



JUNI 2023
SPECIAL ISSUE **S3**

GESUNDHEITSBERICHTERSTATTUNG DES BUNDES
GEMEINSAM GETRAGEN VON RKI UND DESTATIS

Journal of Health Monitoring

**Auswirkungen des Klimawandels auf
Infektionskrankheiten und antimikrobielle
Resistenzen – Teil 1 des Sachstandsberichts
Klimawandel und Gesundheit 2023**

Auswirkungen des Klimawandels auf Infektionskrankheiten und antimikrobielle Resistenzen – Teil 1 des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit 2023

- 3 *Editorial* Gemeinsam können wir den Auswirkungen des Klimawandels begegnen
- 7 *Focus* Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023
- 36 *Focus* Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten
- 67 *Focus* Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen
- 85 *Focus* Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen
- 102 *Focus* Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11390

Robert Koch-Institut, Berlin

Gerhard Adrian¹, Martin Dietrich²,
Birgit Esser³, Andreas Hensel⁴,
Folkhard Isermeyer⁵, Dirk Messner⁶,
Thomas C. Mettenleiter⁷, Inge Paulini⁸,
Sabine Riewenherm⁹, Lars Schaade¹⁰,
Ralph Tiesler¹¹, Lothar H. Wieler¹²

¹ Deutscher Wetterdienst

² Bundeszentrale für gesundheitliche
Aufklärung

³ Bundesanstalt für Gewässerkunde

⁴ Bundesinstitut für Risikobewertung

⁵ Thünen-Institut

⁶ Umweltbundesamt

⁷ Friedrich-Loeffler-Institut

⁸ Bundesamt für Strahlenschutz

⁹ Bundesamt für Naturschutz

¹⁰ Robert Koch-Institut

¹¹ Bundesamt für Bevölkerungsschutz und
Katastrophenhilfe

¹² Ehemals Robert Koch-Institut

Eingereicht: 24.02.2023

Akzeptiert: 24.03.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Gemeinsam können wir den Auswirkungen des Klimawandels begegnen

Der Klimawandel ist die größte Herausforderung für die Menschheit, er bedroht unsere Lebensgrundlage und somit unsere sichere Zukunft. Dabei nimmt die Bedeutung anthropogener Umweltveränderungen für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen zu. Folgerichtig müssen sich Public-Health-Systeme weltweit dieser maßgeblichen und komplexen Belastung stellen, indem sie sowohl ihre eigene Handlungsfähigkeit als auch ihre eigene Resilienz stärken.

Wie in der „Roadmap“ der International Association of National Public Health Institutes (IANPHI) hervorgehoben und von den G7-Gesundheitsministerinnen und -ministern in einem Kommuniqué unterstützt, nehmen auch die nationalen Public-Health-Institute eine bedeutende Rolle im Bereich des Klimaschutzes und der Anpassung an den Klimawandel ein [1, 2]. Insbesondere die Bereiche Ernährung und Mobilität sind für die Gesundheit relevant, da ein gesundheitsförderndes Verhalten hier gleichzeitig dem Klimaschutz dient, ebenso wie die Transformation zu nachhaltigen und widerstandsfähigen Gesundheits- sowie Public-Health-Systemen. Auch im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) spielt das Thema Gesundheit eine wichtige Rolle für effektive und nachhaltige Maßnahmen im Umgang mit der Klimakrise. Der Klimawandel betrifft jedoch viele weitere Handlungsfelder, die auf unterschiedliche Weise mit gesundheitsbezogenen Aspekten zusammenhängen, z. B. die Wasserwirtschaft, das

Bauwesen oder die Raumentwicklung. Daher erfordern gesundheitssensibler Klimaschutz und Klimawandelanpassung eine intersektorale Zusammenarbeit und den Austausch verschiedener Akteurinnen und Akteure im Sinne von One Health und Health in All Policies [3, 4].

In diesem Zusammenhang ist der vorliegende Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit ein bedeutendes Projekt, um den gesundheitlichen Herausforderungen der Klimakrise entgegenzutreten und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Institutionen und Behörden zu stärken. Interdisziplinäre und intersektorale Zusammenarbeit erachten wir, die Leitungen von Behörden in Deutschland, die an Public-Health-Themen arbeiten, als eine zentrale Voraussetzung für die bestmögliche Bewältigung der gesundheitlichen Herausforderungen des Klimawandels. Daraus folgt die Notwendigkeit einer ebenso innovativen wie kooperativen Zusammenarbeit verschiedener Sektoren nicht nur auf kommunaler, Landes- und Bundesebene, sondern auch bezogen auf den Austausch zwischen diesen Ebenen.

Der Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023 wird in drei Ausgaben einer Beitragsreihe des Journal of Health Monitoring publiziert.

Die erste Ausgabe beginnt mit einem einleitenden Beitrag, in dem das gesamte im Sachstandsbericht behandelte Themenfeld umrissen wird, und widmet sich in vier Themenbeiträgen dem Einfluss des Klimawandels auf Infektionskrankheiten (mit Vektoren und Nagetieren assoziierte

Erkrankungen, wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen, lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen) sowie antimikrobieller Resistenz.

In der zweiten Ausgabe wird in sechs Beiträgen der Einfluss des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch Hitze und andere Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen, durch erhöhte UV-Strahlung, durch allergische Erkrankungen und durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen beschrieben. Auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit werden betrachtet.

Die Erkenntnisse aus diesen ersten zwei Ausgaben fließen in die Beiträge der finalen Ausgabe ein, die gesundheitliche Chancengleichheit im Hinblick auf Auswirkungen des Klimawandels untersuchen, die Bedeutung der zielgruppenspezifischen Klimawandelkommunikation beleuchten und abschließende Handlungsbedarfe auf Basis der in den anderen Beiträgen formulierten Handlungsempfehlungen aussprechen.

Neben verschiedenen themenspezifischen Handlungsempfehlungen haben alle Beiträge eines gemeinsam: Sie weisen auf einen anhaltend hohen Forschungsbedarf hin. Auch erweitertes Monitoring vieler gesundheitlicher Auswirkungen des Klimawandels wird empfohlen. Die Zusammenarbeit der Behörden und Forschungsinstitutionen, die sich diesen wichtigen Aufgaben widmen, ist hier besonders gefragt.

Wir hoffen, dass dieser Bericht ein weiterer wichtiger Schritt zu einer noch besseren Kooperation zwischen Wissenschaft und Entscheidungstragenden in Politik und Gesellschaft sein wird.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Lars Schaade
Robert Koch-Institut
Präsident (kommissarisch)
Nordufer 20
13353 Berlin
E-Mail: Schaadel@rki.de

Zitierweise

Adrian G, Dietrich M, Esser B, Hensel A, Isermeyer F et al. (2023)
Gemeinsam können wir den Auswirkungen des Klimawandels begegnen.
J Health Monit 8(S3):3–6.
DOI 10.25646/11390

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. International Association of National Public Health Institutes (2021) IANPHI roadmap for action on health and climate change: Engaging and supporting national public health institutes as key climate actors.
<https://ianphi.org/news/2021/roadmap-climate-change.html>
(Stand: 30.03.2023)

2. G7 (2022) Communiqué der G7-Gesundheitsministerinnen und -minister, 20. Mai 2022, Berlin.
https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/G/G7/20220520_German_G7_Health_Ministers_Communique.pdf (Stand: 30.03.2023)

3. One Health High-Level Expert Panel (2022) One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. PLoS Pathog 18(6):e1010537

4. World Health Organization (2023) Promoting Health in All Policies and intersectoral action capacities.
<https://www.who.int/activities/promoting-health-in-all-policies-and-intersectoral-action-capacities> (Stand: 30.03.2023)

Impressum

Journal of Health Monitoring

www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11391

Robert Koch-Institut, Berlin

Elke Hertig¹, Iris Hunger², Irena Kaspar-Ott¹,
Andreas Matzarakis³, Hildegard Niemann⁴,
Lea Schulte-Droesch⁵, Maike Voss⁶

¹ Universität Augsburg,
Medizinische Fakultät

² Robert Koch-Institut, Berlin
Zentrum für Internationalen
Gesundheitsschutz

³ Deutscher Wetterdienst, Freiburg
Zentrum für Medizin-Meteorologische
Forschung

⁴ Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Epidemiologie und
Gesundheitsmonitoring

⁵ Bundesamt für Naturschutz, Bonn
Fachgebiet Naturschutz, Gesellschaft
und soziale Fragen

⁶ Centre for Planetary Health Policy, Berlin

Eingereicht: 05.10.2022

Akzeptiert: 23.01.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023

Abstract

Eine globale Erwärmung von 1,5 °C und auch 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich überschritten werden. Der Klimawandel stellt weltweit eine Bedrohung dar und hat direkte und indirekte Auswirkungen auf Infektionskrankheiten, auf nicht-übertragbare Erkrankungen und die psychische Gesundheit. Nicht alle Menschen können sich gleich gut gegen die Folgen des Klimawandels schützen; insbesondere Bevölkerungsgruppen, die vulnerabel sind aufgrund individueller Faktoren (Kinder, Ältere, Vorerkrankte oder Immunsupprimierte), sozialer Faktoren (sozial Benachteiligte) oder den Lebens- und Arbeitsbedingungen (z. B. Personen, die im Freien arbeiten) sind einem erhöhten Risiko ausgesetzt. Konzepte wie One Health oder Planetary Health bieten einen Rahmen, um sowohl den Klimawandel selbst als auch Anpassungsstrategien oder Maßnahmenbündel für die umweltbezogene Gesundheit von Menschen und Tieren einzuordnen. Das Wissen zu den Auswirkungen des Klimawandels ist in den letzten Jahren weitergewachsen und es wurden Strategien zu Klimaschutz (Mitigation) und Anpassung an den Klimawandel (Adaptation) entwickelt.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum [Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023](#) und liefert das Hintergrundwissen zu den Fachartikeln, die in diesem und zwei weiteren Special Issues des Journal of Health Monitoring folgen.

◆ PUBLIC HEALTH · KLIMAWANDEL · ADAPTATION · RESILIENZ · GESUNDHEIT

1. Präambel zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023

Der Klimawandel stellt weltweit eine der größten Bedrohungen für viele Menschen dar und hat direkte und indirekte Auswirkungen auf übertragbare und nicht-übertragbare Erkrankungen. Angesichts der großen gesundheitlichen Herausforderungen fördert das Bundesministerium für

Gesundheit (BMG) das Projekt „Klimawandel und Gesundheit – Sachstandsbericht/Aktualisierung mit Fachgruppe: Inhalt, Kommunikation, Arbeitsweise“ (KlimGesundAkt), das am Robert Koch-Institut (RKI) koordiniert wird und eine Aktualisierung des Sachstandsberichts zu Klimawandel und Gesundheit von 2010 zum Ziel hat [1]. Das Besondere in der Aktualisierung dieses Berichts liegt auf zwei Ebenen:

(1) in der Ausgestaltung mittels einer interdisziplinären und institutionen-übergreifenden Fachgruppe, die den gesamten Entstehungsprozess des aktualisierten Sachstandsberichts mitbegleitet,

(2) in der nachgelagerten zielgruppenorientierten Kommunikation und Kondensierung der erarbeiteten Ergebnisse in Form von intuitiv verständlichen Kommunikationstools, einschließlich der Formulierung von Handlungsempfehlungen.

Die Schritte dieses partizipativen und transparenten Prozesses unter Einbezug von verantwortlichen Behörden, universitären Einrichtungen und der Zivilgesellschaft werden hier skizziert.

Aufgabe der interdisziplinären und -organisationalen Fachgruppe war es, über Berichtsstruktur, Umfang und Themenschwerpunkte zu beraten. Im Ergebnis ist den Ursachen des Klimawandels weniger Raum beigemessen worden als im Bericht von 2010, wohingegen andere Bereiche wie psychische Gesundheit und soziale Ungleichheit erweitert oder neu aufgenommen wurden. Der Abstimmungsprozess erfolgte im engen Austausch mit der projektunabhängigen RKI-internen Arbeitsgruppe „Klimawandel und Gesundheit“. Diese bringt das im RKI über diverse Organisationseinheiten verteilte vorhandene Wissen zu Themenfeldern wie wasserbürtigen Infektionen, hitzebedingter Mortalität, Vektor-assoziierten Erkrankungen, klimabezogenem Gesundheitsverhalten, Mental Health Surveillance und Allergien ein.

Der Sachstandsbericht wird als Sammlung von Artikeln in der Beitragsreihe Klimawandel und Gesundheit des Journal of Health Monitoring in drei Journalausgaben publiziert (Tabelle 1). Durch diese Art der Veröffentlichung wird der

zeitgemäßen wissenschaftlichen Publikationspraxis Rechnung getragen sowie eine größere Reichweite in der Public-Health-Community erzielt. Primäre Adressaten sind die interessierte Fachöffentlichkeit und Entscheidungstragende mit Public-Health-Bezug. Da das Journal of Health Monitoring auf Deutsch und auf Englisch erscheint, und die englische Ausgabe in PubMed Central archiviert und über die PubMed-Suche zugänglich ist, ist zudem eine internationale Sichtbarkeit gewährleistet.

Auf Basis der zu behandelnden Themen wurden Autorinnen und Autoren mit der gewünschten Expertise identifiziert. Dabei waren Doppelrollen (Prozessbegleitung in der Fachgruppe und Autorin oder Autor) durchaus erwünscht. Weitere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wurden von den Autorinnen und Autoren der einzelnen Kapitel hinzugezogen, wo ihr Fachwissen gebraucht wurde. Aus diesem Prozess entstand eine Gruppe von mehr als 90 Autorinnen und Autoren aus über 30 Forschungseinrichtungen und Behörden, die für die Aktualisierung des Sachstandsberichts zu Klimawandel und Gesundheit verantwortlich zeichnet.

Ein weiterer wichtiger Baustein dieses Projekts ist die gezielte Wissenschaftskommunikation, welche nachgelagert die in den Einzelbeiträgen enthaltenen Ergebnisse und Handlungsempfehlungen durch eine große Bandbreite von Tools (Videos, Fact Sheets, Social-Media-Content, digitale Kanäle, direkte Austauschformate) für spezifische Zielgruppen mit Public-Health-Bezug aufbereitet. Diese parallel zum Sachstandsbericht entwickelte, zielgruppengerechte und wissenschaftsbasierte Kommunikation wurde am RKI in enger Abstimmung mit der Fachgruppe und der Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung erarbeitet. Hierbei

Tabelle 1
Übersicht aller Artikel in drei Special Issues der
Beitragsreihe Klimawandel und Gesundheit 2023
im Journal of Health Monitoring

Ausgabe	Thema
Einführung in das Thema Klimawandel und Gesundheit	
1	Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit
Auswirkungen des Klimawandels auf Infektionskrankheiten...	
1	...durch Vektor- und Nagetier-assoziierte Erkrankungen
1	...durch wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen
1	...durch lebensmittelasoziierte Infektionen und Intoxikationen
1	...durch antimikrobielle Resistenz
Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen...	
2	...durch Temperaturveränderungen
2	...durch Extremwetterereignisse
2	...durch UV-Strahlung
2	...durch Allergenexposition
2	...durch Luftschadstoffbelastungen
Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit	
2	Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit
Querschnittsthemen mit Bezug zu Klimawandel und Gesundheit	
3	Soziale Determinanten der gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels
3	Zielgruppenorientierte Kommunikation
3	Handlungsoptionen und Implikationen

sollen einige Kommunikationstools in einem partizipativ-iterativen Prozess unter Einbindung von Zielgruppen, wie Entscheiderinnen und Entscheidern sowie relevanten Stakeholdern auf subnationaler Ebene, erprobt und weiterentwickelt werden. Die Gesundheitskommunikation ist eine maßgebliche Public-Health-Intervention im Bereich Klimawandel und Gesundheit. Die relevanten Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger sowie die Öffentlichkeit müssen steigende Risiken kennen und bewerten, um basierend darauf handeln zu können.

2. Gesundheit, Klima und Klimawandelanpassung in Deutschland

Der hier vorliegende Beitrag bietet einen allgemeinen Überblick zum Thema Klimawandel und Gesundheit als Grundlage des Sachstandsberichts, insbesondere zum klimatischen Hintergrund und klimawandelbedingten Gesundheitsrisiken. Weitere Artikel, die in dieser und zwei weiteren Special Issues des Journal of Health Monitoring folgen (Tabelle 1), fassen die aktuelle Evidenz zu den verschiedenen,

Biodiversität trägt direkt und indirekt zu menschlicher Gesundheit bei.

hier kurz angerissenen Feldern zusammen, in denen sich der Klimawandel in Zusammenspiel mit Tier- und Umwelt auf die menschliche Gesundheit auswirkt.

Die gesundheitliche Situation verbessert sich in Deutschland über einen längeren Zeitraum betrachtet stetig. So ist z. B. die Lebenserwartung der Menschen in Deutschland seit Beginn der 1990er-Jahre bei den Frauen um rund vier Jahre auf 83,4 Jahre und bei den Männern um rund sechs Jahre auf 78,5 Jahre angestiegen [2, 3]. Ungeachtet der steigenden Lebenserwartung werden die Auswirkungen des globalen Klimawandels zunehmend zu einem wichtigen Risikofaktor für die Gesundheit. Gerade in den letzten Jahren zeigte sich, wie schnell die Änderung des Klimas uns erreicht. 2022 war das wärmste Jahr in Deutschland und es trat zum vierten Jahr in Folge eine ausgeprägte Frühjahrstrockenheit auf [4]. Auch Katastrophen wie das Starkregenereignis, das im Juli 2021 zu großflächigen Überschwemmungen vor allem in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen führte, werden durch den Klimawandel häufiger vorkommen. Extremereignisse wie diese können Katastrophen auslösen, die nicht Ergebnis eines einzelnen Ereignisses sind, sondern als Zusammenspiel unterschiedlicher Prozesse, modifiziert durch lokale Gegebenheiten, verstanden werden müssen. Diese Katastrophen können sich unmittelbar, z. B. durch physische Einwirkung, auf die menschliche Gesundheit auswirken. Jedoch können sich durch kaskadierende Effekte auch weitergehende und weitreichende mittelbare gesundheitliche Folgen ergeben, z. B. durch fehlende Erreichbarkeit für Rettungsfahrzeuge oder durch die Entstehung chronischer Leiden oder psychischer Erkrankungen [5]. Am deutlichsten macht sich der Klimawandel in Deutschland durch eine Veränderung der

thermischen Belastung bemerkbar. Zudem kommt es zu Extremwetterereignissen wie Dürren, Niedrigwasser, Starkregen, Sturm, Bränden und Überschwemmungen, die einen starken Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben können. Außerdem gibt es auch indirekte, über die natürlichen Systeme moderierte gesundheitliche Auswirkungen, z. B. eine durch Wärme verlängerte Pollenflugsaison mit einhergehender Allergiebelastung, erhöhte Schadstoffexposition und Infektionen durch verminderte Hygiene nach Überschwemmungen [6]. Auch bislang nicht oder kaum in Deutschland auftretende Infektionskrankheiten werden vermehrt erwartet.

