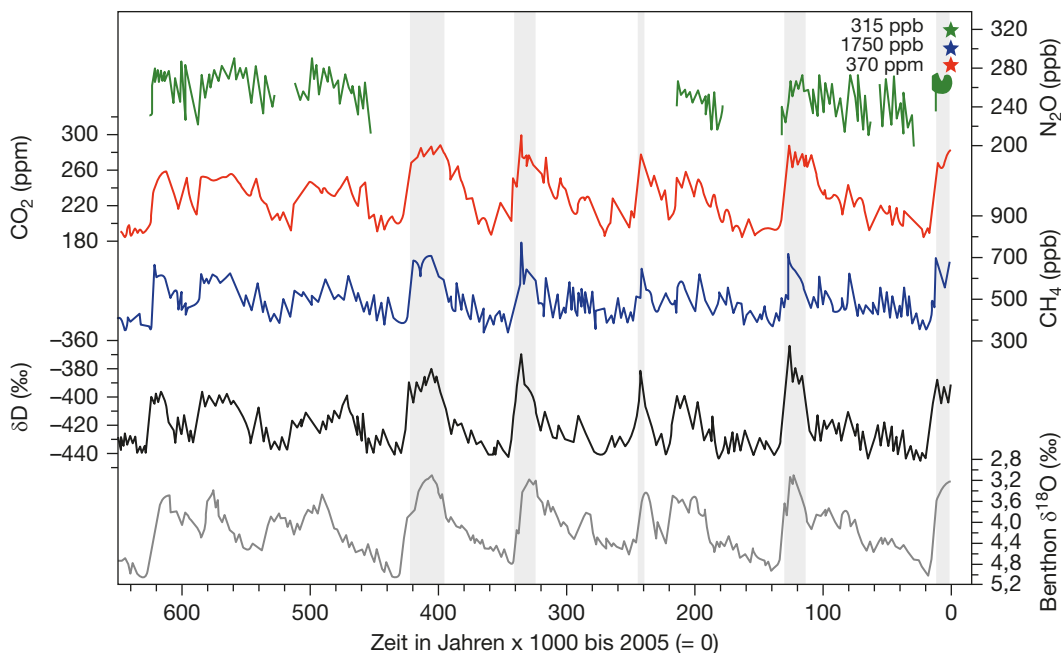
Der derzeitige Abschnitt der Erdgeschichte, das Holozän, weist eine bemerkenswerte Klimastabilität auf. Die Temperaturen verliefen bislang weitgehend konstant, mit einer Schwankungsbreite von 2–3 °C. Diese Stabilität hat die erfolgreiche Besiedlung und Kultivierung von großen Teilen der Landmasse der Erde durch die Menschheit ermöglicht. Die derzeit beobachteten Klimaveränderungen unterscheiden sich von denen der Vergangenheit nicht nur dadurch, dass sie primär vom Menschen verursacht werden, sondern auch durch ihr deutlich schnelleres Fortschreiten. Die derzeitige Geschwindigkeit der Erd-

erwärmung ist höher als während der gesamten letzten 50 Millionen Jahre. Die Erwärmung um 5 °C zu Ende der letzten Eiszeit vor ungefähr 12.000 Jahren nahm etwa 5000 Jahre in Anspruch – eine weitere solche Temperaturzunahme könnte innerhalb der nächsten 150 Jahre auftreten, wenn die Freisetzung von Treibhausgasen in den kommenden Jahrzehnten nicht erheblich reduziert wird. Die Klimawissenschaft ist zwar eine relativ junge Disziplin, sie liefert aber ein immer klareres Bild davon, wie die sich verändernde chemische Zusammensetzung unserer Atmosphäre das globale Klima beeinflusst hat und weiter beeinflussen wird.

### TREIBHAUSGASE

Als *Treibhausgase* (Tab. 120-1 und Abb. 120-2) werden Gase in der Erdatmosphäre bezeichnet, die Infrarotstrahlung absorbieren und so Wärme in der Atmosphäre speichern. In Abwesenheit dieser Gase läge die mittlere Erdtemperatur um etwa 33 °C niedriger. Kohlendioxid, das hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger und Abholzung von Wäldern in die Atmosphäre freigesetzt wird, übt seit der industriellen Revolution den größten Einfluss auf das Klima aus. Als Erster hat der schwedische Wissenschaftler Svante Arrhenius bereits Ende des 19. Jahrhunderts darauf hingewiesen, dass die Freisetzung von Kohlendioxid in die Erdatmosphäre die Oberflächentemperatur auf dem Planeten erhöhen werde. Wasserdampf ist zwar ein äußerst starkes Treibhausgas und hat die weiteste Verbreitung, trägt aber in Anbetracht seiner kurzen Lebensdauer in der Atmosphäre und seiner Empfindlichkeit gegenüber Temperatureinflüssen nicht wesentlich zu den beobachteten Klimaveränderungen bei.

Die Atmosphäre, einige in ihr suspendierte Aerosole und die Wolken reflektieren einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung in den Weltraum. Die verbleibende Strahlung erreicht die Erdoberfläche, wo sie absorbiert bzw. teilweise in die Atmosphäre zurückemittiert wird. Dabei emittiert die Erde die aufgenommene Energie in höheren Wel-



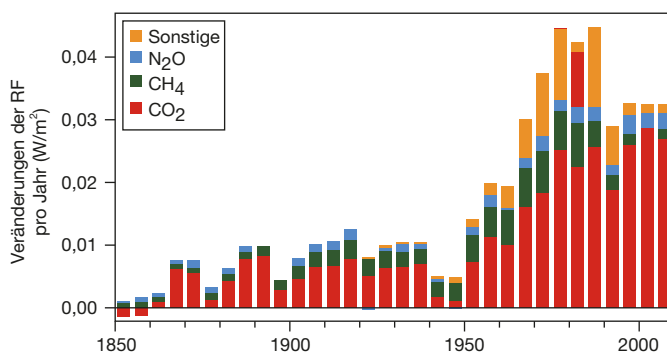
**Abbildung 120-1** Überblick über die Entwicklung der Temperatur und der primären Treibhausgase auf der Erde über die letzten 600.000 Jahre. Veränderungen des Deuterium-Gehalts ( $\delta D$ ; schwarz) stehen stellvertretend für die Temperatur. Die Konzentrationen der Treibhausgase –  $CO_2$  (rot),  $CH_4$  (blau) und Distickstoffmonoxid ( $N_2O$ ; grün) – wurden aus in antarktischen Eisbohrkernen eingeschlossener Luft und aus kürzlichen Messungen in der Atmosphäre abgeleitet. Schattierte Bereiche stehen für Zwischeneiszeiten. Veränderungen des Gehalts an schweren Sauerstoffisotopen ( $\delta^{18}O$ ) im marinen Benthon (dunkelgrau) stehen stellvertretend für die globale Fluktuation der Eismengen und können mit den Daten aus dem Eisbohrkern verglichen werden. Die Abwärtsentwicklung der Benthon- $\delta^{18}O$ -Kurve spiegelt zunehmende Eismengen an Land wider. Sterne und Zahlenwerte zeigen die atmosphärischen Konzentrationen im Jahr 2000 an. Die  $CO_2$ -Konzentrationen überstiegen im Jahr 2013 400 ppm und nehmen derzeit jährlich um ca. 2–2,5 ppm zu. (Aus Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Working Group I, Kap. 6, Abb. 6.3. Cambridge University Press, 2007.)

**TABELLE 120-1** Treibhausgase: Herkunft, Senken und Strahlungsantrieb

Gas	Anthropogene Quellen	Senken <sup>a</sup>	Strahlungsantrieb <sup>b</sup> (95 %-Konfidenzintervall)
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	Verbrennung fossiler Energieträger, Abholzung	Aufnahme durch die Ozeane (ca. 30 %), Pflanzen	1,68 (1,33–2,03)
Methan (CH <sub>4</sub> )	Produktion fossiler Brennstoffe, Wiederkäuer, Zersetzungs Vorgänge auf Mülldeponien	Hydroxylradikale in der Troposphäre	0,97 (0,74–1,20)
Distickstoffmonoxid (N <sub>2</sub> O)	Düngemittel, Verbrennung fossiler Energieträger, Verbrennung von Biomasse, Nutztierdung	Photolyse in der Stratosphäre	0,17 (0,14–0,23)
Halogenierte Kohlenwasserstoffe	Kühlmittel, elektrische Isolierung, Aluminiumproduktion	Hydroxylradikale in der Troposphäre, Sonnenlicht in der Stratosphäre	0,18 (0,01–0,35)

<sup>a</sup> Senke meint hier den Ort, an dem Treibhausgase natürlicherweise gespeichert werden, oder den Mechanismus, durch den sie abgebaut werden.

<sup>b</sup> Der Strahlungsantrieb, gemessen in Watt pro Quadratmeter, bezieht sich darauf, wie stark eine Entität in der Erdatmosphäre das Gleichgewicht von eintreffender und austretender Strahlung verändern kann, gemessen relativ zu einem vorindustriellen (d. h. 1750) Ausgangswert. Treibhausgase haben einen positiven Strahlungsantrieb, d. h. sie erhöhen die Strahlungsmenge (insbesondere von Infrarotstrahlung), die in der Erdatmosphäre zurückbleibt (**Quellen:** Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report, Working Group 1, Kap. 8; American Chemical Society "Greenhouse gas sources and sinks" abrufbar unter [www.acs.org/content/acs/en/climatescience/greenhousegases/sourcesandsinks.html](http://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/greenhousegases/sourcesandsinks.html)).



**Abbildung 120-2** Beschleunigung des Strahlungsantriebs (RF) durch Freisetzung wesentlicher Treibhausgase von 1850–2011. Zur Definition von „Strahlungsantrieb“ siehe Fußnote zu (Tab. 120-1). (Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report, Working Group 1, Kap. 8, Abb. 8.6, S. 677, Cambridge University Press, 2007.)

länglen, vor allem im Infrarotbereich und kann dann von den Treibhausgasen absorbiert werden. Diese Veränderung der Wellenlänge von Absorption zu Re-Emission von der Erdoberfläche ist fundamental für den Treibhauseffekt (Abb. 120-3).

## ■ TEMPERATUR

Der Begriff „Klimawandel“ ist nahezu ein Synonym für die Erderwärmung geworden, da die seit 1880 zunehmende Konzentration der Treibhausgase zu einem Anstieg der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur um ca. 0,85 °C geführt hat. Allerdings trägt dieser Mittelwert, denn in bestimmten Regionen der Erde geht dieser Prozess deutlich schneller vor sich. Die Arktis hat sich insgesamt doppelt so schnell erwärmt, und die Winter erwärmen sich schneller als die Sommer. Ebenso steigen die nächtlichen Tiefsttemperaturen schneller an als die Tageshöchsttemperaturen. Jede dieser Nuancen beeinflusst die Häufigkeit von Infektionskrankheiten insgesamt und von vektorübertragenen Erkrankungen im Besonderen.