Der Klimawandel beeinflusst die menschliche Gesundheit unter anderem auch durch eine Veränderung von Ökosystemen und verschärft als ein Faktor unter vielen den anhaltenden Biodiversitätsverlust. Gleichzeitig spielen Ökosysteme und ihre Biodiversität eine Rolle in der Fluktuation von Treibhausgasen und sind eine wichtige Stellenschraube der Anpassung an den Klimawandel [7]. Beide Krisen müssen daher im Hinblick auf ihre Folgen für die menschliche Gesundheit zusammen gedacht werden (Infobox 1). Es besteht weiterhin Forschungsbedarf bei der Erforschung der Zusammenhänge von Klimawandel, Biodiversität und Gesundheit.

Bislang bilden die Kernbereiche von Public Health (Essential Public Health Functions, EPHFs) der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) [8] Umweltveränderungen, sowie ihre Rolle bei Klimaschutz und Klimawandelanpassung noch nicht ausreichend ab. Der vorliegende Artikel greift daher auf bestehende Konzepte der Public-Health-Kernbereiche zurück [9] und erweitert diese um Nachhaltigkeitsaspekte und Klimaresilienz.

Der Schutz und die Wiederherstellung von Biodiversität stellen eine wichtige Public-Health-Maßnahme dar.

Infobox 1 Bedeutung der Biodiversität für die menschliche Gesundheit

Biodiversität stellt Ökosystemleistungen bereit, direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen, die auch wesentlich für die menschliche Gesundheit sind. Der dramatische Biodiversitätsverlust stellt somit auch eine Bedrohung der menschlichen Gesundheit dar.

In einer Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen konnten Korrelationen zwischen Biodiversität und menschlicher Gesundheit festgestellt werden. Die Erforschung kausaler Zusammenhänge wird in Deutschland seit August 2022 mit einer Richtlinie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert [10].

Die Vielfalt des pflanzlichen Spektrums versorgt uns mit Medizin und Nahrung, reguliert Wasser und Klima und reduziert Umwelttrisiken wie Luftverschmutzung. Zudem besteht ein Zusammenhang von Biodiversität mit Allergien und Immunerkrankungen. So konnte Kontakt mit einer mikrobenreichen Umgebung in der Kindheit, wie z. B. in der Landwirtschaft, als vor Allergien schützender Faktor identifiziert werden [11, 12].

Auch bei Infektionskrankheiten spielt Biodiversität eine Rolle. So kann das Risiko von Pandemien aufgrund der Zerstörung und Veränderung von Ökosystemen durch den Menschen steigen [13]. Nicht-nachhaltiger Konsum, landwirtschaftliche Intensivierung und Wildtierhandel führen zu verstärktem Kontakt zwischen Menschen und Wildtieren und sind damit Auslöser für eine Vielzahl von zoonotischen Erkrankungen. In dieser Hinsicht kommt dem Biodiversitätsschutz eine wichtige präventive Rolle zu.

Beitrag der Biodiversität zu psychischer Gesundheit und menschlichem Wohlergehen

Ein Aufenthalt in der Natur wirkt sich positiv auf menschliches Wohlbefinden und psychische Gesundheit aus, dies ist schon länger gut erforscht. Städtisches Grün, Gärten, Wälder und Gewässer

bieten Gelegenheit zu Erholung [14], zum Stressabbau [15] und zu sozialen Interaktionen.

Ob dieser Effekt aber auch umso stärker ist, je vielfältiger die den Menschen umgebende Natur ist, konnte bisher nicht eindeutig festgestellt werden, da sozioökonomische Faktoren, kultureller Hintergrund und ästhetische Präferenz der Studienteilnehmenden, aber auch die Definition von Biodiversität und Gesundheit der jeweiligen Studie eine Rolle spielen [16–18].

Auch kulturelle Ökosystemleistungen leisten einen wichtigen Beitrag zur psychischen Gesundheit [19]. Menschen schätzen vielfältige Ökosysteme und manche Arten aufgrund ihrer Schönheit, sie fühlen sich mit ihnen verbunden und identifizieren sich mit einer bestimmten Umgebung.

Synergien zwischen Klimawandelanpassung, Public-Health-Strategien und Naturschutz

Angesichts der komplexen Wechselbeziehungen zwischen Klimawandel, Biodiversitätsverlust und menschlicher Gesundheit (Abbildung 1) ergeben sich wichtige Synergien zwischen Klimawandelanpassung, Public-Health-Maßnahmen und Naturschutz [20]. Naturbasierte Lösungen können in dieser Hinsicht positive Erfolge im Hinblick sowohl auf Gesundheit als auch an Anpassung an den Klimawandel erzielen, sogenannte Co-Benefits [21]. Ein Beispiel ist der Ausbau von städtischem Grün und städtischer blauer Infrastruktur. Hierzu gehören Straßenbäume und Straßenbegleitgrün, Begrünung von Fassaden und grüne Dächer sowie größere Grünflächen (Parks, Spielplätze), welche Erholung, Luftreinhaltung und Mikroklima fördern [22]. Um gleichzeitig dem Biodiversitätsschutz zu dienen, sollte dieses Grün möglichst vielfältig gestaltet sein. Besonders sozioökonomisch benachteiligte Menschen profitieren von naturbasierten Gesundheitsinterventionen in Städten [23]. Angesichts zunehmender Urbanisierung weltweit – es wird vorausgesagt, dass 2050 bereits 68 % der Weltbevölkerung in Städten leben wird [24] – ist die Entwicklung städtischen, vielfältigen Grüns als wichtige Public-Health-Maßnahme daher nicht zu unterschätzen.

Konzepte wie One Health und Planetary Health sowie die Public-Health-Kernbereiche werden in Bezug auf ihren Nutzen für die Public-Health-Praxis betrachtet, um gesundheitliche Chancengerechtigkeit im Klimawandel zu ermöglichen.

Auch wenn der Klimawandel eine globale Dimension hat und letztendlich effektiver Klimaschutz nur global gelingen kann, sind Anpassungsmaßnahmen vorwiegend auf regionaler oder lokaler Ebene zu entwickeln und umzusetzen. Klimaschutz (Mitigation) zur Verhinderung des Fortschreitens klimawandelbedingter Veränderungen ist essenziell, daneben ist jedoch auch Klimawandelanpassung (Adaptation) wichtig, die die Menschen befähigt, trotz der Veränderungen gesund zu bleiben. Der vorliegende Sachstandsbericht fokussiert vor allem die Klimawandelanpassung in Deutschland.

3. Klimatische Änderungen

3.1 Klimaentwicklung

Bei der Analyse der langfristigen Klimaentwicklung in Deutschland wird deutlich: Der Klimawandel ist bereits beobachtbar und spürbar. Er ist eindeutig auf die anthropogene Erhöhung der Treibhausgase in der Atmosphäre zurückzuführen (Infobox 2). Das wichtigste anthropogene Treibhausgas stellt dabei das Kohlenstoffdioxid (CO₂) dar, das im Zeitraum 1750–2019 eine Änderung des globalen Strahlungsantriebs von 2,16 W/m² verursachte (Infobox 3). Zusammen mit weiteren Treibhausgasen, wie Methan, Lachgas und Ozon, ergibt sich insgesamt ein zusätzlicher positiver Strahlungsantrieb von 2,72 W/m², der mit einer globalen Temperaturerhöhung von 1,2 °C seit Anfang des 20. Jahrhunderts einhergeht [25]. Seit Beginn flächende-

Infobox 2 Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist ein natürlicher Prozess, der die Temperatur auf der Erde maßgeblich bestimmt. Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid sind die zwei wichtigsten natürlichen Treibhausgase, die dazu führen, dass die globale Mitteltemperatur bei angenehmen 15 °C liegt und nicht bei -19 °C, wie es ohne das Vorhandensein der Erdatmosphäre der Fall wäre. Durch die Erhöhung der Konzentrationen von atmosphärischen Spurengasen wie Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffoxid entsteht ein zusätzlicher (anthropogener) Treibhauseffekt. Dadurch kommt es zu einer weiteren Erwärmung der unteren Atmosphäre und zu Effekten auf das gesamte Klimasystem.

Infobox 3 Strahlungsantrieb

Der zusätzliche Strahlungsantrieb (radiative forcing) ist die Änderung der Nettoeinstrahlung (Sonneneinstrahlung minus Ausstrahlung, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter, W/m²) am Oberrand der Troposphäre, der untersten Schicht der Erdatmosphäre. Diese Änderung entsteht aufgrund der anthropogenen Klimawandels, vor allem durch die Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre. Der zusätzliche Strahlungsantrieb wird definiert als die Veränderung im Vergleich zum Jahr 1750. Die Zahlen in der Bezeichnung der Representative Concentration Pathways (RCP)-Klimaszenarien, z. B. RCP2.6 oder RCP8.5, beziehen sich auf die erwartete Veränderung im Strahlungsantrieb von 2,6 W/m² bzw. 8,5 W/m².

ckender Messungen im Jahr 1881 ist die Jahresmitteltemperatur in Deutschland um 1,6 °C Grad gestiegen. Das Tempo des Temperaturanstiegs hat in Deutschland (wie auch weltweit) in den vergangenen 50 Jahren deutlich zugenommen: Seit 1881 wurde es hierzulande im Mittel um 0,12 °C

Der globale menschengemachte Klimawandel wird weiter voranschreiten und die Gesundheit der Menschen beeinflussen.

pro Dekade wärmer, für die letzten 50 Jahre lag die Erwärmungsrate mit $0,38^{\circ}\text{C}$ pro Dekade mehr als dreimal so hoch. Seit den 1960er-Jahren war jedes Jahrzehnt deutlich wärmer als das vorherige. Der Anstieg der mittleren Lufttemperaturen dürfte zudem in den kommenden Jahren zu mehr und intensiveren Wetterextremen führen. Die Zunahme von Hitzewellen und Trockenperioden haben dabei eine sehr große Gesundheitsrelevanz [26].

Laut der deutschen Koordinierungsstelle des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wird die globale Lufttemperatur bei allen betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von $1,5^{\circ}\text{C}$ und auch 2°C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich überschritten werden, es sei denn, es erfolgen in den kommenden Jahren drastische Reduktionen der CO_2 - und anderer Treibhausgasemissionen [27]. Viele Veränderungen im Klimasystem werden in unmittelbarem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung verstärkt [25]. Natürliche Antriebsfaktoren und interne Schwankungen werden die vom Menschen verursachten Eingriffe modulieren, vor allem auf regionaler Ebene und in naher Zukunft. Es ist wichtig, diese Modulationen bei der Planung für die gesamte Bandbreite möglicher Auswirkungen zu berücksichtigen. Bei weiterer globaler Erwärmung wird es laut Projektionen in fast allen Regionen in zunehmendem Maße zu gleichzeitigen und vielfältigen Modifikationen von klimatischen Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (climatic impact-drivers, CIDs) kommen. Dabei sind die regionalen Klimafolgen überwiegend negativer Art, wobei es auch Regionen gibt, die vom Klimawandel profitieren könn-

ten. Änderungen von mehreren CIDs wären bei 2°C im Vergleich zu $1,5^{\circ}\text{C}$ globaler Erwärmung weiter verbreitet und bei höheren Erwärmungsniveaus sogar noch verbreiteter und/oder ausgeprägter. Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit – wie der Zusammenbruch von Eisschilde, abrupte Veränderungen der Ozeanzirkulation, einige zusammengesetzte Extremereignisse und eine Erwärmung, die wesentlich über die als sehr wahrscheinlich bewertete Bandbreite der künftigen Erwärmung hinausgeht – können nicht ausgeschlossen werden und sind Teil der Risikobewertung [25].

Aus naturwissenschaftlicher Sicht erfordert die Begrenzung der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung auf ein bestimmtes Niveau eine Begrenzung der kumulativen CO_2 -Emissionen, wobei zumindest netto null CO_2 -Emissionen erreicht werden müssen, zusammen mit starken Verringerungen anderer Treibhausgasemissionen. Starke, rasche und anhaltende Verringerungen der Treibhausgasemissionen würden auch den Erwärmungseffekt begrenzen, der sich aus der abnehmenden Luftverschmutzung ergibt, da Aerosole (vor allem Feinstaub) einen überwiegend negativen Strahlungsantrieb aufweisen und deren projizierter Rückgang bis Mitte des Jahrhunderts einen zusätzlichen Erwärmungseffekt haben wird [28].

3.2 Klimamodelle und Klimaprojektionen

Über die zukünftige Entwicklung des Klimas geben Klimamodelle Auskunft. Die berechneten Zukunftsprojektionen hängen dabei auch von der angenommenen Entwicklung der menschlichen Gesellschaft ab. Um diese potenziellen globalen Entwicklungen darstellen zu können, wurden über

Die direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit hängen stark von der Region, sozialen Faktoren und dem Verhalten der Menschen ab.

die letzten Jahrzehnte Szenarien entwickelt, aus denen sich unterschiedliche Entwicklungspfade von Emissions- und Konzentrationsszenarien von Treibhausgasen und Aerosolen ableiten lassen. Die älteste Szenarienfamilie (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) spiegelt den Wissensstand um die Jahrtausendwende wider, die darauffolgende Generation von Szenarien (Representative Concentration Pathways, RCP) wurde für den fünften Sachstandsbericht des IPCC entwickelt, und berücksichtigt nun auch weitere Faktoren, wie die Abschwächung des Klimawandels und die Anpassung daran [29]. Die neueste Generation nennt sich Shared Socioeconomic Pathways (SSP) und fokussiert die Veränderung von sozioökonomischen Faktoren, wie Bevölkerung, Wirtschaftswachstum, Bildung, Urbanisierung und das Tempo der technologischen Entwicklung [30]. Die SSP zeigen dabei fünf verschiedene Möglichkeiten auf, wie sich die Welt ohne Klimapolitik entwickeln könnte und wie unterschiedliche Niveaus der Klimaschutzmaßnahmen erreicht werden könnten. Dabei werden die Klimaschutzziele der RCP mit den SSP kombiniert. Die RCP legen Pfade für die Treibhausgaskonzentrationen und damit das Ausmaß der Erwärmung fest, die bis zum Ende des Jahrhunderts eintreten könnte. Die SSP hingegen geben den Rahmen vor, in dem Emissionssenkungen erreicht (oder eben nicht erreicht) werden [31].

Die fünf sozioökonomischen Entwicklungspfade der SSP-Szenarien (SSP₁ bis SSP₅), werden mit einem zusätzlichen Strahlungsantrieb (1,9 bis 8,5 W/m²) in Zusammenhang gebracht. Szenarien mit niedrigen oder sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP_{1-1.9} und SSP_{2.6}) führen im Vergleich zu Szenarien mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP_{3-7.0} oder SSP_{5-8.5}) inner-

halb von Jahren zu erkennbaren positiven Auswirkungen auf die Treibhausgaskonzentrationen sowie die Luftqualität. Bei einem Vergleich dieser gegensätzlichen Szenarien beginnen sich erkennbare Unterschiede zwischen den Trends der globalen Lufttemperatur innerhalb von etwa 20 Jahren von der natürlichen Variabilität abzuheben.

4. Folgen des Klimawandels für die Gesundheit

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland listet acht Klimarisiken im Handlungsfeld menschliche Gesundheit auf, welche auch im Einklang mit der Struktur des Sachstandsberichts und folgenden Ausführungen stehen [32]: Hitzebelastung, UV-bedingte Gesundheitsschädigung, allergische Reaktionen, potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen, Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren, Atembeschwerden aufgrund von Luftverunreinigung, Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen sowie Auswirkungen auf das Gesundheitssystem.

Diese Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt und den Menschen sind sehr stark von der geografischen Region, der Nutzung der Umwelt durch den Menschen und von den sozialen Determinanten abhängig [33]. Von Krankheiten, die von Wetter, Witterung und Klima auf unterschiedlicher zeitlicher Skala beeinflusst werden, kann jeder Mensch betroffen sein; dennoch gibt es Bevölkerungsgruppen, die wesentlich vulnerabler gegenüber den gesundheitlichen Folgen (z. B. Hitzewellen) des Klimawandels sind und zum Teil intensiver darauf reagieren. Dies sind insbesondere aufgrund ihres Alters sensible oder durch Vor- oder Immunerkrankungen geschwächte Personen. Darüber hinaus

gibt es Personengruppen, die durch berufliche oder private Aktivitäten gesundheitsgefährdenden Situationen länger und häufiger ausgesetzt sind als andere [33]. Auch die intersektionalen Wechselwirkungen zwischen Alter, Geschlecht, Arbeits- und Wohnverhältnissen und -umgebung, sowie Einkommen bzw. Armut und Bildungsstand spielen hier eine Rolle [34]. In einem folgenden Artikel des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit wird auf diese Thematik näher eingegangen (Bolte et al. [35])

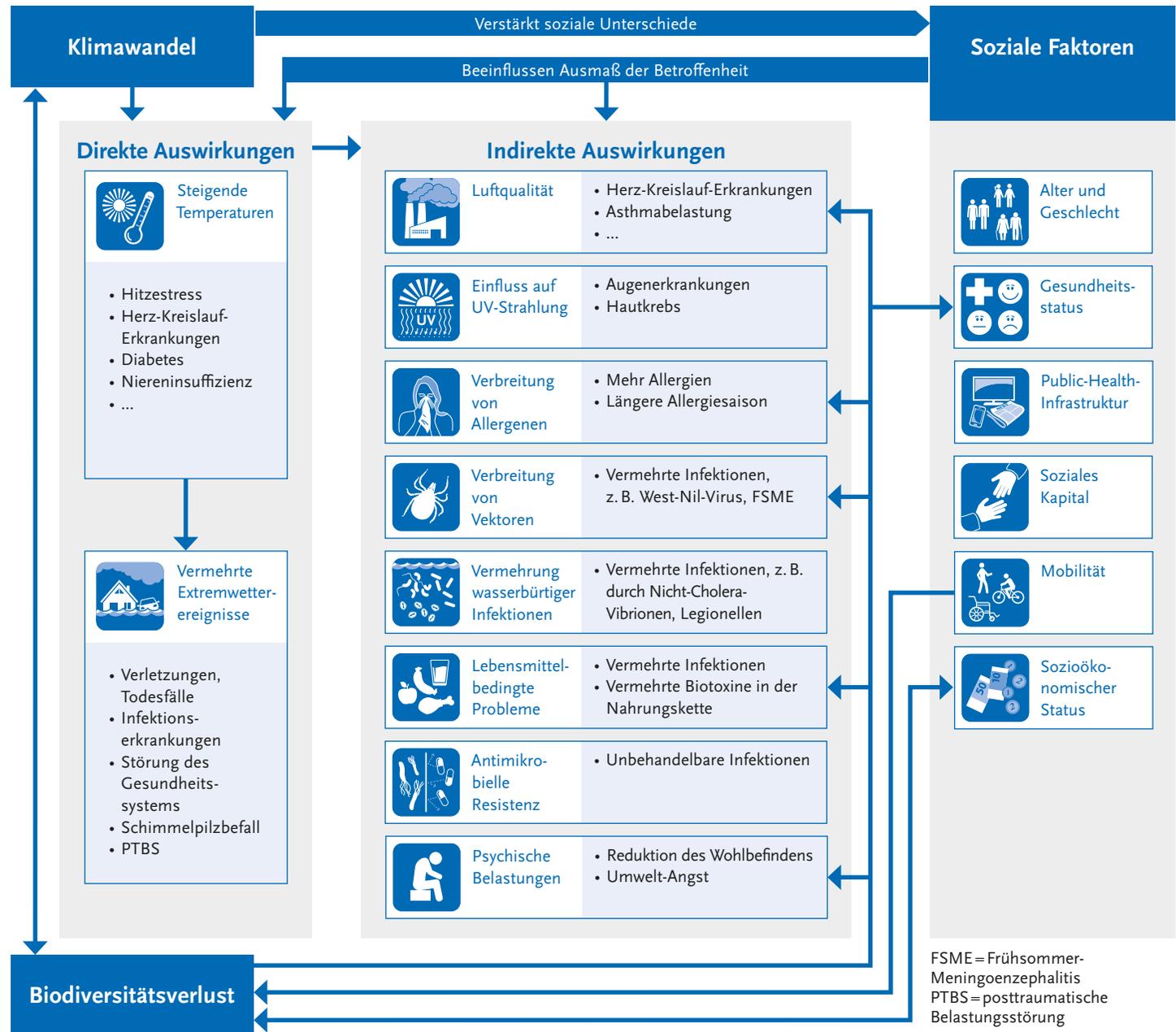
Die unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen haben demnach auch sehr verschiedene Bedürfnisse und Anforderungen an das Gesundheitssystem. Das zeigt, dass die beschriebenen Klimawirkungen nicht nur individuelle Betroffenheiten verursachen, sondern auch bedeutende Auswirkungen auf das Gesundheitssystem und seine Akteurinnen und Akteure und damit organisatorische und volkswirtschaftliche Komponenten haben. Insbesondere der Bereich Gesundheit weist viele Querverbindungen zu anderen Handlungsfeldern auf [36].

Dabei ist zu beachten, dass Gesundheit nicht nur eine individuelle, sondern vor allem auch eine gesellschaftliche Aufgabe darstellt. Um Menschen zu ermöglichen, sich im Sinne einer Anpassung an den Klimawandel und seine Auswirkungen gesundheitsförderlich zu verhalten, können verschiedene Maßnahmen der Prävention und Gesundheitsförderung eingesetzt werden. Dazu zählen Interventionen wie Aufklärungskampagnen, z. B. die [Webseite Klima-Mensch-Gesundheit](#) der Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung. Diese Maßnahmen sollten aber stets mit einer Veränderung der Lebensbedingungen der Menschen kombiniert werden, denn Gesundheitsverhalten kann nur schwer gegen Widerstände aus dem sozialen Umfeld und

den Lebensumständen durchgesetzt werden. Diese sogenannten verhältnispräventiven Maßnahmen umfassen zum Beispiel den Ausbau von Infrastruktur und Angeboten (z. B. Fahrradwege, klimafreundliches Kantinenessen, verschattete öffentliche Bereiche, Zugang zu Stadtgrün) oder die Preispolitik (z. B. Förderung klimaneutralen Bauens). Diese komplexen Interventionen machen die Einbindung vieler gesellschaftlicher Gruppen und Sektoren jenseits des Gesundheitsbereichs notwendig, indem beispielsweise mit Akteurinnen und Akteuren aus dem Verkehrs-, Bau- oder Umweltsektor kooperiert wird. Ein solcher Ansatz setzt voraus, dass Gesundheit in allen Politikbereichen berücksichtigt wird (Health in All Policies), damit die gesundheitsförderliche Lebensweise für die Menschen auch tatsächlich im Alltag die einfachste wird, wie es die WHO fordert („Make the healthy way the easy way“) [37].

Viele Folgen der globalen Erwärmung stehen in Wechselwirkung zueinander und können sich gegenseitig durch Rückkopplungseffekte verstärken. Neben den direkten Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit, in Westeuropa vornehmlich durch vermehrtes Auftreten extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, lassen sich auch indirekte Auswirkungen feststellen, die über Änderungen in natürlichen Systemen (Atmosphäre, Bio-, Hydro-, Kryo- und Pedosphäre) herbeigeführt werden ([Abbildung 1](#)). Wetterlagen bestimmen dabei in hohem Maß die lokalen meteorologischen sowie luft- und strahlungshygienischen Verhältnisse. So kommt es im Rahmen von lang andauernden sommerlichen Hochdruckwetterlagen nicht nur zu thermischem Stress aufgrund hoher Lufttemperaturen, sondern auch zu einer erhöhten Ozon- und UV-Strahlungsexposition. Der Klimawandel bedingt auch Veränderungen im Bereich

Abbildung 1
Direkte und indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit
 Illustration: Robert Koch-Institut



FSME = Frühsommer-Meningoenzephalitis
 PTBS = posttraumatische Belastungsstörung

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf die physische und psychische Gesundheit der Menschen. Nicht alle Menschen können sich gleich gut gegen Klimawandelfolgen schützen.

von Infektionskrankheiten, deren Erreger über blutsaugende Arthropoden (Gliederfüßer) übertragen werden, von Infektionen, die wasser- oder nahrungsmittelbezogen sind und Änderungen im Bereich allergieauslösender Pflanzen und Tiere. Darüber hinaus ergeben sich unter den Bedingungen des fortschreitenden Klimawandels weitere gesundheitsrelevante Veränderungen. Zu denken ist hier etwa an die Zunahme von Trockenepisoden, die sich z. B. über eine unzureichende Wasserversorgung, Ernteausfälle oder die Zunahme von Waldbränden indirekt auf die Gesundheit auswirken, oder von Flutereignissen, die zur Ausbreitung bestimmter Krankheitserreger führen können. Beides stellt schon heute eine große Herausforderung dar [38–40].

Die verschiedenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit werden hier kurz angerissen und in den folgenden Artikeln dieses und des nächsten Special Issues der Beitragsreihe „Klimawandel und Gesundheit“ detailliert aufgegriffen, mit Bezug sowohl auf übertragbare Krankheiten als auch auf nicht-übertragbare Krankheiten, inklusive Beeinträchtigungen der psychischen Gesundheit.

4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf übertragbare Krankheiten

Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten

Laut einer Studie von McIntyre et al. [41] sind nahezu zwei Drittel der in Europa aufzufindenden Erreger von Human- und Haustierkrankheiten klimasensibel. Die klimatischen Bedingungen begünstigen u. a. den Ausbruch von mit Vektoren assoziierten Krankheiten wie Chikungunya, Dengue und West-Nil-Fieber in Europa und tragen zur weiteren geografischen Ausbreitung von Vektoren bei, die die Erreger

der Lyme-Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis übertragen.

Die Übertragung von Vektor-assoziierten Krankheitserregern erfordert eine eingeführte oder etablierte Vektorpopulation, einen Erreger und geeignete Umwelt- und Klimabedingungen über den gesamten Zyklus der Erregerübertragung. Die Umwelt- und Klimabedingungen wirken sich auf jeden dieser Bereiche aus, vom Überleben und der Häufigkeit der Vektoren über das Wachstum und Überleben der Erreger in den Vektororganismen bis hin zur Vektoraktivität und den Stechfrequenzen sowie der Exposition des Menschen gegenüber Krankheitsvektoren.

Auch wenn zum Beispiel die Einschleppung von *Aedes albopictus* (Asiatische Tigermücke) in erster Linie durch die Globalisierung begünstigt wird, insbesondere entlang der Verkehrswege [42], so ist doch der Klimawandel mit der aktiven potenziellen Ausbreitung von Vektoren und Erregern assoziiert, weshalb auch in Deutschland in den kommenden Jahren mit einer weiteren Verlagerung bestimmter Zeckenarten in höhere Breiten- und Höhenlagen und einer weiteren geografischen Ausbreitung von Stechmücken- und Sandmückenarten gerechnet werden muss [43]. Ein folgender Beitrag in diesem Sachstandsbericht widmet sich detailliert Vektor- und Nagetier-assoziierten Erkrankungen im Klimawandel (Beermann et al. [44]).

Wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen

Durch Wasser übertragene Erreger können ebenfalls dem Einfluss des Klimawandels unterliegen. Der Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen, die durch Messungen in der Nordsee und Ostsee belegt sind (in der Nordsee betrug die Temperaturzunahme etwa 1,3 °C in den letzten 50 Jah-

ren) [45] und in Zukunft weiter zunehmen werden, beschleunigt z. B. auch die Vermehrung von Vibrionen [46, 47]. Vibrioneninfektionen äußern sich vor allem durch Wundinfektionen und Durchfallerkrankungen. Die Klimaerwärmung mit den einhergehenden erhöhten Wassertemperaturen könnte zu einer erhöhten Vibrionenkonzentration führen und dadurch eine Zunahme von Infektionen wahrscheinlicher machen [47–49]. Projektionen ergeben, dass sich die Meeresoberflächentemperatur der Nordsee bis Ende des 21. Jahrhunderts um 1–3 °C erwärmen wird, die der Ostsee um 3–4 °C, mit stärksten Erwärmungsraten im nördlichen Teil der Ostsee [50]. Auch extreme Niederschlagsereignisse können zu Ausbrüchen von wasserbürtigen Krankheiten führen [49]. Näher beschäftigt sich mit diesem Thema ein weiterer Beitrag des Sachstandsberichts (Dupke et al. [51]).

Lebensmittelbedingte Infektionen und Intoxikationen

Auch lebensmittelbedingte Infektionen und Intoxikationen spielen eine Rolle im Zusammenhang mit dem Klimawandel, denn die Häufigkeit der damit assoziierten Krankheiten kann durch Temperaturänderungen beeinflusst werden. Beispiele sind bakterielle Magen-Darm-Infektionen durch die zumeist durch Lebensmittel aufgenommenen Erreger *Campylobacter* und *Salmonella*. Die Übertragung auf den Menschen erfolgt meist über Lebensmittel. Krankheitsfälle durch Salmonellen steigen linear mit der Lufttemperatur um 5–10 % pro °C [52]. Längere Sommer ermöglichen so die Zunahme von durch Lebensmittel übertragenen Krankheitserregern [49]. Detailliertere Erkenntnisse sind in einem weiteren Beitrag in diesem Sachstandsbericht zu finden (Dietrich et al. [53]).

Antimikrobielle Resistenz (AMR)

Eine bisher wenig beachtete Verbindung zwischen Gesundheit und Klimawandel sind antibiotikaresistente Infektionen [54]. Bakterien, die Infektionen beim Menschen verursachen, können eine Resistenz gegen Antibiotika entwickeln. Die Resistenz gegen antimikrobielle Wirkstoffe (bei Bakterien und anderen Mikroben) verursacht weltweit eine erhebliche Morbidität und Mortalität und stellt damit Gesundheitssysteme sowie grundlegende Funktionen des öffentlichen Gesundheitswesens weltweit vor enorme Herausforderungen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Antibiotikaresistenz bei Bakterien hauptsächlich unter dem Selektionsdruck des Antibiotikaeinsatzes entwickelt, allerdings können auch andere Faktoren, wie der Klimawandel, zum Anstieg der Antibiotikaresistenz beitragen. MacFadden et al. [55] berichten, dass ein Temperaturanstieg von 10 °C im experimentellen Laborumfeld mit einem Anstieg der Antibiotikaresistenz bei den häufigen Krankheitserregern *Escherichia coli* (+4,2%), *Klebsiella pneumoniae* (+2,2%) und *Staphylococcus aureus* (+2,7%) verbunden ist. In einem weiteren Beitrag dieses Sachstandsberichts liefern Meinen et al. [56] einen systematischen Review zu AMR im Klimawandel.

4.2 Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Krankheiten und die psychische Gesundheit

Gesundheitliche Auswirkungen durch Luftschadstoffe

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Luftqualität in Deutschland dank gezielter Maßnahmen zur Luftreinhaltung erheblich verbessert [57]. Bei gleichbleibenden Emissionen würde als Folge des Klimawandels allerdings

eine Zunahme der bodennahen Ozon- und Feinstaubkonzentrationen erfolgen. Wärmere Sommer und vor allem eine Zunahme von extremen Temperaturereignissen begünstigen die Bildung von bodennahem Ozon, da bei stagnierender Luftzirkulation während ausgeprägter Hochdruckwetterlagen eine Ansammlung des Ozons stattfinden kann und Spitzenwerte über mehrere Tage zulässt [58, 59]. Eine erhöhte Feinstaubbelastung, z. B. durch zunehmend trockene Böden und vermehrte Vegetationsbrände, kann neben einer Beeinträchtigung der Lungenfunktion und ernsthaften Lungenerkrankungen wie Asthma und Lungenkrebs auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorrufen. Ebenfalls besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen kardiovaskulärer Mortalität und dem Gehalt an bodennahem Ozon, wobei schon eine kurzfristige Ozonexposition das Gesundheitsrisiko erhöht und bereits mittelhohe Ozonwerte mit steigenden Raten von Herzinfarkten einhergehen [60, 61]. Weitere Effekte auf die Gesundheit entstehen durch gesteigerten Hitzestress, vor allem auch in Kombination mit erhöhten Luftschadstoffen [62, 63]. In einem nachfolgenden Beitrag dieses Sachstandsberichts liefern Breitner-Busch et al. [64] eine Übersicht zu klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Gesundheit durch Luftschadstoffe, die für Deutschland besonders relevant sind, und erläutern Effekte der Luftschadstoffe in Interaktion mit der Lufttemperatur. Darüber hinaus wird ein Überblick zu Grenz-, Ziel- und Richtwerten im aktuellen Kontext der Luftsituation in Deutschland gegeben, sowie auf die aktuellen WHO-Richtwerte eingegangen. Entsprechende Empfehlungen für den Public-Health-Sektor werden aufgezeigt.

Gesundheitliche Auswirkungen durch Hitze

Hitze stellt ein Ereignis dar, welches meistens großflächig auftritt und nicht nur einzelne Bevölkerungsgruppen, insbesondere Jüngere und Ältere, betrifft, sondern sektorübergreifend ist [65]. Hitze wird zunehmen in Bezug auf Intensität, Dauer und Häufigkeit (Abbildung 2). Die Charakteristiken von Hitzewellen, ihre Anzahl, Dauer und Intensität sowie ihr zeitliches Auftreten innerhalb eines Jahres sind für die Abschätzung der gesundheitlichen Belastung während und nach hoher thermischer Belastung relevant. Vor allem die Dauer einer Hitzewelle kann die Mortalität verstärken und die überproportionale Zunahme langer Hitzewellen kann daher zu einer stark ansteigenden Zahl von Todesfällen führen [66]. So ergibt sich bei RCP-Szenarien für Deutschland ein Anstieg der Mortalität durch chronische Erkrankungen der unteren Atemwege (chronic lower respiratory diseases, CLRD) während langer Hitzewellen (≥ 10 Tage) von bis zu 150% bis zur Mitte des Jahrhunderts. Je nach Szenario könnte es bis zum Ende des Jahrhunderts einen Anstieg von 260% (RCP4.5) bis maximal 540% (RCP8.5) geben. Die Mortalität durch Ischämische Herzerkrankungen (IHK), bei denen es zu einer zunehmenden Verengung der Herzkranzgefäße kommt, könnte entsprechend nach RCP4.5 und RCP8.5 2021–2050 um 90% (RCP4.5) oder 150% (RCP8.5) höher liegen, 2068–2097 sogar um 330% (RCP4.5) bis maximal 900% (RCP8.5) [67]. Dies zeigt auf, dass selbst unter einem moderaten Klimawandel erhebliche gesundheitliche Auswirkungen durch Hitze zu erwarten sind. Winklmayr et al. [68] widmen sich in einem folgenden Beitrag des Sachstandsberichts den gesundheitlichen Auswirkungen hoher Temperaturen, die insbesondere ältere Personen und Menschen mit bestimmten Vorerkrankungen betreffen.

Abbildung 2a

Anzahl Hitzetage pro Jahr.