Eine moderate Projektion auf Grundlage der besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse kommt zu dem Ergebnis, dass die durchschnittliche globale Temperatur bis zum Jahr 2100 um weitere 1,4–3,1 °C ansteigen wird, verglichen mit dem Zeitraum von 1866 bis 2005. Wegen des Klimawandels sind extreme Hitzewellen bereits häufiger geworden und werden aller Voraussicht nach im weiteren Verlauf des Jahrhunderts noch öfter auftreten. Neben ihren direkten Auswirkungen auf Morbidität und Mortalität in der menschlichen Bevölkerung führen Hitzeperioden zu deutlichen Ernteeinbußen. Beispielsweise führte eine extreme Hitzewelle in Russland im Jahr 2010 zu Hunderten von Waldbränden, und die folgende Luftverschmutzung führte zum Tod von etwa 56.000 Menschen. Dabei verbrannten mehr als 1200 Quadratkilometer (300.000 Acres) Getreidefelder, einschließlich ca. 25 % der gesamten Weizenanbaufläche des Landes. Mangel-

ernährung liegt wiederum einem erheblichen Teil der Infektionskrankheiten weltweit zugrunde.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes traten die vier wärmsten Jahre seit Beobachtungsbeginn im Jahr 1880 ab 2015 in direkter Folge auf. Durch Hitze und Dürre kam es insbesondere im Jahr 2018 zu erheblichen Einbußen in der Getreideernte mit deutschlandweit starken regionalen Unterschieden.

## ■ NIEDERSCHLÄGE

Zusätzlich zu den Temperaturveränderungen beeinflussen die Emission von Treibhausgasen und der daraus folgende Energieanstieg in der Erdatmosphäre den Wasserhaushalt des Planeten. Seit 1950 wurden in Europa und Nordamerika deutlich häufiger schwerste Niederschläge (d. h. oberhalb des 95 %-Perzentsils) beobachtet. Aufgrund begrenzter Daten sind die Trends in anderen Gebieten weniger klar, jedoch kam es in Regionen von Südostasien und dem südlichen Südamerika vermutlich ebenfalls zu einer Zunahme starker Niederschläge. Andere Gebiete wiederum erleben stärkere Dürreperioden, vor allem Südastralien und die südwestlichen USA.

Eine wärmere Atmosphäre speichert mehr Wasserdampf. Pro Temperaturzunahme um 1 °C in der unteren Atmosphäre werden 6–7,5 % mehr Wasserdampf aufgenommen. In traditionell regenreichen Gebieten führt die Erwärmung tendenziell zu schwereren Niederschlägen. Im Gegensatz dazu kommt es in trockenen Regionen eher zu verlängerten Intervallen zwischen den Regenzeiten und zu einem erhöhten Risiko von Dürreperioden.

## ■ HURRIKANE

Die Weltmeere haben seit den 1960er-Jahren 90 % des Wärmeüberschusses, der durch Treibhausgase in der Erdatmosphäre verblieben ist, absorbiert. Aus den so erwärmten Ozeanen kommt die Energie für die Entwicklung von Hurrikanen, und in wärmeren Jahren steigt tendenziell die Hurrikan-Aktivität. Am besten untersucht sind atlantische Hurrikane. Eine Auswertung von Satellitenbeobachtungen von 1983 bis 2005 hat dabei für den Atlantik einen Trend zu schwereren Hurrikanen gezeigt, wenn auch mit abnehmender Häufigkeit. Ein Modell für zukünftige tropische Zyklone liefert Hinweise, dass ihre Intensität bis zum Jahr 2100 um 2–11 % ansteigen könnte und ein durchschnittlicher Sturm etwa 20 % mehr Regen mit sich bringen wird.

## ■ ANSTIEG DER MEERESSPIEGEL

Zwischen 1901 und 2010 stiegen die Meeresspiegel weltweit um ca. 200 mm an, jedes Jahr um durchschnittlich 1,7 mm. Von 1993 bis 2010 kam es fast zur Verdopplung dieses jährlichen Anstiegs auf 3,2 mm pro Jahr. Ein Großteil davon geht auf die temperaturabhängige Ausdehnung des Wassers zurück. Das Abschmelzen der Gletscher ist der zweitgrößte Faktor, wobei hier der Anteil zunimmt. Bis 2100 könnten die Meeresspiegel weltweit um 0,8–2 m ansteigen mit einem jährlichen Anstieg von 8–16 mm gegen Ende dieses Jahrhunderts. Große Teile der Eisschicht der Westantarktis sind bereits im Zerfall

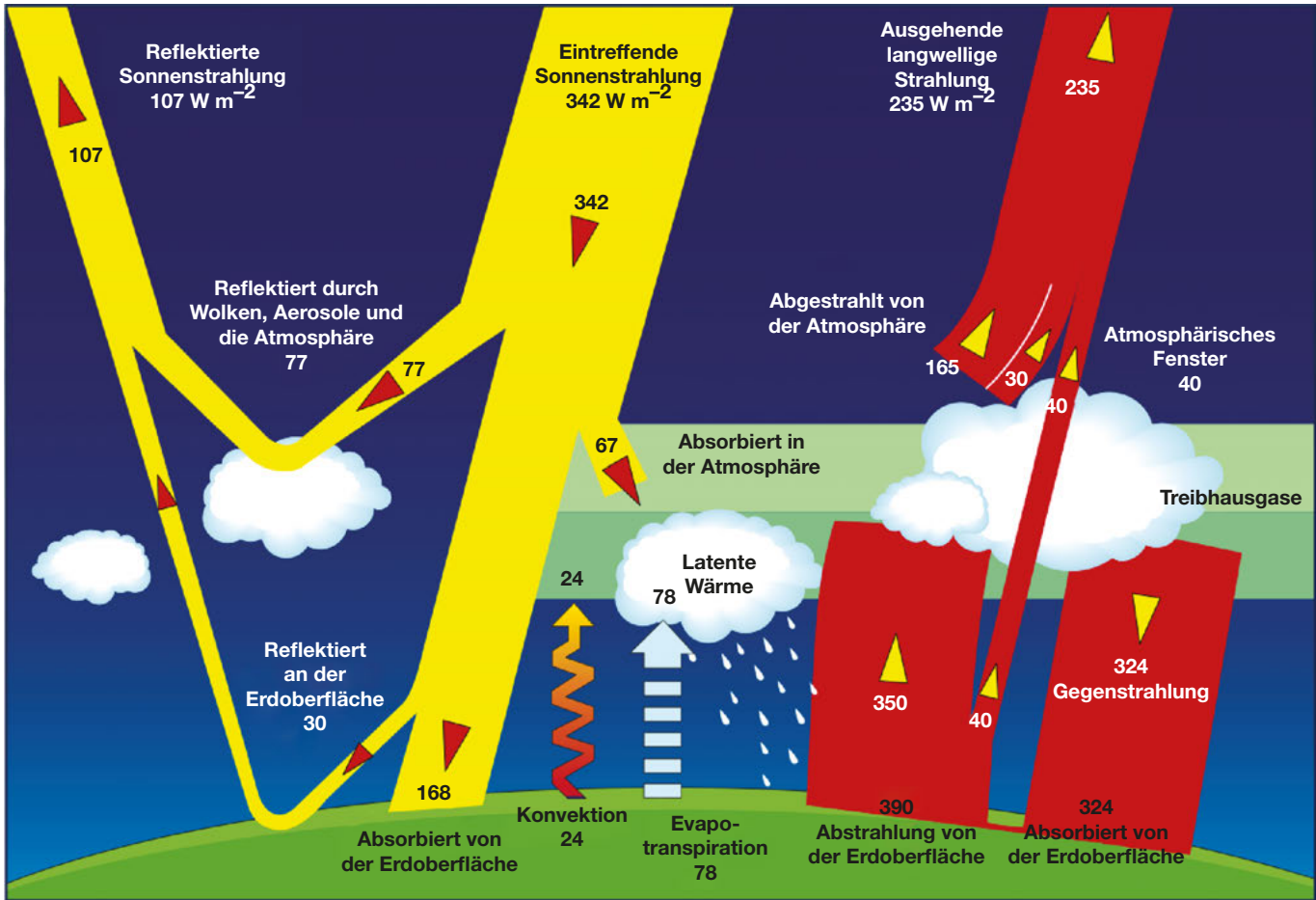


Abbildung 120-3 Energiegleichgewicht der Erde. (Aus Kiehl JT. Earth's annual global mean energy budget. Bull Am Meteor Soc 1997; 78:197, Abb. 7)

begriffen, und allein ihr Schmelzen könnte in den kommenden Jahrhunderten einen Anstieg der Meeresspiegel um  $\geq 3$  m verursachen.

Der Anstieg der Meeresspiegel findet dabei nicht einheitlich statt. Die Rate an der nordamerikanischen Ostküste ist etwa doppelt so hoch wie der globale Durchschnitt. Zu den steigenden Meeresspiegeln kommt ein Absinken mancher Küstenregionen durch menschliche Ansiedlungen. Wenn nicht deutlich in den Ausbau von Dämmen investiert wird, sind bis zum Jahr 2100 weltweit etwa 170 Millionen Menschen in Küstenregionen durch Überflutungen gefährdet, die durch die kombinierten Auswirkungen von absinkendem Landniveau, ansteigenden Meeresspiegeln und Bodenerosion entstehen.

Darüber hinaus tragen, zusammen mit heftigen Stürmen und übermäßiger Grundwasserförderung, die steigenden Meeresspiegel auch zur Versalzung des Grundwassers an den Küsten bei. Dabei sind etwa 1 Milliarde Menschen von Küstengrundwasser für ihre Trinkwasserversorgung abhängig.

### ■ DAS ENSO-PHÄNOMEN

ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) beschreibt periodische Veränderungen der Wassertemperatur im östlichen Pazifik, die etwa alle 5 Jahre auftreten. ENSO-Zyklen wirken sich dramatisch auf das weltweite Wetter aus. Liegen die Wassertemperaturen im östlichen Pazifik über dem Durchschnitt, liegt ein El-Niño-Ereignis vor (siehe unten), darunter liegende Temperaturen definieren La-Niña-Perioden. Es gibt zunehmende Hinweise, dass Klimaveränderungen Häufigkeit und Ausmaß von El-Niño-Ereignissen steigern können.

El-Niño-Ereignisse verändern das Wetter weltweit (Abb. 120-4), gehen mit extremen Wetterlagen einher und führen dadurch bedingt zu erhöhter Morbidität und Mortalität. Während des Hurrikans Mitch, mit Windgeschwindigkeiten von bis 290 km/h einer der stärksten jemals dokumentierten Hurrikane, kam es über 72 Stunden zu Niederschlägen von 1–1,8 m über Teilen von Honduras und Nicaragua. Dabei starben 11.000 Menschen, und 2,7 Millionen verloren ihre Heimat. Ausbrüche von Cholera, Leptospirose und Dengue-Fieber waren Folgen des Sturms.

### ■ MIGRATIONSBEWEGUNGEN UND KONFLIKTE

Im Endeffekt führt der Klimawandel oft zu ausgedehnten Migrationsbewegungen. Anstieg der Meeresspiegel, extreme Hitze und Niederschläge, Dürreperioden und Versalzung von Trinkwasserquellen machen ganze Regionen unbewohnbar, darunter Gebiete, die seit Jahrtausenden von Menschen besiedelt sind. Bewohner von tief gelegenen südpazifischen Inseln könnten in naher Zukunft zu Migranten werden, da ihre Inseln bei einem Anstieg der Meeresspiegel überflutet werden, ebenso Bewohner der Inselgruppen vor Alaska, wo das Schmelzen des Permafrostbodens die traditionelle Art der Kühlung von Lebensmitteln erschwert.

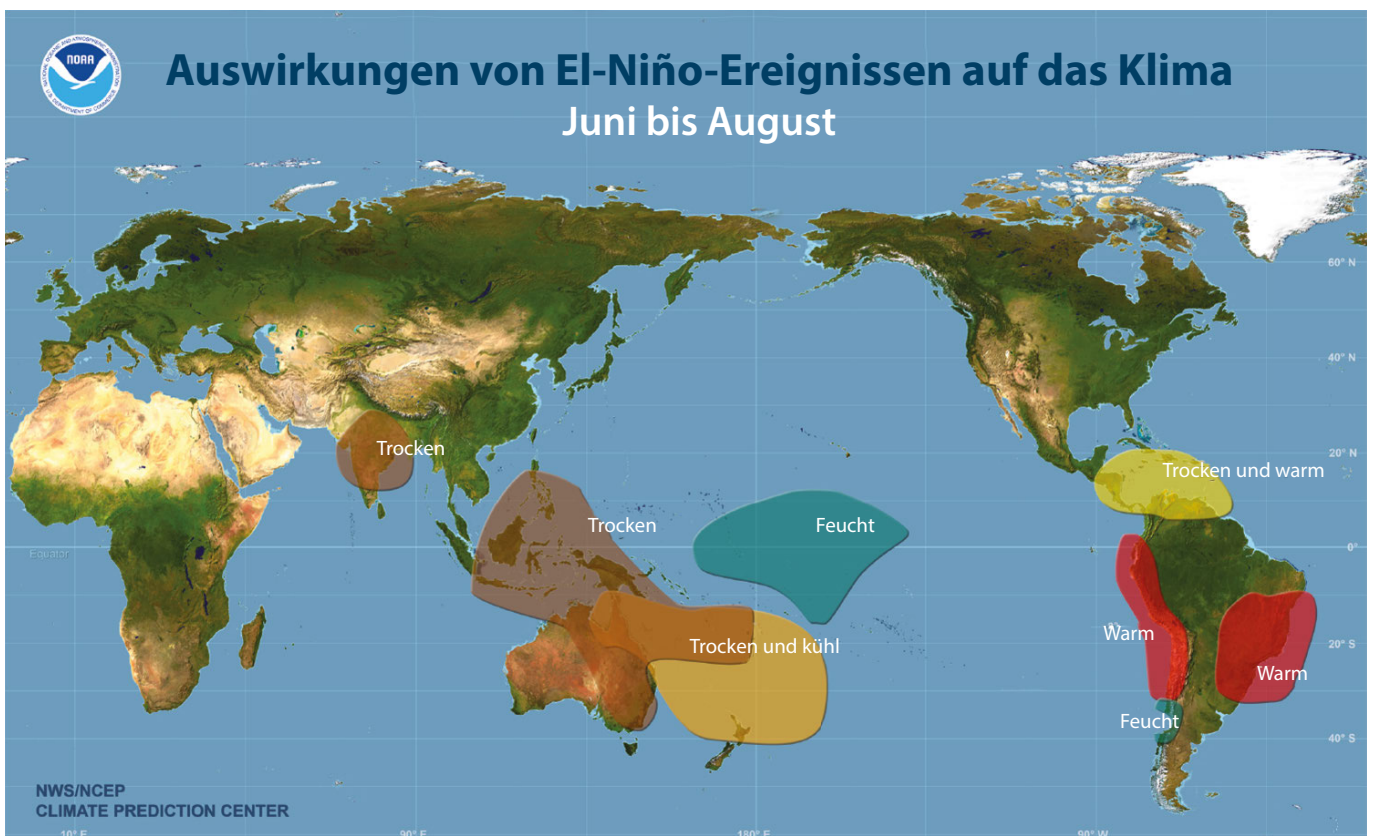
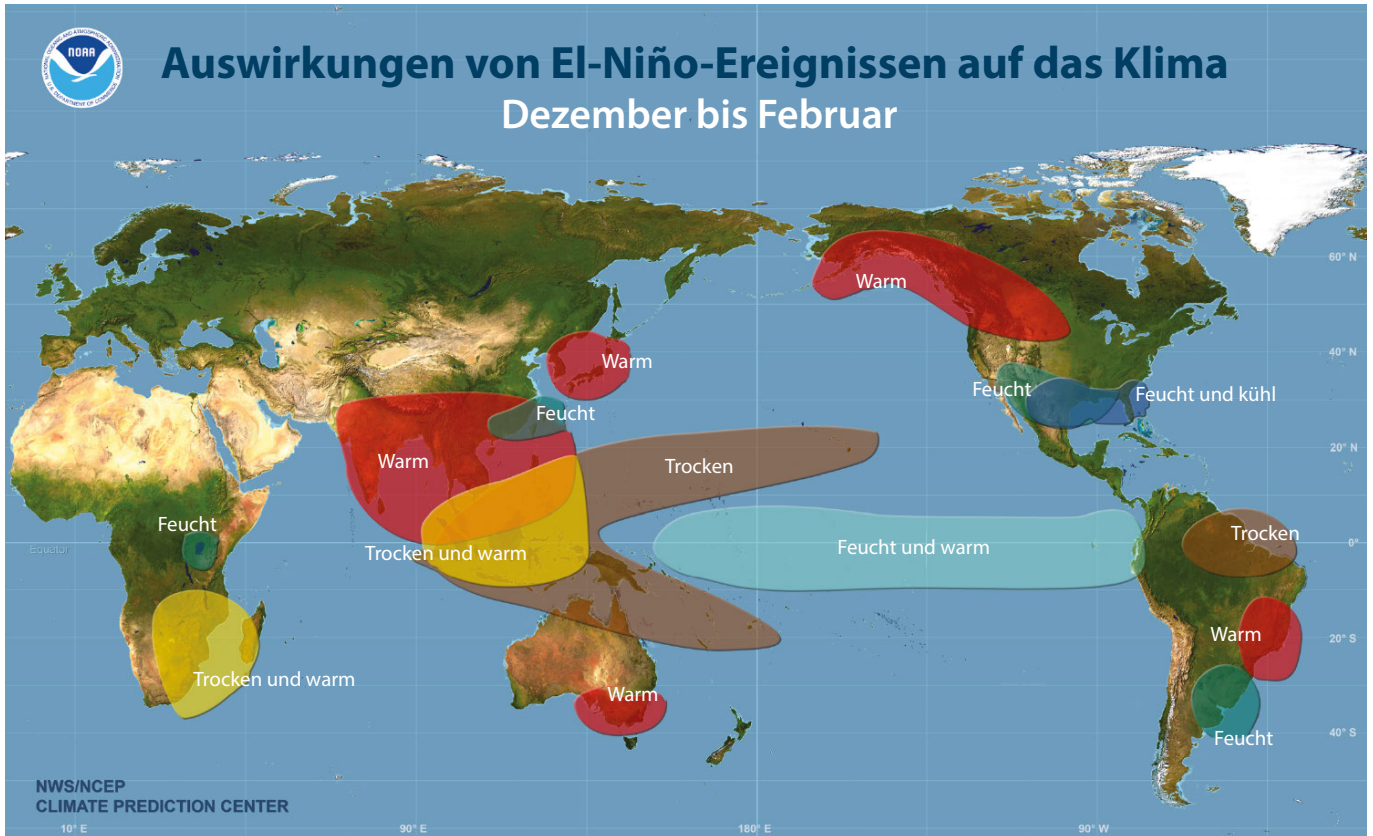
Der Klimawandel kann außerdem zu humanitären Krisen und Konflikten beitragen. Eine schwere Dürre in Ostafrika im Jahr 2011 hat vermutlich die Hungersnot in Somalia (mit) ausgelöst, die 1 Million Menschen heimatlos machte; die Sterblichkeit erreichte in einigen Flüchtlingslagern 7,4/10.000 Menschen. Wegen Einbußen bei der Getreideernte durch die Hitzeperiode im Jahr 2010 stoppte Russland seine Getreideexporte, was wiederum zu steigenden Getreidepreisen auf dem Weltmarkt und letztlich zu Unruhen in Entwicklungsländern führte.

### AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF INFektionsKRANKHEITEN

Die Inzidenz der meisten, wenn nicht aller Infektionskrankheiten hängt vom Klima ab. Für jede Infektionskrankheit ist der Klimawandel aber nur einer von vielen Faktoren, die die Epidemiologie einer Erkrankung bestimmen, und oft ist er nicht der wichtigste. Selbst wenn der Klimawandel günstige Bedingungen für die Ausbreitung von Infektionen schafft, können diese durch Interventionen wie Vektorkontrolle und antibiotische Behandlung möglicherweise beherrscht werden.

Der Nachweis eines Einflusses des Klimawandels auf eine neu auftretende Erkrankung kann eine Herausforderung sein. Forschungen mit Tierpathogenen, die in den meisten Fällen weniger gut überwacht werden und bei denen seltener interveniert wird als bei Menschen, liefern Hinweise, wie der Klimawandel die Ausbreitung von Krankheiten beeinflussen könnte. Beispielsweise verkürzt sich der Lebenszyklus von parasitären Nematoden von Karibus und Moschusochsen





**Abbildung 120-4** Charakteristische Wetteranomalien als Auswirkungen von El-Niño-Ereignissen, aufgeschlüsselt nach der Jahreszeit. (Quelle: [www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ENSO/ENSO-Global-Impacts/High-Resolution/](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ENSO/ENSO-Global-Impacts/High-Resolution/))

bei steigenden Temperaturen. Mit Erwärmung der Arktis kommt es zu einem stärkeren Nematoden-Befall der Tiere mit erhöhter Morbidität und Mortalität. Andere Beispiele aus dem Tierreich, etwa die Ausbreitung des parasitären Protozoons *Perkinsus marinus* in Austern, zeigen, wie eine Erwärmung den Lebensraum von Pathogenen erweitern kann, die früher durch kältere Temperaturen in Schach gehalten wurden.

Diese und andere Untersuchungen an Tieren zeigen einen teilweise deutlichen Einfluss des Klimawandels auf Infektionen. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit Infektionskrankheiten, für die wissenschaftliche Daten zum Einfluss des Klimawandels vorliegen.

### ■ VON VEKTOREN ÜBERTRAGENE ERKRANKUNGEN

Da Insekten Kaltblüter sind, wird ihre geografische Verbreitung durch Umgebungstemperaturen diktiert. Mit Zunahme der Temperatur, insbesondere der nächtlichen Tiefsttemperaturen, können sich Insekten weiter in Richtung der Pole und in Höhenlagen ausbreiten. Während Moskitos also neue klimatisch geeignete Regionen erobern, können ihre derzeitigen Habitate als Folge extremer Hitzewellen möglicherweise für sie ungeeignet werden.