Regionale Verteilung der Anzahl heißer Tage mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30°C, 2011–2020

Quelle: Deutscher Wetterdienst

2a: Anzahl Hitzetage pro Jahr

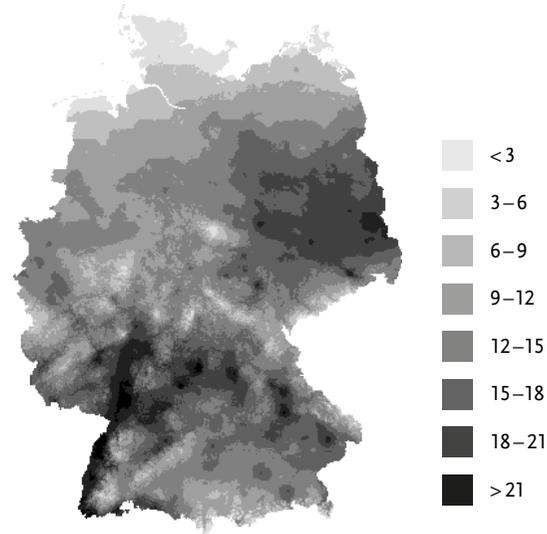


Abbildung 2b

Anzahl Hitzewellen pro Jahr

Abbildung 2c

Anzahl Tage pro Hitzewelle

Abbildung 2d

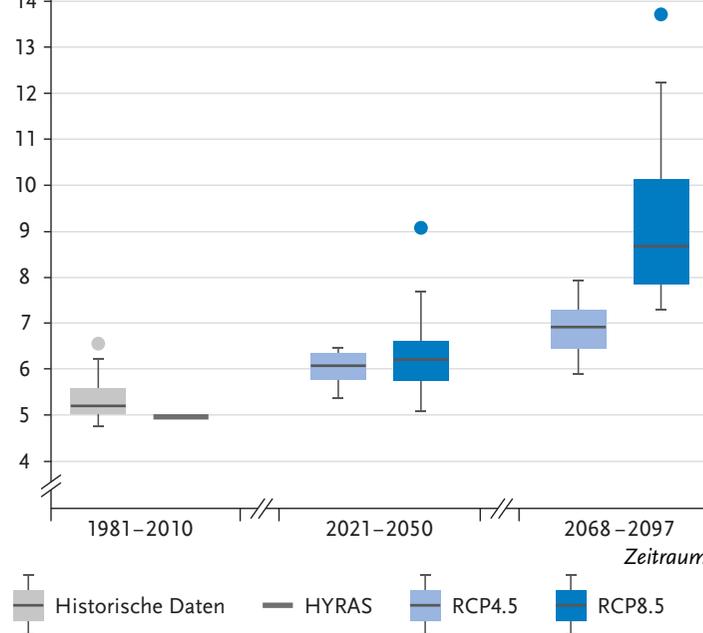
Mittlere Lufttemperatur während Hitzewellen

2b–2d

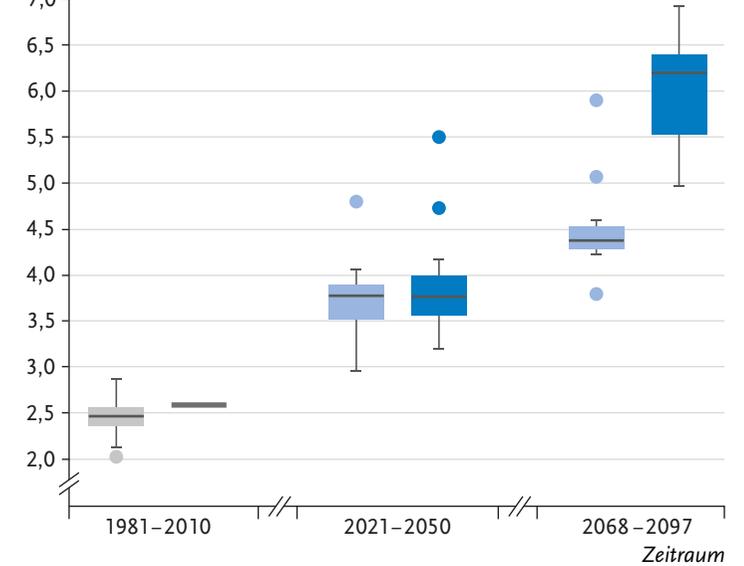
in Deutschland, basierend auf historischen (gemessenen) Datensätzen, HYRAS (Rasterdatensätze) [69] und Projektionen unter den Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5

Quelle: Eigene Darstellung nach Schlegel et al. [67]

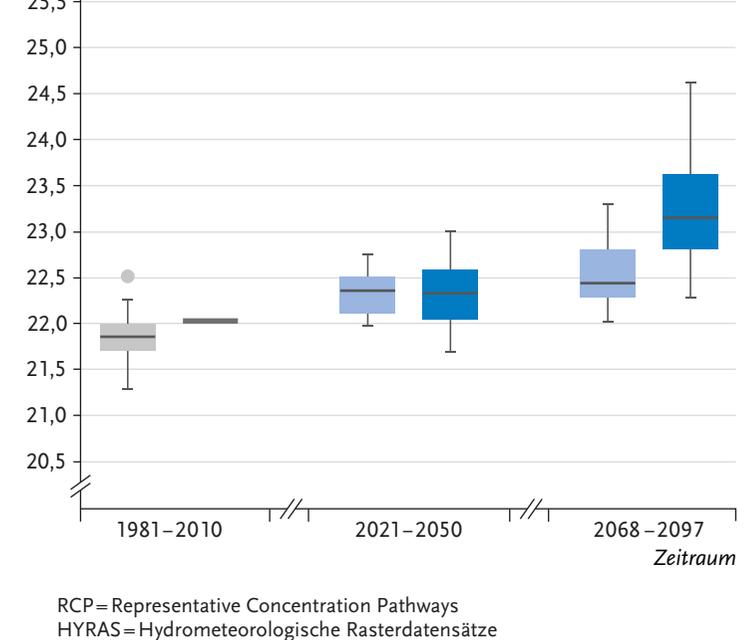
2c: Anzahl Tage pro Hitzewelle



2b: Anzahl Hitzewellen pro Jahr



2d: Mittlere Lufttemperatur während Hitzewellen (°C)



RCP= Representative Concentration Pathways
HYRAS=Hydrometeorologische Rasterdatensätze

Gesundheitliche Auswirkungen durch Extremwetterereignisse

Durch die Zunahme von intensiven Regenfällen können verheerende Überflutungen auftreten, die das Leben und die Gesundheit der Bevölkerung sowie die Gesundheitsinfrastruktur ganz unmittelbar betreffen. Beobachtbar ist, dass in Deutschland und Westeuropa bereits jetzt die Intensität der Regenfälle durch den Klimawandel um bis zu 19 % zugenommen hat und Überschwemmungsereignisse, wie 2021 in Westdeutschland und Belgien, um bis zu neunmal wahrscheinlicher geworden sind. Nähert sich die globale Erwärmung der 2 °C-Schwelle, wird sich das auch direkt in den Niederschlagsintensitäten (Zunahme um bis zu 6 %) und Überschwemmungswahrscheinlichkeiten widerspiegeln [70].

Vor allem in den Sommermonaten muss aber auch vermehrt mit Trockenheit und Dürre gerechnet werden. Modellierungen haben ergeben, dass bei einer Erwärmung um 3 °C bis zum Ende des Jahrhunderts hierzulande mit doppelt so vielen Dürretagen wie bislang zu rechnen ist [71]. Historische Daten zeigen, dass bereits jetzt verschiedene Regionen Deutschlands unter zunehmender Dürre leiden [72]. Dies kann neben belastenden Situationen in der Landwirtschaft, Niedrigwassern und sinkenden Grundwasserspiegeln auch Auswirkungen auf die Luftqualität haben. Trockene Böden tragen durch Verwehungen zu einer Verschlechterung der Luftqualität durch Staub und Feinstaub bei. Anhaltende Trockenheit begünstigt zudem die Verweildauer von Pollen in der Luft und häufigere Waldbrände tragen lokal zur erhöhten Feinstaubexposition bei. Trockenstress bei Pflanzen verringert außerdem die Aufnahme von Ozon und erhöht dadurch die gesundheitsschädliche bodennahe Ozonkonzentration und damit auch das häufigere Auftreten

von Atemwegserkrankungen [73]. In einem weiteren Beitrag dieses Sachstandsberichts bieten Butsch et al. [74] einen Überblick zu gesundheitlichen Auswirkungen durch im Klimawandel vermehrt auftretende Extremwetterereignisse. Solchen mittelbaren bzw. langfristigen meteorologischen Folgewirkungen kann laut des Beitrags durch Risikomanagement und Katastrophenhilfe begegnet werden, um die gesundheitlichen Folgen von Extremereignissen vor allem für vulnerable Gruppen möglichst abzumildern.

Gesundheitliche Auswirkungen durch erhöhte Allergenexposition

Der Klimawandel hat Einfluss auf die Allergenexposition. So unterstützen eine vermehrte Pollenproduktion und eine früher einsetzende Pollensaison das Auftreten und erhöhen die Häufigkeit von Pollen-assoziierten allergischen Atemwegserkrankungen [75]. Darüber hinaus können höhere Temperaturen und ein Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Luft zu einer Zunahme der Allergenität von Pollen führen und somit stärkere Allergie-Reaktionen hervorrufen [76]. Klimawandelbedingte Veränderungen der Vegetationszonen erlauben es außerdem gebietsfremden Arten, sich in Gebieten anzusiedeln und auszubreiten, in denen sie bisher nicht heimisch waren. Für Europa ist hier etwa die Ambrosiapflanze mit ihrem hohen allergenen Potenzial zu nennen [6, 75, 77]. Bergmann et al. [78] widmen sich in einem weiteren Beitrag dieses Sachstandsberichts detailliert dem Thema klimawandelbedingte Veränderungen der Allergenexposition und deren gesundheitlichen Folgen, zeigen den Zusammenhang zu anderen Expositionen wie Lufttemperatur und Luftschadstoffen auf und geben Handlungsempfehlungen.

Gesundheitliche Auswirkungen durch veränderte UV-Strahlungsbelastung

Der Klimawandel hat Einfluss auf die erdbodennahe UV-Bestrahlungsstärke und die UV-Strahlungsjahresdosis. Für Deutschland spielen hier die Auswirkungen der Treibhausgase auf stratosphärisches Ozon und vor allem die Bewölkung eine entscheidende Rolle. Projektionen für das Ozon in der Stratosphäre und die Bewölkungsdichte sind mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. In den letzten Jahren ist allerdings eine deutliche Erhöhung der Sonnenscheindauer in Deutschland und damit auch eine Erhöhung der über ein Jahr aufsummierten Tagessummen der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke (UV-Strahlungsjahresdosis) verzeichnet worden [79, 80]. Das Auftreten UV-strahlungsbedingter Erkrankungen von Haut und Augen, einschließlich Krebserkrankungen, hängt nicht nur von der herrschenden erdbodennahen UV-Bestrahlungsstärke in der Umgebung (ambient UV radiation) der Menschen und der UV-Strahlungsjahresdosis ab, sondern wird auch entscheidend vom Expositionsverhalten der Menschen bestimmt. Der derzeitige Kenntnisstand zu Auswirkungen des Klimawandels auf die UV-Strahlungsbelastung und gesundheitliche Konsequenzen werden in einem Beitrag dieses Sachstandsberichts von Baldermann et al. [81] beschrieben.

Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit

Neben einer zunehmenden allgemeinen Besorgnis vieler Menschen über die Zukunft der Erde kann der Klimawandel weitere Folgen für die psychische Gesundheit haben. Die Auswirkungen von klimawandelbedingten Wetterereig-

nissen und Naturkatastrophen auf die psychische Gesundheit sind bereits seit einiger Zeit bekannt. Sie verursachen Probleme wie Schlafstörungen, Stress, Angst, Depressionen und die Entwicklung von posttraumatischen Belastungsstörungen und Suizidgedanken [82]. Weniger erforscht sind jedoch die psychischen und emotionalen Folgen, die durch das Bewusstsein für die langsamen und allmählichen Veränderungen der Umwelt durch den vom Menschen verursachten Klimawandel erzeugt werden und welche Maßnahmen wirkungsvoll vor allem vulnerable Gruppen schützen können. Studien zeigen, dass Menschen aufgrund der Bedrohung durch den Klimawandel Gefühle von Verlust, Hilflosigkeit und Frustration empfinden – ein Zustand, der heute als Eco Anxiety (auf Deutsch in etwa „Umwelt-Angst“) bezeichnet wird [83]. In einem weiteren Beitrag dieses Sachstandsberichts widmen sich Gebhardt et al. [84] diesem Thema und untersuchen in dem Kontext die Themenfelder Extremwetterereignisse, Temperaturerhöhung, Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels, psychologisch-soziologische Aspekte sowie Handlungsfähigkeit und Resilienzfaktoren.

5. Konzeptionelle Rahmen zur Bewältigung der Klimakrise

Die Konzepte One Health und Planetary Health, haben seit Beginn der 2000er-Jahre zunehmende Rezeption erfahren; sie können der Bewältigung der Klimakrise einen Rahmen geben. Inhärent ist ihr systemisch-ganzheitlicher Ansatz, der einen umfassenderen Blick auf mögliche Lösungen von Problemen im Bereich Umweltveränderungen und Gesundheit erlaubt.

Beide Konzepte unterliegen der ständigen Weiterentwicklung und stellen somit auch keine starren Monolithen dar. Beide Ansätze können dadurch einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung vieler Ziele der „2030 Agenda für Nachhaltige Entwicklung“ der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals) sein und somit diese Agenda erheblich stärken und letztendlich die umweltbezogene Gesundheit verbessern [85]. Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen verschieden ineinandergreifende Systeme, wie das Verhältnis von Wirtschaft, Energie, Umwelt und Gesundheit, und sind von daher auch nur systemübergreifend zu begreifen und zu lösen [27]. Um den Schutz der menschlichen Gesundheit zu verbessern, müssen daher die Zusammenhänge zwischen menschlicher und tierischer Gesundheit sowie gesunden Ökosystemen auch auf der Ebene verschiedenster Politikbereiche stärker berücksichtigt werden.

5.1 One Health

Das Konzept zu One Health wurde 1964 von Schwabe [86] aufgegriffen, dabei formte er den Begriff „One Medicine“ für die Bereiche, die die humane und veterinäre Gesundheit umfassen. Inzwischen wurde der Begriff One Health um den Aspekt der Umwelt erweitert: Der Mensch ist dabei ein Teil des Tierreichs, das wiederum in eine gemeinsame Umwelt eingebettet ist [87]. Im Rahmen der „Berlin Principles“ fanden neue Prinzipien Eingang in das One-Health-Konzept [88]. Es wird die Stärkung der Institutionen hervorgehoben, die nötig ist, um die Umsetzung wissenschaftsbasierter Kenntnisse in Politik und Praxis zu gewährleisten, und erstmals gehören auch Maßnahmen zur Bekämpfung der Klimakrise dazu.

Das unter anderem von der WHO einberufene One Health High-Level Expert Panel (OHHLEP) möchte die Umsetzung des One-Health-Ansatzes von der Theorie zur Praxis einleiten. Hier wurden vier Bereiche als essenziell erachtet: Kommunikation, Koordination, Zusammenarbeit und Kapazitätsaufbau [89]. Dabei soll die Ausgewogenheit zwischen Sektoren und Disziplinen beachtet werden, sozialpolitische und multikulturelle Parität, ein sozialökologisches Gleichgewicht, die Verantwortung des Menschen sowie Transdisziplinarität und multisektorale Zusammenarbeit aller relevanten Disziplinen.

Durch das One-Health-Konzept kann eine ganzheitliche Betrachtung aller betroffenen Bereiche synergetische Lösungsansätze entlang jeweils verantwortlicher Verwaltungs- und Exekutivebenen verstärken, mit denen die Auswirkungen des Klimawandels vermindert oder Anpassungsstrategien umgesetzt werden. So könnten beispielsweise die Kosten durch die Entstehung neuer Zoonosen wesentlich geringer ausfallen, wenn sie frühzeitig bereits als potenzielle Zoonosen bei Tieren erkannt werden und nicht erst später beim Menschen auftreten [90].

5.2 Planetary Health

Planetary Health oder planetare Gesundheit, beschreibt ein Konzept, welches die menschliche Gesundheit in Zusammenhang mit den politischen, ökonomischen und sozialen Systemen, sowie den ökologischen Grenzen unseres Planeten bringt [91]. Es zeigt die Dominanz und Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf die Gestaltung unserer Umwelt auf, und fordert die damit verbundene Verantwortung und Anerkennung planetarer Grenzen.

Durch eine Transformation hin zu Gesundheit innerhalb planetarer Grenzen werden ökologische Belastungsgrenzen nicht mehr überschritten, während allen Menschen und zukünftigen Generationen ein gesundes, würdevolles Leben in Sicherheit durch effektive und nachhaltige politische, soziale und ökonomische Systeme ermöglicht wird [92]. Planetary Health ist ein auf Kritik fossiler Wachstumslogik und an Nachhaltigkeit orientiertes Gesundheitsnarrativ, welches auf eine interdisziplinäre sowie intersektorale Auseinandersetzung mit den komplexen Beziehungen zwischen und innerhalb von Ökosystemen baut. Das Verständnis von planetarer Gesundheit geht über die isolierte Betrachtung von Umwelt und Klima hinaus. Politisch zielt Planetary Health im bundesdeutschen Kontext und mit Bezug zu Klimawandel und Gesundheit unter anderem, so etwa im Lancet Countdown Policy Brief (2021) für Deutschland formuliert, auf folgende Empfehlungen [93]:

- (1) die systematische und flächendeckende Umsetzung von Hitzeschutzplänen zur Reduktion von hitzebedingten Gesundheitsrisiken,
- (2) die Reduktion des CO₂-Fußabdruck des deutschen Gesundheitssektors und
- (3) die Integration von Klimawandel und Gesundheit/ Planetary Health in Aus-, Fort- und Weiterbildung von Gesundheitsberufen.

5.3 Klimaschutz und Klimawandelanpassung als Aufgaben für das Gesundheitssystem

Das Wissen zu den Auswirkungen des Klimawandels ist in den letzten Jahren weitergewachsen, hat an Evidenz ge-

wonnen und sowohl global als auch national wurden Strategien zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt.

Auf globaler Ebene ist das Pariser Klimaabkommen zentral, das auf der 21. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (COP21) im Dezember 2015 verabschiedet wurde. Die beigetretenen Staaten verpflichteten sich, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst jedoch auf 1,5 °C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Auf der Weltklimakonferenz 2021 in Glasgow (COP26) haben sich alle Staaten auf eine beschleunigte globale Energiewende weg von der Kohleverbrennung geeinigt; auf der COP27 2022 in Ägypten war diese Beschleunigung nicht erkennbar.

Die deutsche G7-Präsidentschaft setzte 2022 Klimawandel und Gesundheit auf die politische Agenda von sieben Industriestaaten, die sich als „Gruppe der 7“ zusammengeschlossen haben, und förderte somit die nationale und internationale Aufmerksamkeit für klimaneutrale und klimaresiliente Gesundheitssysteme.

Auf Bundesebene ist das Klimaschutzgesetz auch für das Gesundheitswesen handlungsleitend, um Klimaschutz durchzusetzen. Dieses Gesetz wurde durch einen Beschluss des Bundesverfassungsgerichts nachgebessert, da es nicht der aktuellen Generation zugestehen darf, unter vergleichsweise milder Reduktionslast große Teile des CO₂-Budgets zu verbrauchen, wenn damit zugleich den nachfolgenden Generationen eine radikale Reduktionslast überlassen und deren Leben umfassenden Freiheitseinbußen ausgesetzt würde [94]. Die Bundesregierung hat ein Klimaschutz-Sofortprogramm aufgesetzt und bereitet eine vorsorgende Klimaanpassungsstrategie vor [95]. Auch ein

nationaler Präventionsplan, der unter anderem konkrete Maßnahmen gegen klima- und umweltbedingte Gesundheitsschäden einleitet, ist geplant. Die Nationale Präventionskonferenz skizziert Aufgaben, die in diesem Zusammenhang auf einzelne Akteure zukommen [96]. Ein Klimaanpassungsgesetz soll einen Rahmen schaffen, um gemeinsam mit den Ländern die nationale Klimaanpassungsstrategie mit messbaren Zielen umzusetzen.

Mit der Deutschen Klimaanpassungsstrategie (DAS) hat die Bundesregierung 2008 den strategischen Rahmen gesetzt, um den Folgen des Klimawandels mit dem Fokus auf 16 Handlungsfelder zu begegnen [97]. Ein Netzwerk aus allen Bundesministerien und 28 Bundesoberbehörden ist daran beteiligt. Es werden messbare Ziele in vielen Bereichen erarbeitet, so auch für das Cluster Gesundheit.

Die meisten politischen Aktivitäten mit Bezug zur Klimawandelanpassung sind beim Hitzeschutz sichtbar. Bis 2025 sollen laut eines Beschlusses der 93. Gesundheitsministerkonferenz bundesweit Hitzeaktionspläne in Ländern und Kommunen erstellt werden [98]. Die Handlungsempfehlungen, die hierfür als Vorbild genutzt werden können, wurden gemeinsam vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), dem BMG und den Ländern erarbeitet [99].

Auch wenn bis dato keine Ziel- und Maßnahmenpläne vorliegen, wie das Gesundheitswesen klimaneutral und klimaresilient werden kann, so ist auf der Ebene der Gesundheitsakteure und -institutionen bereits transformatives Handeln erkennbar. Beispielsweise fordert der 125. Deutsche Ärztetag eine nationale Strategie für eine klimafreundliche Gesundheitsversorgung [100]. Im Dezember 2022 erklärten BMG, die Spitzenorganisationen im Gesundheits-

wesen sowie die Länder und kommunalen Spitzenverbände mit dem Klimapakt Gesundheit, dass sie gemeinsam für Klimaanpassung und Klimaschutz im Gesundheitswesen eintreten wollen [101]. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Zuständigkeiten im deutschen Gesundheitswesen sehr heterogen sind, und die Verantwortung auf unterschiedliche Ebenen und im Rahmen der Selbstverwaltung komplex verteilt ist.

Das Gesundheitswesen darf bei der Entwicklung und Umsetzung von Mitigations- und Adaptionsmaßnahmen nicht allein betrachtet werden; Gesundheit muss im Sinne von Health in All Policies in allen Ressorts mitgedacht werden. Durch Maßnahmen, die sowohl gut für das Klima und die Umwelt sind, als auch Vorteile durch Risikoreduktion oder Gesundheitsförderung für die Bevölkerungsgesundheit versprechen, werden Co-Benefits erzielt. Insbesondere die Bereiche der erneuerbaren Energieträger (Emissionsreduzierung und Verbesserung der Luftqualität), muskelbasierter statt motorisierter Mobilität (Emissionsreduzierung, Verbesserung der Luftqualität und Erhöhung der körperlichen Aktivität) und pflanzenbasierter Ernährung (Emissionsreduzierung und Reduzierung nicht-übertragbarer Krankheiten) bergen großes Potenzial für diese Co-Benefits [102]. Aufgrund der Synergien zwischen Klimawandelanpassung, der Verbesserung menschlicher Gesundheit und dem Biodiversitätsschutz sollten verstärkt Partnerschaften zwischen Stadtplanung, Landschaftsgestaltung, Naturschutz und Gesundheitssektor und anderen Sektoren gebildet werden.

Die grundlegenden Funktionen im Bereich der öffentlichen Gesundheit werden durch Klimawandelfolgen stark herausgefordert.

5.4 Transformation hin zu einem resilienten Public-Health-System

Es wird somit deutlich, dass zur Anpassung und zum Klimaschutz insbesondere die systemische Sicht im Sinne der One-Health- und Planetary-Health-Ansätze notwendig ist.

Brown und Westaway [103] beschreiben, dass der erfolgreiche Umgang mit Widrigkeiten und Herausforderungen eine Neuorganisation oder Transformation von Systemen nach sich ziehen kann, in der sich adaptive Funktionen optimieren. Die transformative Konsequenz von resilientem Verhalten findet sich auch in aktuellen Überlegungen zu Umweltveränderungen und sozial-ökologischen Systemen wieder.

Insbesondere die Resilienz-Definition der WHO bietet in diesem Zusammenhang eine umfassende Beschreibung. Die WHO definiert Resilienz als die Fähigkeit eines Gesundheitssystems, sich unter anderem auf Schockergebnisse vorzubereiten und sie zu bewältigen und aus ihnen zu lernen, während gleichzeitig die Kernfunktionen des Gesundheitssystems aufrechterhalten werden [104]. Im Idealfall bedeutet Resilienz nicht eine Rückkehr zum Zustand vor Eintritt des Ereignisses, sondern eine Weiterentwicklung zu etwas Besserem [105]. Transformation als Teil der Resilienz im Gesundheitsbereich kann sich zum einen auf die Fähigkeit des Systems beziehen, Praktiken zu ändern, bestimmte Dienstleistungen oder öffentliche Gesundheitsprogramme neu und zugänglicher zu gestalten, zum anderen auf medizinischen und technologischen Durchbruch. Widerstandsfähigkeit auf Systemebene kann durch die Einführung neuer Finanzierungsmechanismen gestärkt werden; damit lässt sich die

wirtschaftliche Nachhaltigkeit des Systems erhöhen, um mögliche künftige Krisen zu antizipieren und ihnen entgegenwirken zu können.

Neben der Fähigkeit von Gesundheitssystemen, mit klimawandelbedingten Herausforderungen besser umzugehen, müssen Einrichtungen des Gesundheitswesens auch ihren Beitrag zur Mitigation des Klimawandels leisten. Das Gesundheitswesen trägt weltweit erheblich zum Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen bei. Der Anteil des Gesundheitswesens an den deutschen Treibhausgasemissionen beträgt, je nach Schätzung, zwischen 5,2 % [106] und 6,7 % [107]. Gegenwärtig besteht im deutschen Gesundheitswesen keine gesetzliche Verpflichtung zu einem standardisierten Reporting von Treibhausgasemissionen. Nur wenige Gesundheitseinrichtungen dokumentieren ihre Emissionen freiwillig [93].

Relevante Bereiche für die Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks von Krankenhäusern, der pharmazeutischen Industrie und anderen Gesundheitseinrichtungen sind u. a. die Herstellung und die Lieferketten von Arzneimitteln und Medizinprodukten, die Bauweise, die Energieversorgung, Ernährung bzw. Gemeinschaftsverpflegung, Abfallreduzierung und Mülltrennung, klimafreundliche Alternativen bei Verbrauchsmaterialien (von Narkosegasen über Single-Use-Instrumente bis zu Büromaterialien) sowie umweltfreundliche betriebliche Gesundheitsförderung und Arbeitsschutz. Mit einem hohen Grad an Vertrauen in der Bevölkerung kommt Ärztinnen und Ärzten eine wichtige gesellschaftliche Rolle bei der Bewusstseinsbildung und Verhaltensänderungen zugunsten von Co-Benefits zu, z. B. Ernährung, die wenig CO₂ verursacht und zudem die Gesundheit fördert [108].

Ein klimaresilientes Gesundheitssystem könnte sich an international etablierten Kernbereichen von Public Health (Essential Public Health Functions) orientieren.

Um den Herausforderungen der umweltbedingten Gesundheitsfaktoren zu begegnen und sich ihnen anzupassen, ist ein integrierter und evidenzbasierter Ansatz im Gesundheitswesen, in Public Health und sektorübergreifend erforderlich, der durch gute Regierungsführung, Governance-Praktiken, angemessene Managementmechanismen, politischen Willen auf hoher Ebene und angemessene personelle, technische, technologische und finanzielle Ressourcen ausgestattet ist. Die WHO entwickelt aktuell Ansätze weiter, die den Klimawandel in Gesundheitskonzepten berücksichtigen, wie die EPHFs, einem Modell zur Bewertung und Weiterentwicklung öffentlicher Gesundheitsstrukturen und ihrer Funktionen [9, 109]. Diese Kernbereiche für Public Health bieten Public-Health-Systemen Orientierung; jedoch berücksichtigen Publikationen, die für die europäische Region gelten, bisher Umwelt- und Klimaaspekte zu wenig. Das Zukunftsforum Public Health veröffentlichte im Sommer 2022 einen „Call for and to Action: Klimawandel und Public Health“, in dem erstmalig Handlungsempfehlungen für Public-Health-Akteure und politische Entscheidungstragende zu diesem Themenbereich formuliert wurden. Darin werden die angesprochenen Kernbereiche von Public Health adressiert, jedoch noch nicht vollends ausformuliert [110].

Obgleich die Public-Health-Kernbereiche für Deutschland und Europa bislang noch ohne eine Einbindung von Klimawandel- und Umweltaspekten formuliert wurden, so beziehen sich die Kernbereiche der panamerikanischen Region der WHO (Pan American Health Organization, PAHO) bereits auf Klimaresilienz und Nachhaltigkeit [9]:

(1) Monitoring und Bewertung von Gesundheit und des Wohlbefindens, der Gerechtigkeit und sozialen Determi-

nanten der Gesundheit und ihre Auswirkungen auf Environmental Public Health

(2) Umweltmedizinische Surveillance von Umweltgefahren, Expositionen, Gesundheitsrisiken und Risikomanagementmaßnahmen

(3) Förderung und Management von Forschung und Wissen im Bereich Umwelt und Gesundheit

(4) Entwicklung und Umsetzung von Umwelt- und Gesundheitspolitiken und Förderung der Gesetzgebung in diesem Bereich

(5) Partizipation und soziale Mobilisierung zur Förderung von Kommunikation von Maßnahmen zu Umweltfaktoren der Gesundheit

(6) Aufbau der Humanressourcen für die Schnittstelle zwischen Umwelt und Public Health

(7) Verwendung und Verwaltung von relevanten Arzneimitteln und Gesundheitstechnologien in einer umweltfreundlichen, sicheren und nachhaltigen Weise zum Schutz der öffentlichen Gesundheit

(8) Effiziente und gerechte Finanzierung der umweltbezogenen öffentlichen Gesundheit

(9) Gerechter Zugang zu Gesundheitseinrichtungen, die resilient und ökologisch nachhaltig sind

(10) Gerechter Zugang zu gesundheitsfördernden und umweltschützenden Interventionen

(11) Einbeziehung der Dimension der umweltbezogenen öffentlichen Gesundheit in das Management und die Förderung von Interventionen zu den sozialen Determinanten der Gesundheit.

Die vollständige Erarbeitung eines Konzeptes zu Public Health und Umwelt- und Klimafaktoren steht bisher aus. Die einzelnen Artikel und insbesondere der Schlussartikel

des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit können dazu jedoch einen entscheidenden Beitrag leisten und die beschriebenen Vorarbeiten aufgreifen. In den folgenden Artikeln werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, deren Umsetzung die Auswirkungen des Klimawandels für den Public-Health-Bereich verringern kann. Zum Abschluss der Beitragsreihe werden diese Handlungsempfehlungen in einem separaten Artikel aufgegriffen und in Bezug zu den oben erwähnten Public-Health-Kernbereichen gebracht, um Akteurinnen und Akteure des Gesundheitswesens Orientierung bei der Stärkung der Resilienz der Gesundheitssystemstrukturen zu bieten.

Die Autorinnen und Autoren aller im Rahmen des Sachstandsberichts publizierten Artikel legen somit ein aktuelles, auf Deutschland fokussiertes und handlungsorientiertes Werk vor, das unsere Handlungsfähigkeit im Angesicht der Bedrohungen des Klimawandels unterstreicht und den Akteurinnen und Akteuren eine solide Grundlage für konkrete Maßnahmen an die Hand gibt. Die wissenschaftliche Evidenz ist überwältigend, der Sachstandsbericht gibt Orientierung – jetzt muss gehandelt werden.

Korrespondenzadresse

Dr. Ing. Hildegard Niemann
Robert Koch-Institut
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
E-Mail: NiemannH@rki.de

Zitierweise

Hertig E, Hunger I, Kaspar-Ott I, Matzarakis A, Niemann H et al. (2023)
Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in
den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.
J Health Monit 8(S3):7–35.
DOI 10.25646/11391

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024). Elke Hertig wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer 408057478.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und der Autor geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Beiträge der Autorinnen und Autoren

Alle Autorinnen und Autoren haben vergleichbare Beiträge geleistet und sind nach alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken Stefan Muthers (DWD) für die Bereitstellung der Daten zu Abbildung 2 und den Autorinnen und Autoren der folgenden Artikel dieses Sachstandsberichts für die Kooperation.

Das RKI-Koordinationssteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maïke Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Eis D, Helm D, Laußmann D et al. (2010) Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut, Berlin. <https://www.rki.de/DE/Content/Gesund/Umwelteinfluesse/Klimawandel/Klimawandel-Gesundheit-Sachstandsbericht.html> (Stand: 19.12.2022)
2. Nowossadeck E, von der Lippe E, Lampert T (2019) Entwicklung der Lebenserwartung in Deutschland – Aktuelle Trends. *J Health Monit* 4(1):41–48 <https://edoc.rki.de/handle/176904/5910> (Stand: 19.12.2022)
3. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022) Durchschnittliche Lebenserwartung (Periodensterbetafel) 2019/21 <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Sterbefeulle-Lebenserwartung/sterbetafel.html> (Stand: 30.03.2023)
4. Imbery F, Kaspar F, Friedrich K et al. (2021) Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts. Deutscher Wetterdienst, Offenbach. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20210106_rueckblick_jahr_2020.html (Stand: 19.12.2022)
5. Kemter M, Fischer M, Luna LV et al. (2021) Cascading hazards in the aftermath of Australia's 2019/2020 black summer wildfires. *Earths Future* 9(3):e2020EF001884
6. Kaspar-Ott I, Hertig E, Traidl-Hoffmann C et al. (2020) Wie sich der Klimawandel auf unsere Gesundheit auswirkt. *Pneumo News* 12(4):38–41
7. Pörtner HO, Scholes RJ, Agard J et al. (2021) IPBES-IPCC Co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. IPBES, IPCC. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4782538> (Stand: 19.12.2022)
8. World Health Organization (2021) 21st century health challenges: Can the essential public health functions make a difference? WHO, Geneva. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240038929> (Stand: 19.12.2022)
9. Pan American Health Organization (2022) The essential environmental public health functions. A framework to implement the agenda for the Americas on health, environment, and climate change 2021–2030. PAHO, Washington, D.C. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55673> (Stand: 19.12.2022)
10. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022) Richtlinie zur Erforschung der Zusammenhänge zwischen Biodiversität und menschlicher Gesundheit – Ein Beitrag zur Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt. BMBF. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2022/08/2022-08-09-Bekanntmachung-Biodiversitaet.html> (Stand: 19.12.2022)
11. Ege MJ, Mayer M, Normand AC et al. (2011) Exposure to environmental microorganisms and childhood asthma. *N Engl J Med* 364(8):701–709
12. Riedler J, Braun-Fahrlander C, Eder W et al. (2001) Exposure to farming in early life and development of asthma and allergy: A cross-sectional survey. *Lancet* 358(9288):1129–1133
13. Daszak P, Amuasi J, das Neves CG et al. (2020) Workshop report on biodiversity and pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). IPBES, Bonn. https://ipbes.net/sites/default/files/2020-12/IPBES%20Workshop%20on%20Biodiversity%20and%20Pandemics%20Report_o.pdf (Stand: 19.12.2022)
14. Kaplan S (1995) The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *J Environ Psychol* 15(3):169–182
15. Ulrich RS, Simons RF, Losito BD et al. (1991) Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *J Environ Psychol* 11(3):201–230
16. Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (2019) Biodiversität, eine Garantie für Gesundheit? Swiss Academies Factsheets 14(3):1–10
17. Lovell R, Wheeler BW, Higgins SL et al. (2014) A systematic review of the health and well-being benefits of biodiverse environments. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 17(1):1–20
18. Marselle MR, Stadler J, Korn H et al. (2019) Biodiversity and health in the face of climate change: Challenges, opportunities and evidence gaps. In: Marselle MR, Stadler J, Korn H et al. (Hrsg) Biodiversity and health in the face of climate change. Springer Nature, Cham, S. 1–13
19. Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press, Washington D.C.
20. Settele J (2020) Die Triple-Krise: Artensterben, Klimawandel, Pandemien: Warum wir dringend handeln müssen. Edel Books, Hamburg