Zusätzlich reagieren Insekten sensibel auf die Verfügbarkeit von Wasser. Moskitos, die Malaria, Dengue-Fieber und andere Infektionen übertragen, legen ihre Eier in oder an Wassertümpeln ab, die durch starke Niederschläge entstehen. Im Amazonasgebiet wurde beobachtet, dass sich solche Tümpel auch während Dürreperioden bilden, wenn Flüsse zurückweichen und einzelne stehende Gewässer bleiben, an denen Anopheles-Moskitos ihre Eier ablegen können. Diese Beobachtungen haben Interesse am möglicherweise fördernden Einfluss eines intensivierten Wasserkreislaufs auf die Ausbreitung von Erkrankungen geweckt, die durch Moskitos übertragen werden.

#### Malaria

**Temperatur** Bei höheren Temperaturen stechen Moskitos häufiger, die Reproduktionszyklen der Parasiten werden kürzer und die Plasmodien übertragenden Moskitos können in Regionen überleben, die früher zu kalt waren. Modelle haben Hochlandgebiete in Ostafrika und Südamerika als die Gebiete identifiziert, in denen möglicherweise das höchste Risiko für eine steigende Malariainzidenz aufgrund steigender Temperaturen besteht. Weiterhin hat eine Analyse der jährlichen Malariaerkrankungen in Ecuador und Kolumbien gezeigt, dass in wärmeren Jahren die Inzidenz in den höheren Regionen steigt. Die Bevölkerung in diesen Gebieten könnte darüber hinaus aufgrund einer fehlenden Immunität anfälliger gegenüber Malariaepidemien sein.

Obwohl zunehmende Temperaturen potenziell die Krankheitslast vergrößern können, hängt die Malariainzidenz doch nicht streng linear mit der Temperatur zusammen. Auch wenn Moskitos und Parasiten sich an wärmeres Klima anpassen können, liegt die derzeitige optimale Temperatur für eine Übertragung bei ca. 25 °C, mit einem Bereich zwischen 16 °C und 34 °C. Steigende Temperaturen können sich außerdem unterschiedlich auf die extrinsische Inkubationszeit der Parasiten und den Reproduktionszyklus der Moskitos auswirken. Es wurde gezeigt, dass eine Asynchronie zwischen diesen beiden temperaturabhängigen Prozessen die Übertragungsfähigkeit vermindern kann.

$rVc$  ist die Vektorkapazität im Verhältnis zur Ratio aus Vektor und Bevölkerung und wird definiert durch die Gleichung  $rVc = a^2 b_h b_m e^{-\mu_m n}$ , wobei  $a$  die Stichrate des Vektors ist,  $b_h$  ist die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung vom Vektor auf den Menschen pro Stich;  $b_m$  ist die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung vom Menschen auf den Vektor pro Stich;  $n$  ist die Dauer der extrinsischen Inkubation und  $\mu_m$  die Mortalität des Vektors.

**Niederschläge** Das Vorkommen von Anopheles-Moskitos korreliert stark mit der Verfügbarkeit von oberflächlichen Wassertümpeln für die Eiablage, und die Häufigkeit von Stichen wurde mit der Bodenfeuchtigkeit (als Surrogatparameter für das Vorhandensein solcher Tümpel) in Zusammenhang gebracht. Untersuchungen im ostafrikanischen Hochland haben gezeigt, dass vermehrte Schwankungen der Niederschlagsmengen über die Zeit die Assoziation zwischen Niederschlägen und Inzidenz der Malaria verstärken. Demgegenüber können extreme Regenfälle auch Moskitolarven wegschülen und somit den sonst fördernden Auswirkungen der Niederschläge auf die Malariaverbreitung entgegenstehen.

**Projektionen** Klimamodelle haben erste Projektionen auf regionaler Ebene geliefert, die nationalen und lokalen Gesundheitsbehörden eine Identifizierung von Gebieten erlauben, die klimatisch günstig für Malaria sind. Klimamodelle machen Aussagen zu Temperaturen und Niederschlagsbereichen, die für eine Malariaübertragung notwendig sind, können aber nicht die möglichen Auswirkungen von Malariakontrollprogrammen berücksichtigen. Trotz des Klimawandels kam es im vergangenen Jahrhundert zu einer weltweiten Verminderung der Malariaendemiegebiete, bedingt durch die durchgeführten Interventionen.

Trotz intensiver Anstrengungen bleibt Malaria die vektorübertragene Erkrankung mit der weltweit größten Morbidität und Mortalität. Vor allem in den Regionen, die besonders von Malaria betroffen sind und in denen die Infrastruktur des öffentlichen Gesundheitswesens keine ausreichende Kontrolle ermöglicht, können Klimamodelle nützlich zur Abschätzung der Erkrankungsausbreitung sein. Modell-Studien in Ländern südlich der Sahara lassen vermuten, dass sich in Ostafrika im Verlauf dieses Jahrhunderts die klimatischen Bedingungen für eine Ausbreitung von Malariaendemiegebieten verbessern, nicht aber in Westafrika. Bis zum Jahr 2100 überschreiten die dortigen Temperaturen die für eine Malariaübertragung optimalen Werte vermutlich deutlich, und das Klima könnte außerdem trockener werden. Demgegenüber würden höhere Temperaturen und veränderte Niederschläge eine Ausbreitung der Malaria im ostafrikanischen Hochland erlauben. Der Klimawandel schafft außerdem möglicherweise günstige Bedingungen für eine Malariaausbreitung in den subtropischen und gemäßigten Regionen von Amerika, Europa und Asien.

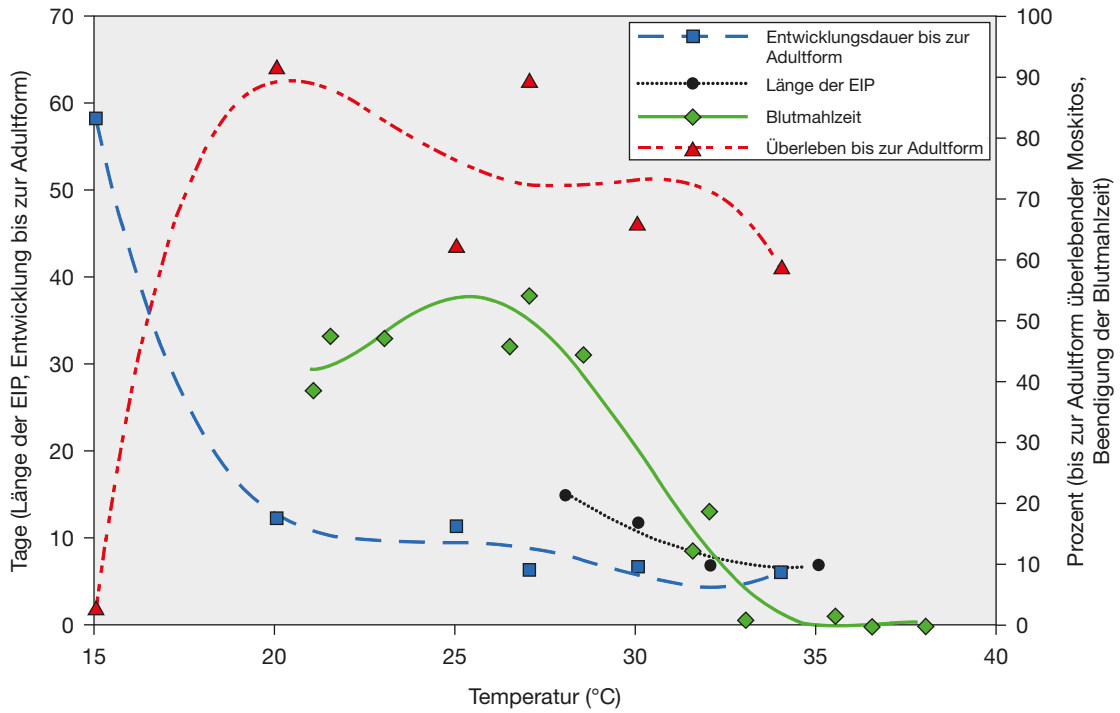
Bis ins 19. Jahrhundert war Malaria bis nach Nordeuropa verbreitet. In Südeuropa gab es Regionen mit starker Transmission. Anopheles-Mücken, die Malariaerreger übertragen könnten, sind in Europa und auch in Deutschland weiterhin vorhanden. Patienten mit importierter Malaria können prinzipiell, sofern sie Malariaerreger in übertragungsfähigen Entwicklungsstadien (Gametozyten) im Blut tragen, als Infektionsquelle für einheimische vektorkompetente Anopheles-Mücken dienen. Einzelfälle von autochthoner Malaria wurden in Deutschland beschrieben, so etwa 1997 bei zwei Patienten in einem Duisburger Krankenhaus, in dem gleichzeitig ein Malariapatient stationär behandelt wurde. Mit zunehmender Erwärmung werden zunächst in Südeuropa und später in Deutschland die Voraussetzungen für eine Malariaübertragung günstiger werden. Mit sporadischen Fällen autochthoner Übertragung ist also zu rechnen. Größere Ausbrüche von autochthoner Malaria oder gar eine längerfristige Etablierung von Plasmodien in Deutschland sind angesichts des hohen medizinischen Standards (Früherkennung und effiziente Therapie bei Malariakerkrankten und damit Verhinderung von übertragungsfähigen Erregerreservoirs) unwahrscheinlich.

#### Dengue

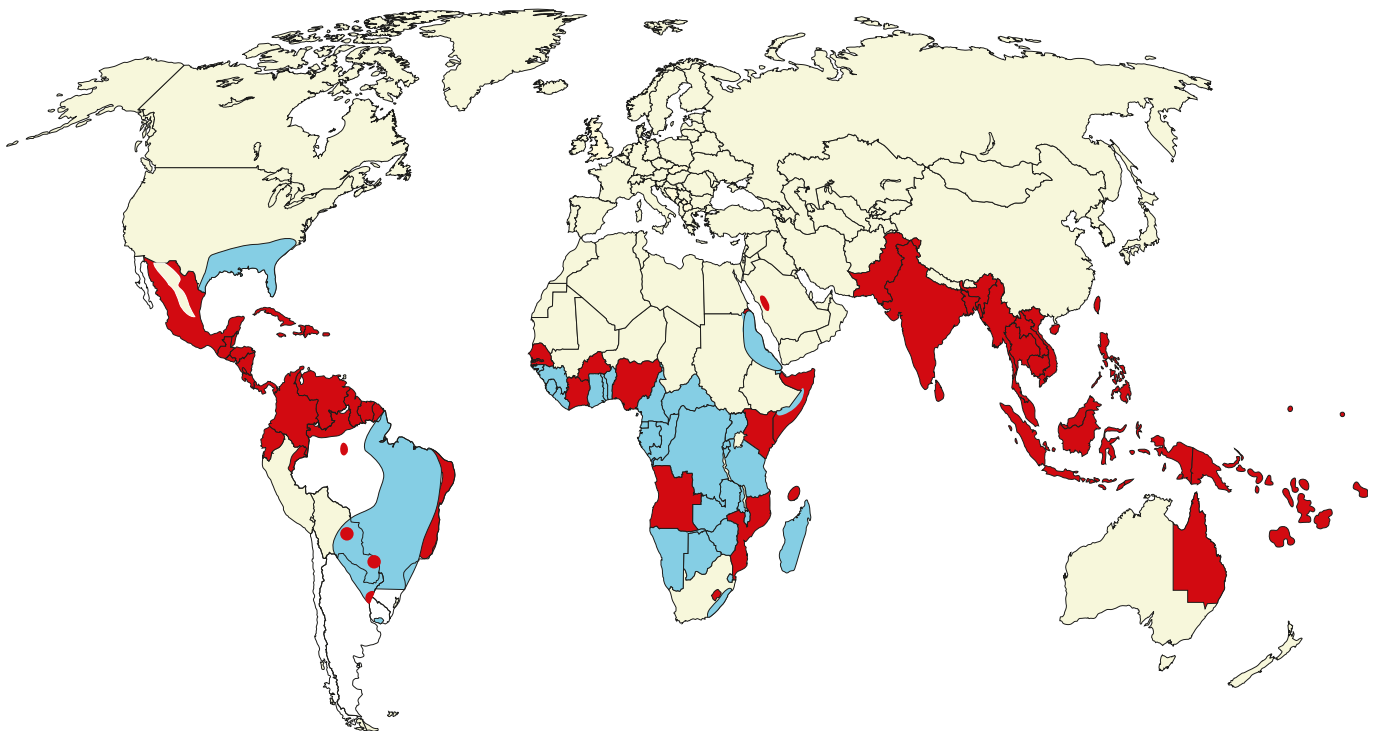
Wie bei der Malaria ist das Auftreten von Dengue-Fieber abhängig von der Temperatur (Abb. 120-5). Höhere Temperaturen beschleunigen die Entwicklung der Larven und das Auftreten adulter *Aedes*-Moskitos. Ebenso ist die Übertragung des Dengue-Virus von der Differenz zwischen Tageshöchst- und Tagestiefsttemperatur abhängig, wobei niedrigere Werte mit einer höheren Übertragungswahrscheinlichkeit einhergehen. Temperaturen < 15 °C oder > 36 °C vermindern die Stichhäufigkeit deutlich. In einem Rhesusaffenmodell des Dengue-Fiebers dauerte die Virusreplikation 7 Tage bei Temperaturen > 32–35 °C; bei Temperaturen von 30 °C dagegen waren es mindestens 12 Tage, und bei 26 °C war keine regelmäßige Virusreplikation mehr nachweisbar. Untersuchungen zum Dengue-Fieber in Neukaledonien haben gezeigt, dass die Virusübertragungsrate bei ca. 32 °C ein Maximum erreicht, wahrscheinlich durch eine Kombination aus der kürzeren extrinsischen Inkubationszeit des Virus im Mosquito, der höheren Stichrate und der schnelleren Entwicklung der Moskitos. Daneben ist die maximale relative Feuchtigkeit ein wichtiger Prädiktor für Ausbrüche des Dengue-Fiebers.

Der Zusammenhang zwischen Dengue-Fieber-Epidemien und Niederschlägen ist in der wissenschaftlichen Literatur weniger deutlich, möglicherweise wegen der größeren Abhängigkeit des Moskitos von häuslichen Eiablagestätten anstelle natürlicher Wassertümpel. Einige Studien haben festgestellt, dass eine verbesserte Versorgung mit fließendem Wasser mit Dengue-Epidemien zusammenhängt, vermutlich, weil dann den Moskitos häufiger Wasservorräte auch in Haushalten zugänglich sind. Dennoch haben verschiedene Untersuchungen Niederschläge als Prädiktoren saisonaler Dengue-Epidemien gesichert.

Die derzeitige globale Verbreitung des Dengue-Fiebers überlappt stark mit der von *Aedes*-Moskitos (Abb. 120-6). Das Vorkommen von *Aedes* in großen Gebieten von Nord- und Südamerika und von Afrika ohne endemisches Dengue-Fieber illustriert, dass neben den klimatischen Bedingungen weitere Variablen für das Auftreten der Erkrankung relevant sind. Dennoch gehen gekoppelte Klima-Epidemiologie-Modelle von dramatischen Verschiebungen der relativen Vektorkapazität bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus, wenn die Freisetzung



**Abbildung 120-5** Auswirkungen der Temperatur auf Variablen im Zusammenhang mit der Übertragung des Dengue-Fieber-Virus. Dargestellt sind die für die Entwicklung unreifer *Aedes-aegypti*-Moskitos zu adulten Tieren erforderliche Dauer, die Länge der extrinsischen Inkubationszeit des Dengue-Virus Typ 2 (EIP), der Prozentsatz der erwachsenen Moskitos, die eine Blutmahlzeit innerhalb von 30 min nach Verfügbarkeit der Quelle beenden, und der Prozentsatz geschlüpfter Larven, die bis ins Adultstadium überleben. (Aus Morin CW et al: *Climate and dengue transmission: evidence and implications. Environ Health Perspect* 121:1264, 2013.)



**Abbildung 120-6** Auftreten von Dengue-Fieber-Epidemien (rot) und zusätzliche Verbreitung von *Aedes-aegypti*-Moskitos ohne bisherigen Nachweis von Epidemien (türkis). (Quelle: Agricultural Research Service of the U.S. Department of Agriculture.)

von Treibhausgasen nicht deutlich reduziert wird (Abb. 120-7). In Anbetracht der kombinierten Auswirkungen von Klimawandel und Bevölkerungswachstum könnte sich die Zahl der weltweit gegenüber *A. aegypti* exponierten Menschen bis zum Jahr 2100 verdoppeln von derzeit ungefähr 4 Milliarden auf dann 8 Milliarden oder mehr.

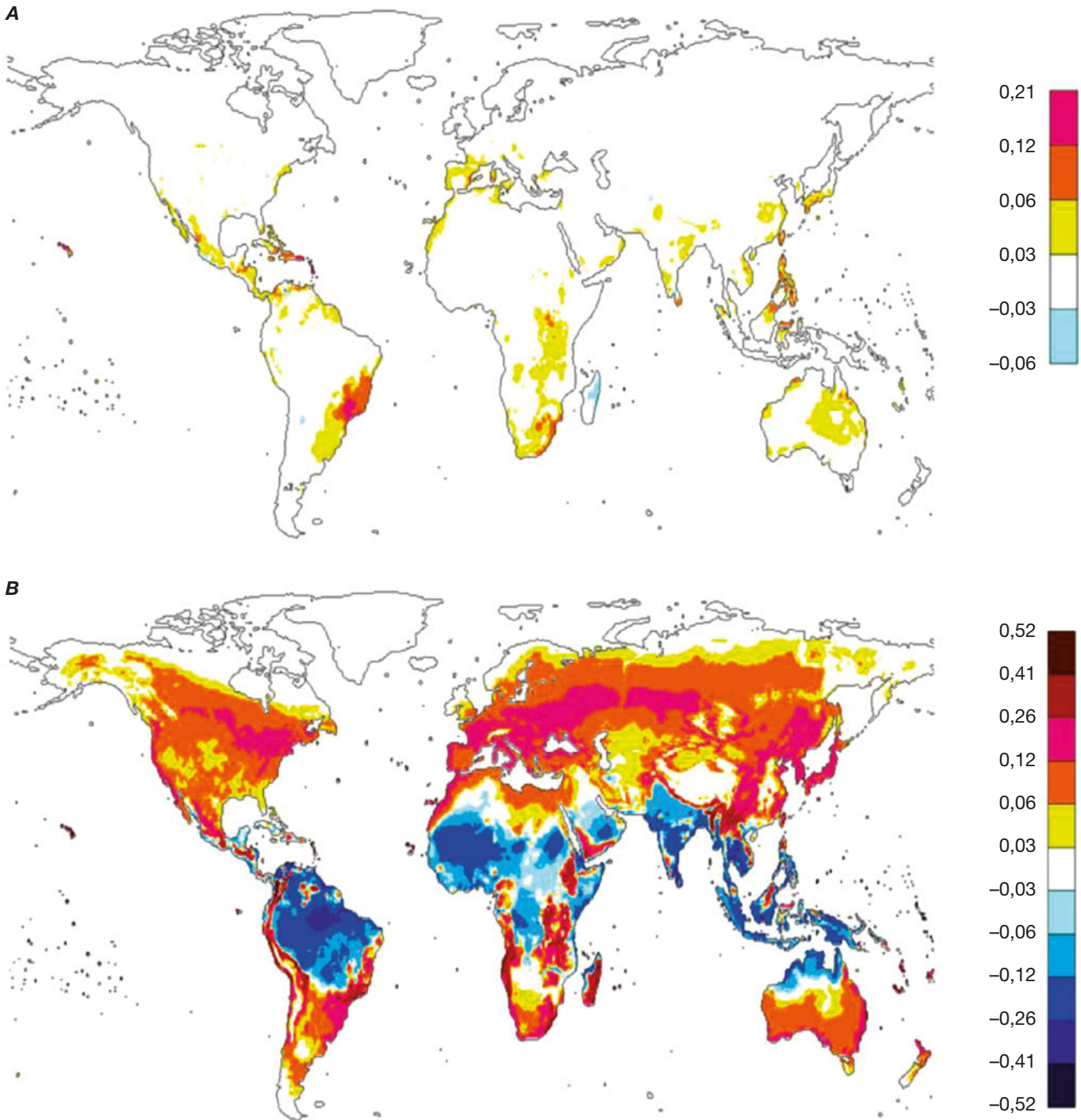
Autochthone Fälle von Dengue-Fieber sind aus Deutschland bisher nicht bekannt. Allerdings wurden autochthone Erkrankungen aus Südfrankreich und Kroatien gemeldet und *Aedes-albopictus*-Moskitos wurden seit 2007 mehrfach in Südbaden detektiert. Die meisten der ersten Fundorte lagen nahe der Autobahn A5. Wahrscheinlich wurden die Moskitos zunächst aus dem Süden eingeschleppt. Mittler-

weile wurden jedoch auch Populationen nachgewiesen, von denen man annimmt, dass sie in Deutschland überwintert haben. Das obere Rheintal bietet aufgrund des eher milden Klimas und der Lage an den nach Süden führenden Verkehrswegen günstige Bedingungen für eine langfristige Etablierung der Moskitos.