21. Nesshöver C, Assmuth T, Irvine KN et al. (2017) The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Sci Total Environ* 579:1215–1227
22. Hunter RF, Cleary A, Braubach M (2019) Environmental, health and equity effects of urban green space interventions. In: Marselle MR, Stadler J, Korn H et al. (Hrsg) *Biodiversity and health in the face of climate change*. Springer Nature, Cham, S. 381–409
23. Marselle MR, Bowler DE, Watzema J et al. (2020) Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. *Sci Rep* 10(1):22445
24. United Nations (2018) 2018 revision of world urbanization prospects. United Nations. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf> (Stand: 10.03.2023)
25. IPCC (2021) Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (Hrsg) *Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimänderungen*. https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf (Stand: 20.12.2022)
26. Romanello M, McGushin A, Di Napoli C et al. (2021) The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Code red for a healthy future. *Lancet* 398(10311):1619–1662
27. Romanello M, Di Napoli C, Drummond P et al. (2022) The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. *Lancet* 400(10363):1619–1654
28. Szopa S, Naik V, Adhikary B et al. (2021) Short-lived climate forcers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani, A et al. (Hrsg) *Climate Change 2021: The physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. IPCC, Cambridge. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wgi/chapter/chapter-6/> (Stand: 19.12.2022)
29. Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282):747–756
30. Meinshausen M, Nicholls ZRJ, Lewis J et al. (2020) The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci Model Dev* 13(8):3571–3605
31. Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E et al. (2017) The shared socio-economic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Change* 42:153–168
32. Kahlenborn W, Porst L, Voß M (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung). Umweltbundesamt (Hrsg) *Climate Change* 26/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_zusammenfassung_bf_211027_o.pdf (Stand: 17.01.2023)
33. Mücke HG, Matzarakis A (2017) Klimawandel und Gesundheit. In: Wichman HE, Fromme H (Hrsg) *Handbuch der Umweltmedizin*. ecomed Medizin, Landsberg, S. 1–38
34. Hambrecht E, Tolhurst R, Whittaker L (2022) Climate change and health in informal settlements: A narrative review of the health impacts of extreme weather events. *Environ Urban* 34(1):122–150
35. Bolte G, Dandolo L, Gepp S et al. (demnächst) Klimawandel und gesundheitliche Chancengleichheit: Eine Public-Health-Perspektive auf Klimagerechtigkeit. *J Health Monit* www.rki.de/jhealthmonit
36. Wolf M, Ölmez C, Schönthaler K et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) *Climate Change* 24/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_5_cluster_wirtschaft_gesundheit_bf_211027_o.pdf (Stand: 20.12.2022)
37. World Health Organization (1986) Ottawa charter for health promotion, 1986. World Health Organization. Regional Office for Europe. <https://www.who.int/publications/i/item/ottawa-charter-for-health-promotion> (Stand: 12.05.2023)
38. Hertig E (2021) Klimawandel und Gesundheit in Europa. *Geographische Rundschau* 73(3–2021):4–7
39. Kaspar-Ott I, Hertig E (2022) Der Klimawandel: Wo wir stehen und was uns erwartet. In: Scherer M, Berghold J, Hierdeis H (Hrsg) *Klimakrise und Gesundheit: Zu den Risiken einer menschengemachten Dynamik für Leib und Seele*. Vandenhock & Ruprecht, Göttingen, S. 23–48
40. Ofori SA, Cobbina SJ, Obiri S (2021) Climate change, land, water, and food security: Perspectives from Sub-Saharan Africa. *Front Sustain Food Syst* 5: 680924

41. McIntyre KM, Setzkorn C, Hepworth PJ et al. (2017) Systematic assessment of the climate sensitivity of important human and domestic animals pathogens in Europe. *Sci Rep* 7(1):7134
42. Ibañez-Justicia A, Poortvliet PM, Koenraadth CJM (2019) Evaluating perceptions of risk in mosquito experts and identifying undocumented pathways for the introduction of invasive mosquito species into Europe. *Med Vet Entomol* 33(1):78–88
43. Semenza JC, Suk JE (2018) Vector-borne diseases and climate change: A European perspective. *FEMS Microbiol Lett* 365(2):fnx244
44. Beermann S, Dobler G, Faber M et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. *J Health Monit* 8(S3):36–66. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
45. Fritsch U, Zebisch M, Voß M et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 3: Klimarisiken im Cluster Wasser. Umweltbundesamt (Hrsg) *Climate Change 22/2021*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_3_cluster_wasser_bf_211027_o.pdf (Stand: 20.12.2022)
46. Loewe P, Frohse A, Schulz A (2009) Temperatur. In: Loewe P (Hrsg) *System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, S. 111–134. https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Meer_und_Umwelt/Berichte-des-BSH/Berichte-des-BSH_44.html (Stand: 20.12.2022)
47. Matzarakis A, Tinz B (2014) Tourismus an der Küste sowie in Mittel- und Hochgebirge: Gewinner und Verlierer. In: Lozán JL, Graßl H, Jendritzky G et al. (Hrsg) *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. www.warnsignale.uni-hamburg.de, Elektron. veröffent. <https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/gesundheitsrisiken/kapitel-4-1-tourismus-an-der-kueste-sowie-in-mittel-und-hochgebirge-gewinner-und-verlierer/> (Stand: 20.12.2022)
48. Bundesinstitut für Risikobewertung (2020) *Fördert der Klimawandel das Risiko von Infektionen durch Vibrionen?* Bundesinstitut für Risikobewertung. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/foerdert-der-klimawandel-das-risiko-von-infektionen-durch-vibrionen.pdf> (Stand: 20.12.2022)
49. Semenza JC, Paz S (2021) Climate change and infectious disease in Europe: Impact, projection and adaptation. *Lancet Reg Health Eur* 9:100230
50. Meinke I (2020) Norddeutschland im Klimawandel – Was wissen wir über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Norddeutschland? Helmholtz-Zentrum, Geesthacht. https://www.hereon.de/imperia/md/content/klimabuero/klimaberichte/hzg_norddeutschland-im-klimawandel_e-book.pdf (Stand: 20.12.2022)
51. Dupke S, Buchholz U, Fastner J et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen. *J Health Monit* 8(S3):67–84. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
52. Kovats RS, Edwards SJ, Hajat S et al. (2004) The effect of temperature on food poisoning: A time-series analysis of salmonellosis in ten European countries. *Epidemiol Infect* 132(3):443–453
53. Dietrich J, Hammerl JA, John A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen. *J Health Monit* 8(S3):85–101. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
54. Burnham JP (2021) Climate change and antibiotic resistance: A deadly combination. *Ther Adv Infect Dis* 8:2049936121991374
55. MacFadden DR, McGough SF, Fisman D et al. (2018) Antibiotic resistance increases with local temperature. *Nat Clim Chang* 8(6):510–514
56. Meinen A, Tomczyk S, Wiegand F et al. (2023) Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel. *J Health Monit* 8(S3):102–119. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
57. Schultz MG, Klemp D, Wahner A (2017) Luftqualität. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 127–136
58. Jacob DJ, Winner DA (2009) Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ* 43(1):51–63
59. Katragkou E, Zanis P, Kioutsioukis I et al. (2011) Future climate change impacts on summer surface ozone from regional climate-air quality simulations over Europe. *J Geophys Res Atmos* 116:D22307

60. Hertig E, Schneider A, Peters A et al. (2019) Association of ground-level ozone, meteorological factors and weather types with daily myocardial infarction frequencies in Augsburg, Southern Germany. *Atmos Environ* 217:116975
61. Katsouyanni K, Samet JM, Anderson HR et al. (2009) Air pollution and health: A European and North American approach (APHENA). *Res Rep Health Eff Inst* 142:5–90
62. Hertig E, Russo A, Trigo RM (2020) Heat and ozone pollution waves in Central and South Europe – Characteristics, weather types, and association with mortality. *Atmosphere* 11(12):1271
63. Jahn S, Hertig E (2020) Modeling and projecting health-relevant combined ozone and temperature events in present and future Central European climate. *Air Qual Atmos Health* 14:563–580
64. Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A et al. (demnächst) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
65. Matzarakis A (2021) Hitzeereignisse: Charakteristika, Gesundheitsrelevanz und Anpassungsmöglichkeiten. *Geographische Rundschau* 73(3–2021):8–13
66. Winklmayr C, Muthers S, Niemann H et al. (2022) Hitzebedingte Mortalität in Deutschland zwischen 1992 und 2021. *Dtsch Arztebl Int* 119(26):451–457
67. Schlegel I, Muthers S, Matzarakis A (2021) Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen. Umweltbundesamt (Hrsg) *Umwelt & Gesundheit* 04/2021.
<https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/einfluss-des-klimawandels-auf-die-morbiditaet> (Stand: 20.12.2022)
68. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (demnächst) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
69. Razafimaharo C, Krähenmann S, Höpp S et al. (2020) New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). *Theor Appl Climatol* 142(3):1531–1553
70. Kreienkamp F, Philip SY, Tradowsky JS et al. (2021) Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*
<https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf> (Stand: 20.12.2022)
71. Thober S, Marx A, Boeing F (2018) Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Leipzig.
https://www.ufz.de/export/data/2/207531_HOKLIM_Brosch%C3%BCre_final.pdf (Stand: 20.12.2022)
72. UFZ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (2022) Dürremonitor Deutschland – Jährliche Dürrestärken in Deutschland.
<https://www.ufz.de/index.php?de=47252> (Stand: 20.12.2022)
73. Riedel T, Nolte C, aus der Beek T et al. (2021) Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. Umweltbundesamt (Hrsg) *Texte* 174/2021.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/niedrigwasser-duerre-grundwasserneubildung> (Stand: 20.12.2022)
74. Butsch C, Beckers LM, Nilson E et al. (demnächst) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
75. Ludwig A, Bayr D, Pawlitzki M et al. (2021) Der Einfluss des Klimawandels auf die Allergenexposition: Herausforderungen für die Versorgung von allergischen Erkrankungen. In: Günster C, Klauber J, Robra B-P et al. (Hrsg) *Versorgungsreport Klima und Gesundheit*. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Berlin, S. 133–144.
<https://www.wido.de/publikationen-produkte/buchreihen/versorgungs-report/klima-und-gesundheit/> (Stand: 20.12.2022)
76. Seth D, Bielory L (2021) Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Immunol Allergy Clin North Am* 41(1):17–31
77. Lake IR, Jones NR, Agnew M et al. (2017) Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ Health Perspect* 125(3):385–391

78. Bergmann KC, Brehler R, Endler C et al. (demnächst) Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
79. Baldermann C, Lorenz S (2019) UV-Strahlung in Deutschland: Einflüsse des Ozonabbaus und des Klimawandels sowie Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung. *Bundesgesundheitsbl* 62(5):639–645
80. Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, AWMF (2021) S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs Leitlinienprogramm Onkologie. DKG, DK, AWMF.
<https://www.leitlinienprogramm-onkologie.de/leitlinien/hautkrebs-praevention/> (Stand: 20.12.2022)
81. Baldermann C, Laschewski G, Groß JU (demnächst) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
82. Clayton S, Manning CM, Speiser M et al. (2021) Mental health and our changing climate: Impacts, inequities, responses. American Psychological Association, and ecoAmerica, Washington, D. C.
<https://www.apa.org/news/press/releases/mental-health-climate-change.pdf> (Stand: 21.12.2022)
83. Cianconi P, Betrò S, Janiri L (2020) The impact of climate change on mental health: A systematic descriptive review. *Front Psychiatry* 11:74
84. Gebhardt N, van Bronswijk K, Bunz M et al. (demnächst) Scoping review zu Klimawandel und psychischer Gesundheit in Deutschland – Direkte und indirekte Auswirkungen, vulnerable Gruppen, Resilienzfaktoren. *J Health Monit*
www.rki.de/jhealthmonit
85. Doyle U, Schröder P, Schönfeld J et al. (2020) Was ist der One Health-Ansatz und wie ist er umzusetzen? *UMID* 02/2020:65–72
86. Schwabe C (1964) *Veterinary medicine and human health*. Williams & Wilkins, Baltimore
87. Zinsstag J, Schelling E, Waltner-Toews D et al. (2011) From “one medicine” to “one health” and systemic approaches to health and well-being. *Prev Vet Med* 101(3–4):148–156
88. Gruetzmacher K, Karesh WB, Amuasi JH et al. (2021) The Berlin principles on one health – Bridging global health and conservation. *Sci Total Environ* 764:142919
89. One Health High-Level Expert P, Adisasmito WB, Almuhairei S et al. (2022) One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. *PLoS Pathog* 18(6):e1010537
90. Zinsstag J, Crump L, Schelling E et al. (2018) Climate change and One Health. *FEMS Microbiol Lett* 365(11):fny085
91. Müller O, Jahn A, Gabrysch S (2018) Planetary Health: Ein umfassendes Gesundheitskonzept. *Dtsch Arztebl* 115(40):A 1751–1752
92. Baltruks D, Gepp S, van de Pas R et al. (2022) Gesundheit innerhalb planetarer Grenzen. Offene Fragen an Politik, Wissenschaft und Gesundheitsakteure. Centre for Planetary Health Policy.
<https://cphp-berlin.de/policy-brief-gesundheit-innerhalb-planetarer-grenzen/> (Stand: 20.12.2022)
93. Matthies-Wiesler F, Herrmann M, Schulz C et al. (2021) The Lancet countdown on health and climate change policy brief für Deutschland.
https://www.klimawandel-gesundheit.de/wp-content/uploads/2021/10/20211020_Lancet-Countdown-Policy-Germany-2021_Document_v2.pdf (Stand: 20.12.2022)
94. Bundesverfassungsgericht (2021) Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021.
<https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html> (Stand: 20.12.2022)
95. Die Bundesregierung (2022) Sofortprogramm 2022.
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/sofortprogramm-klimaschutz-1934852> (Stand: 20.12.2022)
96. Die Nationale Präventionskonferenz (2022) Prävention, Gesundheits-, Sicherheits- und Teilhabeförderung in Lebenswelten im Kontext klimatischer Veränderungen.
https://www.npk-info.de/fileadmin/user_upload/umsetzung/pdf/gesundheits-_sicherheits-_und_teilhabefoerderung_in_lebenswelten_im_kontext_klimatischer_veraenderungen.pdf (Stand: 17.01.2023)
97. Die Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
https://www.bmu.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf (Stand: 07.03.2023)

98. Gesundheitsministerkonferenz (2020) Beschlüsse der GMK 30.09.2020–01.10.2020.
<https://www.gmkonline.de/Beschluesse.html?id=1018&-jahr=2020> (Stand: 20.12.2022)
99. Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels (2017) Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesgesundheitsbl 60(6):662–672
100. Bundesärztekammer (2021) Ärztetag für Klimaneutralität des Gesundheitswesens bis 2030.
<https://www.bundesaerztekammer.de/presse/aktuelles/detail/aerztetag-fuer-klimaneutralitaet-des-gesundheitswesens-bis-2030> (Stand: 20.12.2022)
101. Bundesministerium für Gesundheit (2022) Gemeinsame Erklärung Klimapakt Gesundheit. Gemeinsam für Klimaanpassung und Klimaschutz im Gesundheitswesen eintreten.
https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/G/Gesundheit/Erklaerung_Klimapakt_Gesundheit_A4_barrierefrei.pdf (Stand: 20.12.2022)
102. Haines A (2017) Health co-benefits of climate action. Lancet Planet Health 1(1):e4–e5
103. Brown K, Westaway E (2011) Agency, capacity, and resilience to environmental change: Lessons from human development, well-being, and disasters. Annu Rev of Environ Resour 36(1):321–342
104. World Health Organization (2022) Health systems resilience toolkit: A WHO global public health good to support building and strengthening of sustainable health systems resilience in countries with various contexts. WHO, Geneva.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240048751> (Stand: 20.12.2022)
105. European Observatory on Health Systems and Policies (2020) How to make health systems more resilient to COVID-19 and other crises. News Release 19.06.2020.
<https://eurohealthobservatory.who.int/news-room/news/item/19-06-2020-how-to-make-health-systems-more-resilient-to-covid-19-and-other-crises> (Stand: 20.12.2022)
106. Karliner J, Slotterback S, Boyd R et al. (2019) Health Care's Climate Footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm, Arup.
https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf (Stand: 20.12.2022)
107. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U et al. (2019) International comparison of health care carbon footprints. Environ Res Lett 14(6):064004
108. Betsch C, Eitze S, Sprengholz P et al. (2022) Ergebnisse aus der Planetary Health Action Survey – PACE. Universität Erfurt – Philosophische Fakultät.
https://projekte.uni-erfurt.de/pace/_files/PACE_Wo7-09.pdf (Stand: 20.12.2022)
109. Frumkin H, Hess J, Lubner G et al. (2008) Climate change: the public health response. Am J Public Health 98(3):435–445
110. Zukunftsforum Public Health (2022) Call for and to Action: Klimawandel und Public Health.
<https://zukunftsforum-public-health.de/call-for-action-klimawandel/> (Stand: 20.12.2022)

Impressum

Journal of Health Monitoring

www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11392

Robert Koch-Institut, Berlin

Sandra Beermann¹, Gerhard Dobler², Mirko Faber³, Christina Frank³, Birgit Habedank⁴, Peter Hagedorn⁵, Helge Kampen⁶, Carola Kuhn⁴, Teresa Nygren³, Jonas Schmidt-Chanasit⁷, Erik Schmolz⁴, Klaus Stark³, Rainer G. Ulrich^{8,9}, Sabrina Weiss¹⁰, Hendrik Wilking³

¹ Robert Koch-Institut, Berlin

² Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München, Nationales Konsiliarlabor für Frühsommer-Meningoenzephalitis

³ Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionsepidemiologie

⁴ Umweltbundesamt, Berlin
Fachgebiet IV 1.4 Gesundheitsschädlinge und ihre Bekämpfung

⁵ Robert Koch-Institut, Berlin
Zentrum für Biologische Gefahren und Spezielle Pathogene

⁶ Friedrich-Loeffler-Institut, Greifswald – Insel Riems, Institut für Infektionsmedizin

⁷ Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, Hamburg, Arbovirologie und Entomologie

⁸ Friedrich-Loeffler-Institut, Greifswald – Insel Riems, Institut für neue und neuartige Tierseuchenerreger

⁹ Deutsches Zentrum für Infektionsforschung, Greifswald – Insel Riems

¹⁰ Robert Koch-Institut, Berlin
Zentrum für Internationalen Gesundheitsschutz

Eingereicht: 10.10.2022

Akzeptiert: 10.01.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten

Abstract

Hintergrund: Endemische wie auch importierte Vektor- und Nagetier-übertragene Infektionserreger können mit hoher Morbidität und Mortalität assoziiert sein. Daher sind Vektor- und Nagetier-assoziierte Erkrankungen des Menschen und deren mögliche Beeinflussung durch klimatische Veränderungen ein wichtiges Thema für die öffentliche Gesundheit.

Methode: Für diese Übersichtsarbeit wurde die Literatur entsprechend der thematisierten Aspekte identifiziert, ausgewertet und durch Meldedaten für Deutschland ergänzt.

Ergebnisse: Faktoren wie höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und das Verhalten der Menschen können die Epidemiologie von Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionskrankheiten in Deutschland beeinflussen.