**Sonstige Arbovirus-Infektionen**

Der Klimawandel könnte die geografische Ausbreitung auch weiterer Arbovirus-Erkrankungen begünstigen wie Zika-Virusinfektionen, Chikungunya-Fieber, West-Nil-Virus-Infektion und östliche Pferdeenzephalitis. Das Zika-Virus hat von Französisch-Polynesien kom-





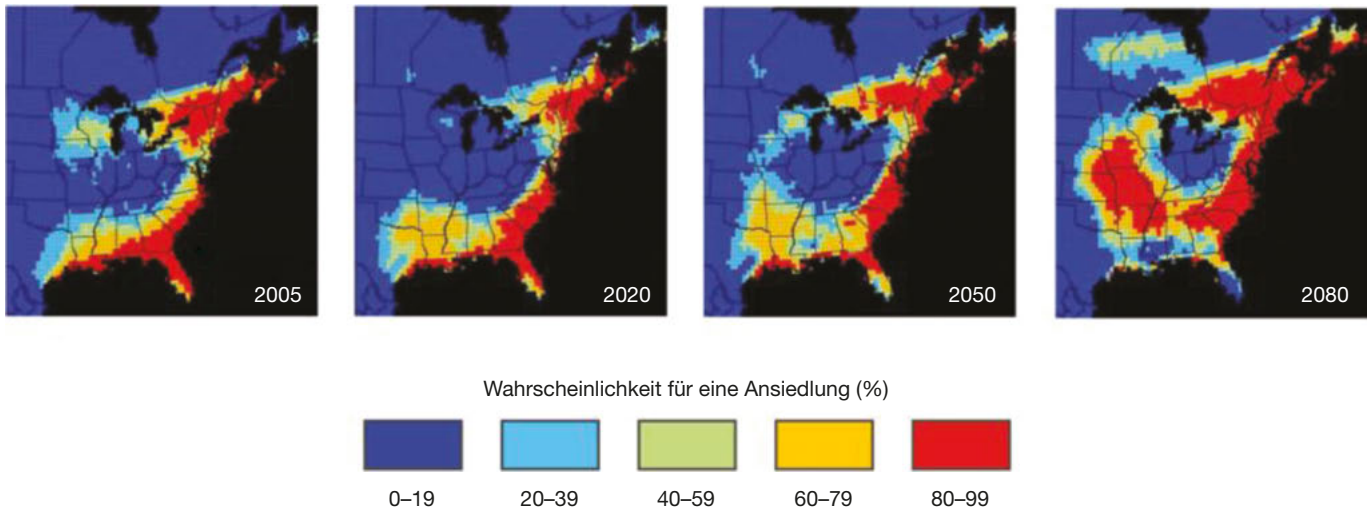
**Abbildung 120-7** Trend des mittleren jährlichen epidemischen Potenzials von Dengue-Fieber (rVc). Unterschiede von rVc beruhen auf dem 30-Jahres-Mittel von Temperaturen und täglichen Temperaturschwankungen. **A.** Unterschiede zwischen den Zeiträumen 1980–2009 und 1901–1930. **B.** Unterschiede zwischen den Zeiträumen 2070–2099 und 1980–2009. Der errechnete Mittelwert von rVc beruht auf fünf verschiedenen Klimamodellen unter dem RCP-8,5-Szenario, das hohe Treibhausgasemissionen zugrunde legt. Der farbige Balken stellt die rVc-Werte dar. (Quelle: Liu-Helmersson J et al: Vectorial capacity of *Aedes aegypti*: effects of temperature and implications for global dengue epidemic potential. *PLoS ONE* 9:e89783, 2014 [doi:10.1371/journal.pone.0089783].)

mend etwa im Jahr 2013 die westliche Hemisphäre erreicht und sich im Jahr 2016 in Brasilien schnell ausgebreitet. Obwohl der Luftverkehr für den Übergang des Virus auf den amerikanischen Kontinent von wesentlicher Bedeutung war, legen die verfügbaren Daten nahe, dass das El-Niño-Ereignis von 2015 optimale klimatische Bedingungen für die Etablierung und weitere Ausbreitung der Infektion geschaffen hat. *Aedes aegypti* ist der primäre Vektor des Zika-Virus. Im Jahr 2007 traten in Italien erstmalig Chikungunya-Erkrankungen auf, die vorher im Wesentlichen auf Afrika beschränkt waren. Klimamodelle gehen davon aus, dass bei Präsenz effektiver Vektoren die Bedingungen für eine Etablierung des Chikungunya-Virus in Westeuropa, vor allem in Frankreich, in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts günstig sein werden. Für Nordamerika wird innerhalb dieses Jahrhunderts mit einer nördlichen Ausdehnung des Verbreitungsgebiets von West Nil-Virusfieber gerechnet. Derzeitige Zentren in Nordame-

rika sind das Central Valley in Kalifornien, das südwestliche Arizona, Südtexas und Louisiana, wo sowohl günstige klimatische Voraussetzungen als auch aviäre Reservoirs für das Virus gegeben sind. Bis zur Mitte dieses Jahrhunderts werden der nördliche Mittelwesten und die Neuenglandstaaten klimatisch für das West-Nil-Virus geeignet sein, bis zum Ende des Jahrhunderts könnte sich das Risikogebiet dann weiter bis ins südliche Kanada ausdehnen. Ob es letztlich dazu kommt, hängt unter anderem von der Verfügbarkeit der Reservoirs und von Mosquito-Kontrollprogrammen ab.

Auch in Deutschland wurden autochthone West-Nil-Virus-Infektionen bei Vögeln und Pferden nachgewiesen. Bisher handelt es sich um Einzelfälle. Zusätzlich kam es 2018 zu einer humanen, in Deutschland erworbenen Infektion, wahrscheinlich bedingt durch Erregerübertragung während der Untersuchung eines verstorbenen Vogels in der Pathologie.

## Erwartete Veränderungen des Zecken-Habitats



**Abbildung 120-8** Derzeitige und erwartete zukünftige Ausbreitung von *Ixodes scapularis*. (Quelle: U.S. National Climate Assessment 2014, adaptiert nach Brownstein JS et al: Effect of climate change on Lyme disease risk in North America. *Ecohealth* 2:38, 2005.)

### Lyme-Borreliose

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich *Ixodes scapularis*, der Hauptvektor der Lyme-Borreliose, Anaplasmosen und Babesiose in den Neuenglandstaaten, wegen der zunehmenden Temperaturen auch in Kanada angesiedelt. Im Rahmen des Klimawandels wird eine noch weitere Ausbreitung der Zecken erwartet (Abb. 120-8).

Die Lyme-Borreliose, hervorgerufen von dem Spirochäten *Borrelia burgdorferi*, ist mit geschätzten 30.000 Fällen pro Jahr die häufigste vektorübertragene Erkrankung Nordamerikas. Das in (Abb. 120-8) verwendete Modell zeigte eine 95%ige Genauigkeit bei der Abschätzung der derzeitigen *Ixodes-scapularis*-Verbreitung und geht bis zum Jahr 2080 von einer deutlichen Erweiterung des Habitats aus. Dadurch werden deutlich mehr Menschen dem Risiko von Zecken übertragenen Krankheiten ausgesetzt, insbesondere in Quebec, Iowa und Arkansas. Demgegenüber könnten sich die Bedingungen für Zecken in einigen Gebieten an der Golfküste bis zum Ende dieses Jahrhunderts verschlechtern.

In Deutschland ist *Ixodes ricinus* Hauptvektor der Borreliose. Es besteht keine einheitliche Meldepflicht. Die Inzidenzen in den östlichen Bundesländern waren in den letzten Jahren starken Schwankungen unterworfen. In Deutschland gibt es keinen einfachen Zusammenhang zwischen Temperatur und Borreliose-Inzidenz beim Menschen. Die geografische Verteilung und die Populationsdichte der Zecken hängen von weiteren ökologischen und klimatischen Faktoren wie Habitatstruktur (z. B. Vegetation), Populationsdichte der Reservoirtiere (z. B. Nager) und Feuchtigkeit ab. Warme Winter erleichtern das Überleben und die Vermehrung der Vektoren und begünstigen eine höhere Zeckendichte und -aktivität bereits im Frühjahr. Andererseits führen heiße trockene Sommer zu einer Reduktion der Zeckenpopulationen.

### Sonstige von Zecken übertragene Erkrankungen

Zusätzlich zu den genannten Erkrankungen kann der Klimawandel die weitere Verbreitung vieler durch Zecken übertragener Erkrankungen begünstigen. Im deutschsprachigen Raum erscheint die Frühsommer-Meningoenzephalitis besonders relevant. Nach der Borreliose stellt sie in Deutschland die zweithäufigste vektorübertragene Erkrankung dar. Das Frühsommer-Meningoenzephalitis-Virus gehört zu den Flaviviren. Die das Virus übertragenden Zecken (in Deutschland in erster Linie *Ixodes ricinus*) kommen in weiten Teilen Europas vor. Die Risikogebiete wurden in den letzten Jahren ausgeweitet. Neben Bayern und Baden-Württemberg wurden nun auch einige Gebiete in Hessen, Rheinland-Pfalz, dem Saarland, Thüringen und in Sachsen als Risikogebiete ausgewiesen. Eine weitere Ausdehnung in den nächsten Jahren erscheint möglich. Insbesondere während der Zeckensaison sollte bei entsprechender Symptomatik überall in Deutschland differenzialdiagnostisch an eine Frühsommer-Meningoenzephalitis gedacht werden.

Hyalomma-Zecken können als Vektoren verschiedene Infektionskrankheiten übertragen, darunter das potenziell tödliche Krim-Kongo Hämorrhagische Fieber. Im Jahr 2018 wurde diese Zeckenspezies erstmalig in größerer Anzahl in acht deutschen Bundesländern nachgewiesen. Ein Jahr später wurden dann auch Hyalomma-Zecken detektiert, die mit großer Wahrscheinlichkeit in Deutschland überwintert hatten. Bisher wurden in den untersuchten Zecken keine Krankheitserreger nachgewiesen.

### ■ ÜBER WASSER ÜBERTRAGENE ERKRANKUNGEN

Ausbrüche von über Wasser übertragene Erkrankungen sind mit heftigen Niederschlägen assoziiert. Eine Übersichtsarbeit zu 548 solcher Ausbrüche in den USA hat gezeigt, dass in 51 % der Fälle Niederschlagsmengen oberhalb des 90. Perzentils vorangegangen waren. Seit dem Jahr 1900 kam es in den meisten Regionen der USA, mit Ausnahme des Südwestens und Hawaii, zu einer Zunahme schwerer Niederschläge (Abb. 120-9), am stärksten ausgeprägt in den Neuenglandstaaten und Alaska. Klimamodelle gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2100 schwere Niederschläge, wie sie derzeit nur alle 20 Jahre auftreten, landesweit zunehmen werden (Abb. 120-10). Das Risiko für das Auftreten eines solchen Szenarios könnte sich um den Faktor 2 bis 5 erhöhen, in Abhängigkeit vom Ausmaß, in dem die Emission von Treibhausgasen zu Beginn des 21. Jahrhunderts vermindert wird.

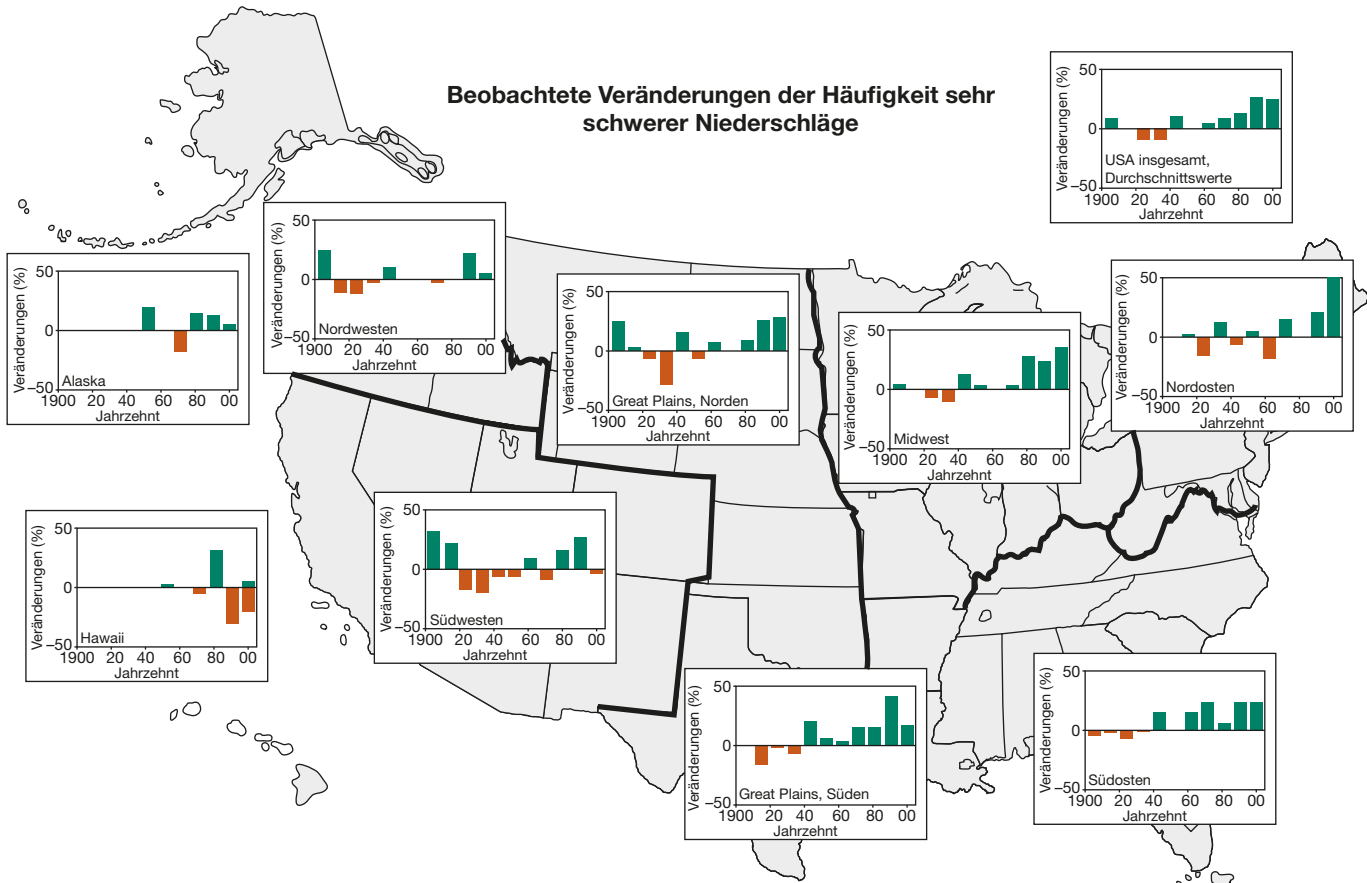
Die meisten Erkrankungsausbrüche nach schweren Regenfällen gehen auf eine Kontamination des Trinkwassers zurück. Dabei treten nach Verschmutzung von Oberflächenwasser die Ausbrüche im Allgemeinen innerhalb eines Monats nach den Niederschlägen auf, bei Grundwasserkontamination mehr als 2 Monate später. Gemäß einem Review der wissenschaftlichen Literatur zu durch Wasser übertragenen Erkrankungen sind *Vibrio*- und *Leptospira*-Spezies die im Gefolge schwerer Niederschläge am häufigsten auftretenden Pathogene.

### Mischkanalisation

Etwa 40 Millionen Menschen in den USA und weitere Millionen Menschen weltweit leben mit kombinierten Abwassersystemen, in denen Regenwasser und Abwasser im gleichen Kanalsystem zu Kläranlagen transportiert werden. Diese Systeme waren an die klimatischen Bedingungen des 19. Jahrhunderts angepasst, als heftige Niederschläge seltener auftraten als heute. In vielen Städten weltweit kommt es immer häufiger zu einem Überlauf dieser Kanalisationssysteme, mit dem Ergebnis der unkontrollierten Einleitung ungeklärter Abwässer in Flüsse und Seen. Dabei können sowohl Schwermetalle und andere chemische Schadstoffe als auch eine Reihe von Pathogenen freigesetzt werden. Epidemische Erkrankungen durch das Hepatitis-A-Virus, *Escherichia coli* O157:H7 und Kryptosporidien wurden in den USA mit derartigen Überläufen in Zusammenhang gebracht.

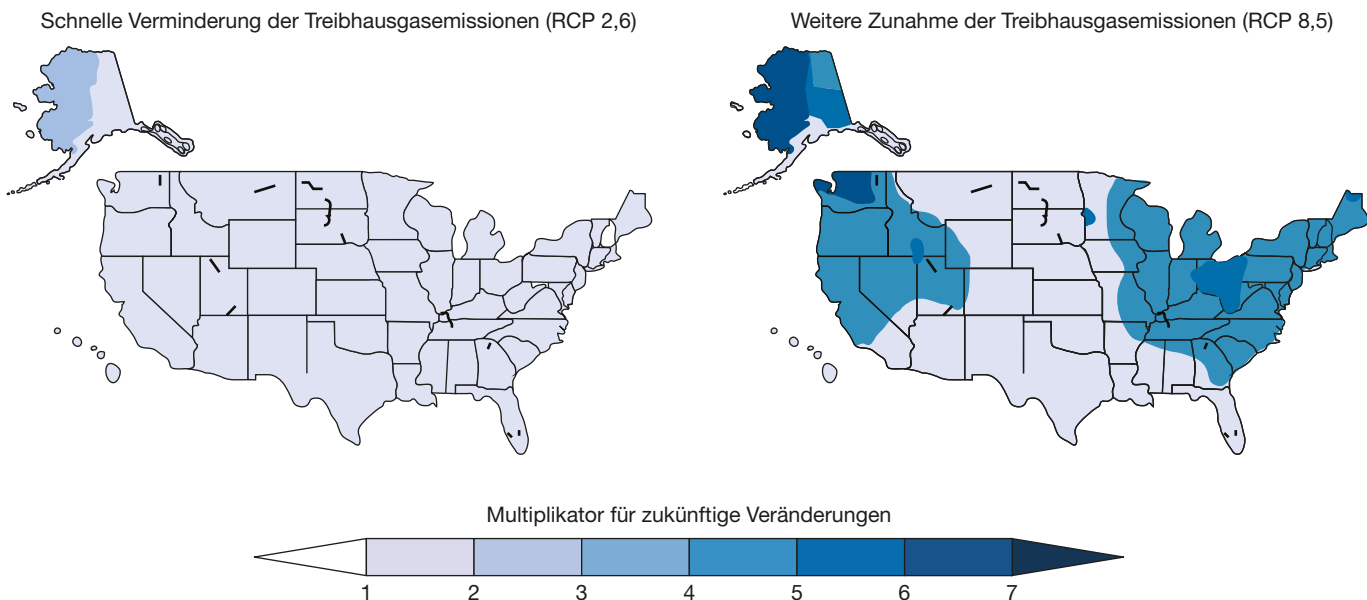


**Beobachtete Veränderungen der Häufigkeit sehr schwerer Niederschläge**



**Abbildung 120-9** Prozentuale Veränderungen der jährlichen Niederschlagsmengen, die in Form sehr schwerer Niederschläge auftreten, definiert als Niederschlagsmengen oberhalb des 99. Perzentils im Zeitraum 1901–2012 für verschiedene Regionen der USA. Die Veränderungen beziehen sich auf den Durchschnitt der Jahre 1901–1960, mit Ausnahme von Alaska und Hawaii (Durchschnitt der Jahre 1951–1980). (Quelle: U.S. National Climate Assessment 2014, NOAA National Climate Data Center/Cooperative Institute for Climate and Satellites, North Carolina.)

**Prognostizierte Veränderung schwerer Niederschläge**

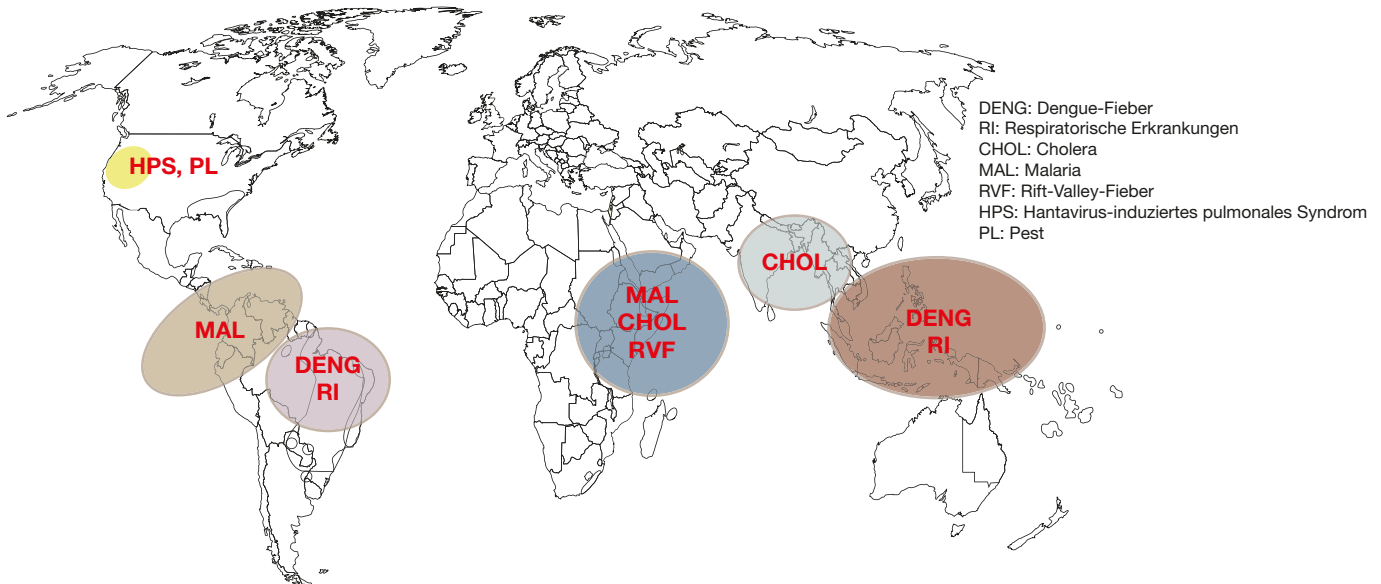


**Abbildung 120-10** Zunehmende Häufigkeit schwerer täglicher Niederschläge, definiert als eine Tagesregenmenge, die derzeit einmal in 20 Jahren auftritt, Ende des 21. Jahrhunderts (2081–2100) im Vergleich zur Häufigkeit Ende des 20. Jahrhunderts (1981–2000). Die RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) beschreiben plausible zukünftige Klimaverläufe auf Grundlage bestimmter Netto-Strahlungsantriebswerte (z. B. 2,6 oder 8,5 in der Abbildung) für das Jahr 2100. (Quelle: U.S. National Climate Assessment 2014, NOAA National Climate Data Center/Cooperative Institute for Climate and Satellites, North Carolina.)