Schlussfolgerungen: Die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf die Ausbreitung der Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionskrankheiten müssen im Detail weiter untersucht und bei Klimaanpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

RESERVOIRWIRTE · VEKTOREN · ARBOVIREN · ZOOSENE · PUUMALA-ORTHOHANTAVIRUS

1. Einleitung

Vektor- und Nagetier-assoziierte Erkrankungen des Menschen und deren mögliche Beeinflussung durch klimatische Veränderungen sind ein wichtiges Thema für die öffentliche Gesundheit – regional, national und global. Sowohl einheimische als auch importierte Vektor- und Nagetier-übertragene Infektionserreger können mit hoher Morbidität und Mortalität assoziiert sein und erhebliche Kosten für das Gesundheitssystem verursachen. Globalisierung und Klimawandel begünstigen zudem die Einschleppung und

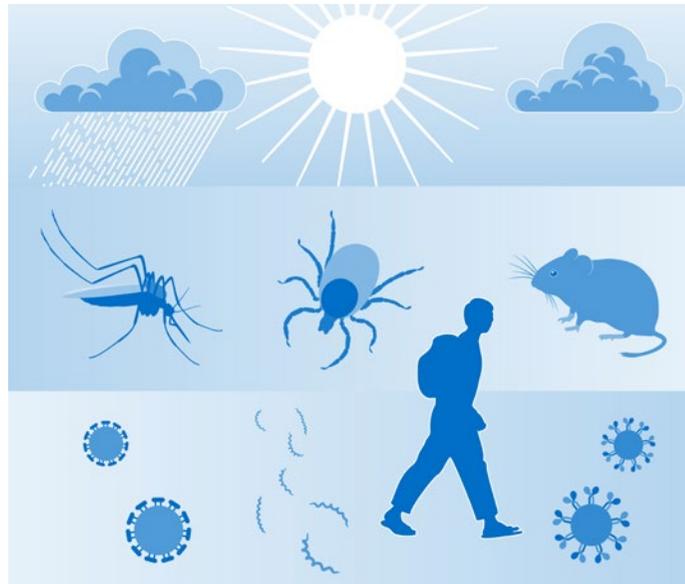
Ausbreitung neuer Vektoren sowie neuer Vektor-übertragener Infektionserreger, die auch in Deutschland mit einer Ausweitung des Infektionserregerspektrums einhergehen.

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über diese Faktoren sowie eine Aussicht auf mögliche Entwicklungen in Bezug auf unterschiedliche Vektor- und Nagetier-assoziierte Krankheiten, die durch den Klimawandel beeinflusst werden könnten (*Abbildung 1*). Im ersten Teil des Artikels stehen die Stechmücken-assoziierten Viren im Fokus, die als Folge von Globalisierung und Klimaerwärmung auch in Deutschland wieder an Bedeutung gewonnen haben. Der

Abbildung 1

Das Klima (oben) beeinflusst Vektoren und Reservoirwirte sowie das Verhalten des Menschen (Mitte) und dadurch Vektor- und Nagetier-assoziierte Krankheitserreger (unten) und das Auftreten der von ihnen verursachten Infektionskrankheiten

Illustration: Guido Hegasy



nachfolgende Abschnitt betrachtet die von Schildzecken übertragenen Erreger und die Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) und Lyme-Borreliose, die eine hohe Public-Health-Relevanz für Deutschland besitzen. Anschließend wird die zoonotische Hantavirus-Erkrankung beim Menschen beschrieben.

Im letzten Abschnitt werden Handlungsoptionen für den Umgang mit Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionen sowie deren Kontrolle und Prävention aufgeführt.

2. Methodik

Die Autorinnen und Autoren legten gemeinsam die gemäß ihrer Expertise darzustellenden Inhalte dieser Übersichtsarbeit fest. Die Literaturzitate wurden entsprechend den thematisierten Aspekten identifiziert und eingefügt. Darüber

hinaus wurden am Robert Koch-Institut (RKI) nach dem Infektionsschutzgesetz (IfSG) erhobene Meldedaten zur Veranschaulichung der Situation in Deutschland eingefügt. Einzelne Gruppen von Autorinnen und Autoren bereiteten Entwürfe für die verschiedenen Abschnitte vor, die von allen Autorinnen und Autoren diskutiert und in eine finale Form gebracht wurden.

3. Mit Stechmücken assoziierte Infektionskrankheiten

3.1 Vorkommen und Verbreitung vektorkompetenter Stechmücken in Deutschland

Stechmücken können Vektoren von Viren, Protozoen und Filarien sein. In Deutschland waren sie bis vor einigen Jahrzehnten nur als Überträger von Plasmodien (parasitische Protozoen), den Erregern der Malaria, bekannt. Nach der weitgehenden Eradizierung der Malaria aus Europa in der Mitte des 20. Jahrhunderts spielten Stechmücken in Deutschland lange Zeit keine Rolle mehr als Vektoren, die es zu überwachen galt. Die erfolgreiche Bekämpfung der Malaria basierte im Wesentlichen auf der Entwicklung von synthetischen Medikamenten und der neu erkannten insektiziden Wirkung von DDT (1,1,1-Trichlor-2,2-bis-(4-chlorphenyl)ethan) [1]. Mit Stechmücken assoziierte Krankheiten, die sich durch eine relevante Morbidität oder gar Mortalität auszeichnen, waren in der Folge jahrzehntelang nicht vorhanden. Während die endemischen Plasmodien-Spezies im Zuge der Malariabekämpfung verschwanden, erholten sich die Populationen der übertragenden *Anopheles*-Arten wieder und sind heute nach wie vor Bestandteil der deutschen Stechmückenfauna. Diese setzt sich aus mindestens 52 Arten zusammen, wobei Überschwemmungsmücken

(*Aedes (Ae.) vexans*, *Ae. sticticus*) und die Arten des *Culex (Cx.) pipiens*-Komplexes (*Cx. pipiens*, *Cx. torrentium*) die häufigsten und am weitesten verbreiteten Stechmückenarten in Deutschland sind [2]. Bei fünf dieser Arten handelt es sich um Neozoen, d. h. durch menschliche Einflussnahme in einem Gebiet neu etablierte Arten, deren Auftreten seit 2007 in Folge von Globalisierung und Klimaerwärmung beobachtet wird. Für sie wurden in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland fortlaufende Reproduktion und wiederholte Überwinterung nachgewiesen, so dass sie, zumindest regional, als etabliert angesehen werden müssen.

Seit 2011 werden in Deutschland durchgehend Monitoringaktivitäten durchgeführt, die aktuelle Daten zum Vorkommen und zur Verbreitung von Stechmückenarten liefern. Diese basieren sowohl auf der systematischen Erfassung von Adulttieren mithilfe von Fallenfängen und ungerichteten Larvalsammlungen (aktives Monitoring), als auch auf zufälligen Einsendungen von Stechmücken aus der Bevölkerung über das Citizen-Science-Projekt „Mückenatlas“ (passives Monitoring). Insbesondere der Mückenatlas hat sich als gutes Frühwarnsystem zur Entdeckung invasiver Arten erwiesen [3, 4].

Für 23 der in Deutschland auftretenden Arten existieren Belege, dass sie vektorkompetent für diverse Krankheitserreger sind, d. h. genetisch und physiologisch prinzipiell befähigt, die Krankheitserreger in ihrem Körper zu vermehren bzw. zur Weiterentwicklung zu bringen und zu übertragen. Von weiteren der einheimischen Stechmückenarten wird dies angenommen, obwohl wissenschaftlich belastbare Belege noch ausstehen [4].

Die tatsächliche Vektorrolle eines blutsaugenden Gliederfüßers spiegelt sich in der sogenannten Vektorkapazität

wider, die u. a. eine Funktion der Vektorhäufigkeit und der Verfügbarkeit von Infektionsquellen ist [5]. Unter Infektionsquellen sind alle Wirbeltiere zu verstehen, an denen sich Stechmücken infizieren können. Eine erhebliche Rolle spielt aber auch die Außentemperatur, die sowohl die Entwicklung des Vektors als auch die des Krankheitserregers im Vektor beeinflusst. Ab gewissen artspezifischen Minimaltemperaturen werden physiologische Prozesse in Gang gesetzt, die sich – bis zu bestimmten maximalen Grenztemperaturen – mit steigenden Temperaturen beschleunigen. So setzen manche Stechmückenarten nach der Winterruhe ihre Larvalentwicklung im Frühjahr schon bei wenigen Grad oberhalb der Gefriertemperatur fort (die Japanische Buschmücke, *Ae. japonicus*, etwa bei ca. 4–5 °C [6]). Bei steigenden Temperaturen kommt es zur Erhöhung der Stichfrequenz, zur Beschleunigung der Blutverdauung, der Eibildung, der Juvenilentwicklung und des Generationszyklus, was insgesamt zu höheren Populationsdichten führt. Ebenso verlängert sich die saisonale Aktivitätsperiode. Gegenläufig ist eine kürzere individuelle Lebensdauer bei hohen Temperaturen [7].

Viele Arboviren, d. h. von Arthropoden übertragene Viren, replizieren und disseminieren in ihren Vektoren erst ab Temperaturen von 11–15 °C [8]. Im Toleranzbereich von Vektoren und Viren erfolgt die Virogenese umso schneller, je höher die Temperaturen sind, so dass Intensität und Effizienz der Erregerübertragung im Einklang mit höheren Stichfrequenzen der Mücken zunehmen [9]. Dass eine Virusübertragung durch Stechmücken in Deutschland bislang eher die Ausnahme war, ist – abgesehen von der vermutlich moderaten Verfügbarkeit von Infektionsquellen – möglicherweise der Tatsache geschuldet, dass die Temperaturen

für die extrinsische Entwicklung der Viren und deren effiziente Übertragung nicht ausreichend hoch waren. Hierauf deuten etwa Laborexperimente hin, in denen infizierte, in gemäßigten Klimazonen vorkommende Mückenarten erst bei Inkubationstemperaturen von 24–27 °C infektiös wurden [10–12]. Aber auch das erstmalige Auftreten des West-Nil-Virus (WNV) im Jahr 2018, dem in Deutschland bis dato wärmsten Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen [13], weist in diese Richtung. Steigende Temperaturen könnten somit die Übertragung von Krankheitserregern nicht nur durch bekannte potenzielle Vektoren, sondern auch durch noch nicht als potenzielle Vektoren erkannte einheimische Stechmückenarten ermöglichen.

Potenzielle Überträger des WNV, diverse *Culex*- und *Aedes*-Arten, kommen in ganz Deutschland vor [14]. Das Virus zirkuliert saisonal zwischen den Stechmücken und Vögeln, die das Virus eintragen (Transportwirte), eine hohe Viruslast im Blut (Virämie) entwickeln (Amplifikationswirte) und teilweise auch versterben [15]. Basierend auf vorangegangenen Ausbrüchen in Südeuropa war daher schon lange vor 2018 mit Krankheitsfällen in Deutschland gerechnet worden [16, 17]. Offenbar ermöglichten aber erst die besonders hohen Temperaturen im Spätsommer 2018 eine effiziente Virusentwicklung in den Stechmücken und sichtbare Transmission in Form von Krankheitsfällen.

Hauptüberträger des WNV auf Säuger und damit sogenannte Brückenvektoren, die das Virus von Vögeln auf andere Wirte übertragen, sind bestimmte wirtsunspezifische Varianten der Gemeinen Hausmücke *Cx. pipiens*, insbesondere spätsommerlich auftretende Hybride der beiden Biotypen *pipiens* und *molestus* [18]. Säuger selbst stellen jedoch keine WNV-Infektionsquellen für Stechmücken dar

(Fehlwirte), da die Virämien zu gering für eine Weitergabe des Virus an Stechmücken sind. Seit 2019 wurde das WNV in Deutschland während der Stechmückensaison mehrfach in Mücken des *Cx. pipiens*-Komplexes nachgewiesen und im Winter 2020/2021 auch in überwinterten Weibchen dieses Artenkomplexes [19]. Dies belegt die Überwinterung des Virus in den Vektoren und lässt seine langfristige Persistenz in Deutschland vermuten.

Die endemischen Stechmückenarten kommen durch die evolutionäre Anpassung gut mit dem mitteleuropäischen Klima zurecht und können auch kalte Winter problemlos überstehen. Infektionsquellen und ausreichende Präzipitation bzw. Verfügbarkeit von Wasserreservoirien für die Larvalentwicklung vorausgesetzt, könnten bei anhaltender Klimaerwärmung auch bisher nicht als Vektoren in Erscheinung getretene Arten mittelfristig vektoriiell an Bedeutung gewinnen. Eine solche Verfügbarkeit von Wasserreservoirien ist gerade in Siedlungsbereichen durch die Vorhaltung von Regenwasser in künstlichen Containern für die Gartenbewässerung weiterhin anzunehmen. Langfristig muss man davon ausgehen, dass eng an die gemäßigten Bedingungen angepasste Stechmückenarten ihre Verbreitungsgebiete in kühlere Regionen verschieben und durch wärmeliebende Arten ersetzt werden.

Unter den fünf neuen Stechmückenarten, die sich seit 2007 in Deutschland etabliert haben, befinden sich drei wärmeliebende Spezies (*Ae. albopictus*, *Anopheles petragrani*, *Culiseta longiareolata*). Drei Spezies gelten als potenzielle Überträger humanpathogener Erreger (*Ae. albopictus*, *Ae. japonicus*, *Ae. koreicus*) [20]. Den thermophilen Arten gelingt es infolge der mangelnden klimatischen Anpassung nur langsam, sich anzusiedeln und auszubreiten. Sie kommen geo-

Der internationale Tourismus und der weltweite Tier- und Warenhandel tragen zur Verbreitung von Vektoren und Krankheitserregern bei.

grafisch nur punktuell in Deutschland vor. Immerhin aber zeigt ihr Vorkommen sich bessernde Lebensbedingungen für wärmeliebende Arten an. Unter diesen hat die Asiatische Tigermücke *Ae. albopictus* eine herausragende Stellung: Sie gilt als die weltweit invasivste Stechmückenart [21] und ist ein hocheffizienter Vektor zahlreicher Krankheitserreger des Menschen [22, 23] ([Abschnitt 3.3 Durch *Ae. albopictus* übertragene Erreger](#)). In Südeuropa, wo diese Stechmücke weit verbreitet ist und teilweise in hohen Dichten vorkommt, ist sie schon verschiedentlich als Überträger des Dengue-Virus (DENV) und des Chikungunya-Virus (CHIKV) aufgefallen [24].

Die interkontinentale Verschleppung der Tigermücke nach Europa erfolgt vorwiegend über den Gebrauchtreifenhandel, der Eintrag nach Deutschland aber vermutlich im Wesentlichen über den Kraftfahrzeugfernverkehr aus Südeuropa [25, 26]. Mittlerweile konnte sie in Deutschland einige Populationen aufbauen [27]. Diese gehen auf Stämme zurück, die im Zuge der Anpassung an die klimatischen Bedingungen – und im Gegensatz zu tropischen Stämmen – diapausierende, d. h. an physiologische Ruhephasen adaptierte, Überwinterungseier produzieren. Die Populationen sind vorwiegend im wärmebegünstigten Oberrheintal und in anderen Gebieten Baden-Württembergs zu finden, aber auch Hessen, Bayern und Thüringen sind betroffen [28].

An den meisten Orten mit bekannt gewordenen Tigermücken-Populationen wurden von Kommunen und Ländern Präventions- und Bekämpfungsmaßnahmen implementiert (z.B. [29]). Oberstes Ziel der Maßnahmen ist mittlerweile nicht mehr die Eliminierung der Populationen, sondern die Reduktion ihrer Individuendichte, da diese das Übertragungsrisiko mitbestimmt. Da Stechmücken

in den letzten Jahrzehnten in Mitteleuropa keine gesundheitliche Problematik darstellten, ist die Expertise im Bereich des Vektormanagements aktuell in Deutschland sehr limitiert.

Mit steigenden Temperaturen dürfte der Asiatischen Tigermücke die Ansiedlung und Ausbreitung in Deutschland leichter fallen. Laut Fachliteratur ist der für die Ansiedlung limitierende Faktor die durchschnittliche Jahrestemperatur, die bei mindestens 11 °C liegen muss [30, 31]. Kalte Winter machen der Stechmücke ebenfalls zu schaffen. Es überleben meist jedoch genug Eier an geschützten Plätzen, die eine neue Population im Folgejahr aufbauen können [32, 33]. Den letzten Modellierungen zufolge wird ein Großteil Deutschlands bis zum Jahr 2040 für die Besiedlung durch *Ae. albopictus* geeignet sein, obwohl verschiedene Ansätze (z. B. mechanistische Modelle, korrelative Nischenmodelle) stark im Ergebnis voneinander abweichen und mangelnde Kenntnisse der klimatischen Rahmenbedingungen sowie der ökologischen Anpassungsfähigkeit der Tigermücke nur grobe Vorhersagen zulassen [34, 35]. Die am stärksten limitierenden Faktoren für die Ausbreitung von *Ae. albopictus* in Europa sind die niedrigen winterlichen Minimaltemperaturen im Osten, die niedrigen sommerlichen Durchschnittstemperaturen in der Mitte und der geringe Niederschlag im Süden [36].

Regional haben sich in Deutschland ebenfalls *Ae. japonicus* und *Ae. koreicus* angesiedelt, die in experimentellen Studien einige Viren und Fadenwürmer übertragen konnten [37–39]. Im Freiland sind sie noch nicht als Vektoren in Erscheinung getreten. In [Tabelle 1](#) sind wichtige in Deutschland vorkommende Stechmückenarten dargestellt, die als Vektoren fungieren können.