**Ansteigende Temperaturen und Vibrio-Spezies**

Wärmere Temperaturen begünstigen die Vermehrung von *Vibrio* spp. und dadurch verursachte Krankheitsausbrüche, wie geschehen in den Ostseeanrainerstaaten, in Chile, Israel, Nordwestspanien und an der Nordwestküste der USA. An der Ostsee könnten *Vibrio*-Infektionen

wegen der schnelleren Klimaerwärmung in Nähe der Pole und des relativ geringen Salzgehalts des Wassers besonders häufig vorkommen. Im Jahr 2004 kam es zu einem Krankheitsausbruch durch *Vibrio parahaemolyticus*, der auf den Verzehr von Alaska-Austern zurückzuführen war. Bis zu diesem Zeitpunkt war der Erreger in Alaska-



**Abbildung 120-11** Charakteristische Muster von Krankheitsausbrüchen in Zusammenhang mit El-Niño-Ereignissen im Zeitraum 2006–2007. (Quelle: Anyamba A et al: *Developing global climate anomalies suggest potential disease risks for 2006–2007. Int J Health Geogr* 5:60, 2006.)

Austern unbekannt gewesen. Das bekannte Verbreitungsgebiet der Erkrankung erweiterte sich im Rahmen dieses Ausbruchs um 1000 km nach Norden.

#### ■ AUSBRÜCHE IN ZUSAMMENHANG MIT DEM ENSO-PHÄNOMEN

In der Vergangenheit wurden El-Niño-Ereignisse als Modelle herangezogen, um das Potenzial für Epidemien in Zusammenhang mit extremen Wetterverhältnissen zu untersuchen. Nach aktuellen Daten könnte der Klimawandel selbst El-Niño-Ereignisse verstärken, die wiederum das Auftreten von Epidemien in bestimmten Regionen fördern (Abb. 120-11).

Zusammenhänge von El Niño mit Ausbrüchen von Rift-Valley-Fieber im östlichen und südlichen Afrika sind seit den 1950er-Jahren bekannt. Die bei El Niño herrschenden nassen Wetterbedingungen begünstigen Insekten, die die Erkrankung in diesen Gebieten übertragen. Durch die deutliche Assoziation von El-Niño-Bedingungen und Krankheitsinzidenzen konnten Modelle erfolgreich Epidemien des Rift-Valley-Fiebers bei Mensch und Tier vorhersagen; in der El-Niño-Saison 2006–2007 gelang das beispielsweise 2–6 Wochen vor Ausbrüchen in Somalia, Kenia und Tansania.

Die Zusammenhänge von El Niño mit der Malariainzidenz in Afrika stellen sich uneinheitlich dar. Die stärksten Assoziationen fanden sich in Südafrika und Swasiland, wo relativ belastbare Daten verfügbar sind; aber auch dort verfehlte die beobachtete Risikozunahme die statistische Signifikanz. Eine deutlichere Beziehung mit El Niño zeigten mehrere südamerikanische Studien. So ergaben Untersuchungen zur Malariainzidenz in Kolumbien zwischen 1960 und 2006 eine 20%ige Zunahme der Inzidenz bei Zunahme der Temperatur um 1 °C.

El-Niño-Jahre gehen oft mit einer erhöhten Inzidenz von Dengue-Fieber einher. Studien zu Ausbrüchen der Erkrankung in Thailand von 1996–2005 zeigten, dass 15–22 % der Varianz in der monatlichen Inzidenz der Erkrankung auf El Niño zurückzuführen waren. In Südamerika fand sich im Zeitraum 1995 bis 2010 eine erhöhte Inzidenz von Dengue-Fieber während der El-Niño-Ereignisse von 1997–1998 und 2006–2007.

#### KLIMAWANDEL, VERTREIBUNG UND EPIDEMIEEN

Aus vielerlei Gründen, darunter Mangel an Trinkwasser, Flutkatastrophen, Nahrungsmittelknappheit und durch klimatische Veränderungen ausgelöste Konflikte, übt der Klimawandel Migrationsdruck aus und wird das in Zukunft weiter tun. Der Zusammenhang zwischen Migration und Epidemien in den auswandernden Gruppen und in der aufnehmenden Gemeinschaft ist lange bekannt. Die spezifischen Pathogene und Krankheiten hängen dabei von den jeweils endemischen Erkrankungen in der betroffenen Bevölkerung ab.

Umfangreiche Migrationsbewegungen sind nach extremen Niederschlägen keine Seltenheit. Der Hurrikan Katrina vertrieb beispielsweise 1 Millionen Menschen an der Golfküste der USA. Diese Flüchtlinge litten am häufigsten unter Ausbrüchen von respiratorischen, Durch-

fall- und Hauterkrankungen. Wenn es auch schwierig ist, ein einzelnes Wetterphänomen der vermehrten Treibhausgasemission zuzuschreiben, kann die Wissenschaft doch Informationen über die Wahrscheinlichkeit solcher Ereignisse liefern. So wird erwartet, dass eine Erwärmung um 1 °C die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm, der mindestens die Stärke von Katrina aufweist, um das Zwei- bis Siebenfache erhöht.

In Entwicklungsländern kann es besonders schwierig sein, Ausbrüche von Infektionskrankheiten mit klimabedingter Migration in Zusammenhang zu bringen und entsprechend zu reagieren. Die Erkrankungsrisiken lassen sich nur vermindern, wenn klimabedingte Migration und Epidemie-Foci kombiniert erfasst und bearbeitet werden.

#### EIN AUSBLICK AUF KLIMAWANDEL UND GESUNDHEIT

Klimaveränderungen haben weltweit weitreichende Folgen für die Ver- und Ausbreitung von Infektionskrankheiten. Die größte Belastung entsteht aber möglicherweise nicht im Bereich der Infektionskrankheiten. Klimaveränderungen zerstören das Fundament der Gesundheit, wie den Zugang zu sauberem Trinkwasser und Nahrungsmitteln; sie haben damit das Potenzial, Fortschritte bei den großen gesundheitlichen Problemen wie Mangelernährung zu untergraben. Zusätzlich gehen Ressourcen-Knappheit und Klimainstabilitäten zunehmend mit Konflikten einher. Nach Einschätzung einiger Wissenschaftler war der Klimawandel ein Faktor in der Auslösung des Arabischen Frühlings und des Bürgerkriegs in Syrien.

Die Antwort der öffentlichen Gesundheitsbehörden auf den Klimawandel muss sowohl Abschwächungs- als auch Adaptationsmaßnahmen beinhalten. *Abschwächung* bedeutet Primärprävention und umfasst die Verminderung der Treibhausgasemissionen. Obwohl keine Einigkeit darüber besteht, wie hoch die Treibhausgasemissionen sein können, ohne mit unumkehrbaren Folgen rechnen zu müssen, haben die Regierungen der großen Industriestaaten vereinbart, die Erderwärmung bis zum Jahr 2050 auf unter 2 °C im Vergleich zu präindustriellen Werten zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen um 40–70 % unter die Werte von 2010 reduziert werden. Das Pariser Klimaabkommen von 2016 liefert die Rahmenbedingungen für die Etablierung eines weltweiten Kohlendioxidmarkts, der – zusammen mit einer Reihe weiterer grundlegender Regelungen – die Reduzierung der Treibhausgasemissionen beschleunigen könnte. Daraus könnten weitere Vorteile resultieren wie z. B. eine bessere Luftqualität durch geringere Verbrennung biologischer oder fossiler Brennstoffe. Beispielsweise erzeugt die Verwendung von Biotreibstoffen zum Kochen, wie es weltweit etwa 3 Milliarden Menschen tun, etwa ein Viertel der globalen Rußemissionen, die wiederum den Planeten aufheizen und jedes Jahr für den Tod von etwa 4 Millionen Menschen verantwortlich sind. Durch Nutzung sauberer Herde werden sowohl Klimaveränderungen als auch die mit der Innenraumluftverschmutzung verbundene Sterblichkeit reduziert.

Adaptation meint demgegenüber Sekundärprävention und zielt auf eine Verminderung der Schäden, die durch den Anstieg der Meeresspiegel, Hitzewellen, Flut- und Dürrekatastrophen, Waldbrände und sonstige von Treibhausgasen angetriebene Ereignisse entstehen. Die Wirksamkeit von Adaptationsmaßnahmen wird dadurch eingeschränkt, dass sichere Vorhersagen von Ort, Ausmaß und Dauer von extremen Wetterereignissen, wie z. B. Überflutungen durch den Anstieg der Meeresspiegel, äußerst schwierig sind.

#### WEITERFÜHRENDE LITERATUR

- ANYAMBA A et al: Prediction of a Rift Valley fever outbreak. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:955, 2009
- CAI W et al: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat Clim Change* 4:111, 2014
- CAMINADE C et al: Impact of climate change on global malaria distribution. *Proc Natl Acad Sci USA* 111:3286, 2014
- COLÓN-GONZÁLEZ FJ et al: The effects of weather and climate change on dengue. *PLoS Negl Trop Dis* 7:e2503, 2013
- GETHING PW et al: Climate change and the global malaria recession. *Nature* 465:342, 2010.
- KAMPEN H, KRONEFELD M, ZIELKE D, WERNER D: Further specimens of the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus* (Diptera, Culicidae) trapped in southwest Germany. *Parasitol Res* 112:905, 2013
- KRÜGER A, RECH A, SU XZ, TANNICH E: Two cases of autochthonous *Plasmodium falciparum* malaria in Germany with evidence for local transmission by indigenous *Anopheles plumbeus*. *Trop Med Int Health* 6:983, 2001
- STARK K, NIEDRIG M, BIEDERBICK W, MERKERT H, HACKER J: Die Auswirkungen des Klimawandels. Welche neuen Infektionskrankheiten und gesundheitlichen Probleme sind zu erwarten? *Bundesgesundheitsbl*, 2009
- NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER: Mitch: The deadliest Atlantic hurricane since 1780. Available from [www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/mitch/mitch.html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/mitch/mitch.html). Accessed January 13, 2017
- OGDEN NH et al: Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *Int J Parasitol* 36:63, 2006
- PAAIJMANS KP et al: Temperature-dependent pre-bloodmeal period and temperature-driven asynchrony between parasite development and mosquito biting rate reduce malaria transmission intensity. *PLoS One* 8:e55777, 2013
- WATTS DM et al: Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus. *Am J Trop Med Hyg* 36:143, 1987
- ZHOU G et al: Association between climate variability and malaria epidemics in the East African highlands. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:2375, 2004