Tabelle 1
Wichtige potenzielle Stechmücken-Vektoren
in Deutschland und ihre epidemiologische
Bedeutung für die Übertragung
ausgewählter Viren
 Quelle: Eigene Darstellung

	WNV	DENV	CHIKV	ZIKV	USUV	SINV
<i>Aedes albopictus</i> (Asiatische Tigermücke)	+	+++	+++	+++	?	+
<i>Aedes japonicus</i> (Japanische Buschmücke)	+	+	+	+	+	?
<i>Aedes koreicus</i> (Koreanische Buschmücke)	?	?	+	+	?	?
<i>Aedes vexans</i>	+	?	?	+	?	?
<i>Culex pipiens</i> (Gemeine Hausmücke)	+++	–	–	–	+++	+++
<i>Culex modestus</i>	++	?	?	–	?	?
<i>Culex torrentium</i>	+	?	?	–	++	+

+++ = hohe, ++ = mittlere, + = geringe, – = keine, ? = nicht bekannte epidemiologische Bedeutung

WNV = West-Nil-Virus, DENV = Dengue-Virus, CHIKV = Chikungunya-Virus, ZIKV = Zika-Virus, USUV = Usutu-Virus, SINV = Sindbis-Virus

3.2 Durch einheimische Stechmücken übertragene Erreger

Während in Deutschland auch einige minderpathogene oder epidemiologisch vernachlässigbare Stechmücken-assoziierte Viren zirkulieren, wie z. B. das Sindbis-, das Batai- oder das Usutu-Virus, ist das neu aufgetretene WNV von relevanter Bedeutung für die öffentliche Gesundheit. Es gehört zur Familie *Flaviviridae* und wurde erstmals 1937 aus einem fieberhaften Patienten in Uganda isoliert. Seit den 1950er-Jahren wurde es in vielen europäischen Ländern in Stechmücken, Vögeln und Menschen nachgewiesen [16]. Ein Ausbruch in Rumänien im Jahr 1996 ging das erste Mal mit schweren humanen Erkrankungen und Todesfällen in Europa einher [40]. In den letzten zwanzig Jahren kam es zu vermehrten Epidemien auf fast allen Kontinenten [41].

Im Hitzesommer 2018 erlebte Europa den bisher größten registrierten WNV-Ausbruch mit mehr als 1.600 Fällen, darunter 166 Todesfälle [42]. Im Gegensatz zu früheren großen Epidemien, die durch die WNV-Linie 1 hervorgerufen wurden [16], zirkuliert seit 2010 in Europa vor allem die

WNV-Linie 2. Trotz intensiver und wiederholter Untersuchungen zum Vorkommen von WNV in deutschen Stechmücken, Vögeln und Pferden wurde das Virus erst 2018 in Deutschland nachgewiesen [13]. Im selben Jahr wurde auch erstmals eine in Deutschland erworbene (autochthone) Infektion bei einem Menschen gemeldet. Allerdings wurde diese Infektion vermutlich durch direkten Kontakt zu einem verendeten Vogel hervorgerufen. Eine humane Infektion mit WNV ist, wie alle Arbovirosen, gemäß IfSG seit 2016 meldepflichtig. Zusätzlich bestehen überlappende Meldepflichten nach Transfusionsgesetz (TFG) [43]. Bis 2017 waren alle in Deutschland gemeldeten WNV-Infektionen reiseassoziiert. In den Jahren 2019 bis 2021 wurden, nun mutmaßlich mit Stechmücken assoziiert, insgesamt 31 autochthone humane WNV-Infektionen in vier Bundesländern (Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen) verzeichnet (Tabelle 2). Alle Erkrankten wohnten in Kreisen, in denen zuvor schon WNV-Infektionen bei Vögeln oder Pferden beschrieben worden waren. Davon waren 29 symptomatisch und erfüllen somit die Referenzdefinition des RKI. Der jeweilige Erkrankungsbeginn lag zwischen dem

Tabelle 2
Meldungen von humanen West-Nil-Virus-Infektionen seit dem autochthonen Auftreten des Virus in Deutschland, 2018–2021

Quelle: SurvNet, Datenbank der in Deutschland meldepflichtigen Infektionskrankheiten

	Art der Infektionen	2018	2019	2020	2021	Gesamt
Meldung gemäß IfSG	Reiseassoziierte Fälle ¹	10	7	1	1	19
	Autochthone Fälle ¹	1	5	20	4	30
	Autochthone asymptomatische Infektionen	0	0	2	0	2
Meldung nur gemäß TFG	Autochthone Infektionen bei Blutspenderinnen und -spendern	Nicht erhoben	Nicht erhoben	8	1	9
	Gesamt	11	12	31	6	60

¹Symptomatische Infektionen
 IfSG = Infektionsschutzgesetz, TFG = Transfusionsgesetz

27. Juli und dem 19. September, jeweils in oder kurz nach den heißesten Phasen des Sommers in der Region. Betroffen waren 10 Frauen und 21 Männer im Alter von 24 bis 85 Jahren. Zwölf Infizierte hatten neuroinvasive Infektionen, und von diesen verstarb eine Person.

Vermutlich verlaufen ca. 80 % aller WNV-Infektionen beim Menschen asymptomatisch und ca. 19 % entwickeln ein meist unkompliziertes West-Nil-Fieber. Bei etwa 1 % der Infizierten entsteht eine neuroinvasive Krankheitsform, vor allem bei älteren Menschen und chronisch Erkrankten, welche mit einer Letalität von ca. 10 % einhergeht [44]. Das Virus ist auch für die Blutsicherheit von großer Bedeutung [45], da Personen, die Transfusionen benötigen, aufgrund ihrer Grunderkrankungen anfälliger für schwere WNV-Krankheitsverläufe sind.

Aktuell ist nur ein Teil Deutschlands, vor allem Berlin, große Teile von Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt sowie kleinere Teile Thüringens und Niedersachsens, von autochthoner WNV-Übertragung betroffen [43]. Dieses Gebiet, definiert durch Virusnachweise bei Menschen, Vögeln, Stechmücken und Pferden, hat sich seit 2018 kaum verändert, kann sich jedoch jederzeit ausdehnen. Dabei ist

die Infektion nur saisonal relevant, in Deutschland vor allem im Zeitraum Juli bis September.

Die genauen Wege, auf denen WNV nach Deutschland gelangte, sind nicht bekannt. Jedoch zirkulieren nah verwandte Virusstämme in Österreich und der Tschechischen Republik [13]. Möglicherweise hat die sehr intensive WNV-Saison 2018 in Südeuropa vermehrt Gelegenheiten für eine Ausweitung des zuvor betroffenen Endemiegebietes geboten. Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass WNV aufgrund des außergewöhnlich langen und heißen Sommers 2018 gute Bedingungen für eine Zirkulation zwischen Stechmücken und Vögeln in Deutschland fand, wodurch es dann auch zu einer ersten Überwinterung kommen konnte [13].

Heißere Sommer, veränderte Niederschlagsmuster und das Freizeitverhalten der Menschen können die Epidemiologie von WNV in Deutschland beeinflussen: Die beobachtete Saisonalität in Deutschland sowie Daten zu Ausbrüchen in anderen Regionen zeigen, dass in längeren und heißeren Sommern auch die saisonale Übertragung von WNV länger und intensiver ist. Auch Niederschlagsmuster, die die Populationen von WNV-übertragenden Stech-

Faktoren wie höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und das Verhalten der Menschen können Inzidenz und Prävalenz von Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionskrankheiten beeinflussen.

mücken beeinflussen, können lokal und regional zur Intensivierung der WNV-Übertragung beitragen [46]. Nicht zuletzt verbringen in besonders langen und heißen Sommern die Menschen auch mehr Zeit im Freien und kommen so ggf. mehr in Kontakt mit WNV-übertragenden Stechmücken. Möglicherweise ausgleichend wirkt, dass reiseassoziierte WNV-Infektionen und andere reiseassoziierte Arbovirosen seltener werden, wenn Urlaube im Sommerhalbjahr wegen wärmeren Wetters statt im Ausland in Deutschland verbracht werden.

Die Prävention besteht aus der professionellen Vektorkontrolle und persönlichen Schutzmaßnahmen, um das Expositionsrisiko zu verringern (vor allem für ältere und vorerkrankte Menschen) und das Screening von Blutspenden. Für Menschen steht aktuell kein Impfstoff gegen WNV zur Verfügung. Um die Menschen diesbezüglich zu sensibilisieren, bedarf es einer verbesserten zielgruppenorientierten Aufklärung, auf deren Basis persönliche Maßnahmen getroffen werden können.

3.3 Durch *Ae. albopictus* übertragene Erreger

Zusammen mit *Ae. aegypti*, der Gelbfiebermücke, ist die Asiatische Tigermücke in den Tropen und Subtropen der wichtigste Vektor für Arboviren, darunter für die in Deutschland recht häufig bei Reiserückkehrern diagnostizierten Viren DENV, CHIKV und Zika-Virus (ZIKV).

Bei einer DENV-Infektion kommt es nur bei ca. 25 % zu einer klinischen Symptomatik. Die meisten Patientinnen und Patienten entwickeln eine milde fieberhafte und selbstlimitierende Erkrankung, die man als Denguefieber bezeichnet. Bei einem kleinen Teil der Erkrankten tritt eine schwere

Verlaufsform auf, die mit Blutungen einhergehen kann. Die meisten ZIKV-Infektionen verlaufen ohne Symptome. Wenn Symptome auftreten, sind diese meistens mild und ähneln denen einer DENV-Infektion. ZIKV-Infektionen während der Schwangerschaft können zu Fehlbildungen beim Fötus führen (z. B. Mikrozephalie). Eine CHIKV-Infektion resultiert häufig in der Manifestation des Chikungunya-Fiebers. Die Hauptbeschwerden der Erkrankung sind sehr starke Muskel- und Gliederschmerzen, die zu einer schmerzhaft zusammengekrümmten Körperhaltung führen können. Bei 5–10 % der Erkrankten können Gelenkschmerzen über Monate anhalten.

Die Endemiegebiete dieser Viren liegen in den Tropen und Subtropen, so auch in beliebten Fernreiseländern wie Thailand, Indien oder Brasilien. [Tabelle 3](#) zeigt die Anzahl der in den letzten zehn Jahren jährlich in Deutschland gemäß IfSG an das RKI übermittelten Fälle von Infektionen mit diesen Erregern. Die Fallzahlen schwanken stark, beeinflusst von ebenfalls nicht-konstanten Infektionsrisiken in den Fernreiseländern. Bis auf eine im Krankenhaus erworbene (nosokomiale) DENV-Infektion und drei ZIKV-Infektionen im Rahmen von Laborunfällen waren alle Infektionen reiseassoziiert.

Hiesige *Ae. albopictus* könnten Viren von symptomatischen oder auch asymptomatischen virämischen Reiserückkehrern in Deutschland auf andere Menschen übertragen. Auf diese Weise sind in Italien CHIKV-Epidemien und in anderen südeuropäischen Ländern kleine autochthone Fallcluster von DENV- und ZIKV-Infektionen verursacht worden [47–49].

Stechmücken-assoziierte autochthone Infektionen mit den vermeintlich tropischen Viren wurden zwar in Deutsch-

Tabelle 3
Meldungen gemäß Infektionsschutzgesetz von Infektionen mit Dengue-, Chikungunya- und Zika-Virus in Deutschland, 2012–2021

Quelle: SurvNet, Datenbank der in Deutschland meldepflichtigen Infektionskrankheiten

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 ²	2021 ²
DENV	616	878	625	725	957	635	612	1176	205	60
CHIKV	9	16	162	110	74	33	26	88	26	4
ZIKV	0 ¹	0 ¹	0 ¹	2 ¹	22	69	18	11	6	2

¹Noch keine IfSG-Meldepflicht, ²Pandemiebedingter Rückgang der Fernreisetätigkeit
 DENV = Dengue-Virus, CHIKV = Chikungunya-Virus, ZIKV = Zika-Virus, IfSG = Infektionsschutzgesetz

land bislang nicht dokumentiert. Vektorkompetenzstudien mit den deutschen *Ae. albopictus*- Populationen zeigen aber, dass diese unter den vorherrschenden sommerlichen Temperaturen in der Lage sind, CHIKV zu übertragen [50]. Für DENV- und ZIKV-Epidemien reichen bisherige gewöhnliche mitteleuropäische Sommertemperaturen dagegen vermutlich nicht aus [51, 52]. Wärmere Sommer und verlängerte Hitzeperioden begünstigen voraussichtlich autochthone Übertragungen der genannten Erreger, ebenso wie früh-warme Frühjahre in Kombination mit nicht zu trockenen Sommern und dadurch hoher Stechmückendichte im Hochsommer. Die Bedeutung von früh-warmen Frühjahren wurde 2022 durch die gehäuften autochthonen Denguefieber-Cluster in Frankreich deutlich [53]. Es ist zu beachten, dass z. B. bei DENV bis zu 75 % der Infektionen asymptomatisch verlaufen und diese deshalb in Deutschland kaum zur Diagnose gelangen, die infizierten Personen jedoch als Virusquelle für Stechmücken relevant sein können. Die gemeldeten Infektionen mit all diesen Erregern sind daher als Spitze des Eisberges anzusehen. Allerdings stellen diejenigen Reisenden, die bei Ankunft in Deutschland nicht mehr virämisch sind, die in der kalten Jahreszeit ankommen und sich in Gebieten ohne *Ae. albopictus* (oder andere geeignete Vektoren) aufgehalten haben, keine Virusquelle für heimische Stechmücken dar.

4. Mit Schildzecken assoziierte Infektionskrankheiten

4.1 Vektoruell bedeutende Schildzecken in Deutschland und der Einfluss von Umwelt- und klimatischen Faktoren

Schildzecken sind in Mitteleuropa die bedeutendsten Überträger von Infektionserregern auf den Menschen. Von den mindestens 19 in Deutschland einheimischen, im Freiland in natürlichen Biotopen in der Nähe geeigneter Wirtstiere lebenden Schildzeckenarten hat der deutschlandweit verbreitete Gemeine Holzbock *Ixodes (I.) ricinus* die größte gesundheitliche Bedeutung [54, 55]. Diese Zeckenart nutzt ein sehr breites Wirtsspektrum zur Blutaufnahme, findet in Eichen-Buchen- und Laub-Mischwäldern besonders geeignete Bedingungen und kommt hier oft in höheren Dichten vor. Alle Stadien können auch den Menschen befallen, wobei insbesondere die Jungstadien mit einer Größe von etwa einem Millimeter leicht übersehen werden. Regional relativ weit verbreitet sind außerdem die Auwaldzecke *Dermacentor (D.) reticulatus* sowie die Schafzecke *D. marginatus*, deren Jungstadien in der Regel an Nagetieren parasitieren, v. a. in Nagetierbauten (endophil) nachweisbar sind und deren Adulte größere Säugetierwirte bevorzugen. Einheimische Schildzecken können diverse Pathogene übertragen wie FSME-Viren ([Abschnitt 4.2 Frühsommer-Meningoenzephalitis](#)),

spiralförmige Bakterien der Gattung *Borrelia* (Abschnitt 4.3 Lyme-Borreliose), aber auch andere bisher weniger beachtete Bakterien wie *Francisella tularensis* (Erreger der Tularämie), *Coxiella burnetii* (Erreger des Q-Fiebers), *Rickettsia* spp., *Anaplasma phagocytophilum*, *Ehrlichia* spp. und Parasiten wie *Babesia* spp. (z. B. Erreger der „Hundemalaria“ *Babesia canis*). Einige der genannten Pathogene verursachen schwerere Krankheitsverläufe und sind daher in Deutschland gemäß IfSG oder Verordnungen der Bundesländer überwiegend meldepflichtig. Bei anderen Pathogenen werden Fälle von Übertragungen auf den Menschen vergleichsweise selten erfasst, Infektionen verlaufen bei immunkompetenten Personen überwiegend mild oder unspezifisch, so dass sie oft unbemerkt bleiben.

Die Infektionserreger zirkulieren in der Regel in sogenannten Naturherden unter Wildtieren (Reservoirtieren) und werden unter diesen zumeist durch Schildzecken übertragen. Schildzecken gelten auch als Überträger dieser Pathogene auf weitere Tierwirte wie Nutz- und Haustiere und den Menschen. Voraussetzungen für eine Übertragung sind der Aufenthalt in Biotopen mit infizierten Zecken, eine ausreichend lange Befestigung der infizierten Zecke zum Blut-saugen am Körper und das Ausbleiben von Maßnahmen zum Infektionsschutz.

Über Wild-, Haus- und Nutztiere sowie den Menschen können aber auch weitere Schildzeckenarten und Erreger nach Deutschland eingeschleppt werden. Nachgewiesen wurde z. B. die wiederholte Einschleppung der braunen Hundezecke *Rhipicephalus sanguineus* (Vektor u. a. von *Rickettsia* (*R.*) *conorii*, *R. massiliae* und *Babesia vogeli*) seit den 1970er-Jahren mit Hunden, die zu vorübergehenden Etablierungen in Gebäuden führten [56, 57]. Insbesondere

seit den sehr warmen Jahren 2018 und 2019 wurden in mindestens 12 von 16 Bundesländern auch Adultstadien der wärmeliebenden *Hyalomma* (*H.*) *marginatum* und *H. rufipes* gefunden [58–60], die als Jungstadien vermutlich mit Zugvögeln aus Afrika oder Südeuropa nach Deutschland eingeschleppt wurden. Ähnliche Entwicklungen wurden in mehreren europäischen Ländern dokumentiert, u. a. Schweden, dem Vereinigten Königreich und den Niederlanden [61–63]. In etwa 30–40% dieser nach Deutschland eingeschleppten Zecken des *H. marginatum*-Komplexes wurde *R. aeschlimanni* nachgewiesen, ein humanpathogenes Bakterium der Fleckfieber-Gruppe. Das Krim-Kongo-Hämorrhagisches-Fieber-Virus (CCHFV) konnte bisher in Deutschland noch nicht nachgewiesen werden [58, 59, 64]. Allerdings wurde auf der italienischen Insel Ventotene von einem Braunkehlchen und Mittelmeer-Steinschmätzer jeweils eine mit CCHFV infizierte *H. rufipes* nachgewiesen [65]. Aus Südeuropa, Spanien und Südfrankreich wird von einer zunehmenden Etablierung von *H. marginatum*-Populationen berichtet, sowie in Südeuropa und Spanien von vereinzelt CCHFV-Nachweisen bei Nutz-, Wildtieren und beim Menschen [66]. Ob sich bisher nicht-einheimische Erreger und Schildzeckenarten in Deutschland etablieren können und wie sich die in Deutschland bereits bestehenden einheimischen Wirt-Schildzecken-Pathogen-Beziehungen entwickeln, hängt von vielen Faktoren ab. Wesentlich beeinflusst wird dies vor allem auch durch den Klimawandel [67–69].

Schildzecken reagieren artspezifisch unmittelbar auf makro- und mikroklimatische Einflussfaktoren. Schlüsselfaktoren sind die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit

Biotische und abiotische Faktoren beeinflussen die Aktivität, Reproduktion, Entwicklungsdauer, Überwinterung und Überlebensrate von Vektoren.

keit. Bei höheren Temperaturen und geeigneter Luftfeuchtigkeit werden z. B. Entwicklungsprozesse beschleunigt und dadurch die Dauer von Häutungen von einem Stadium zum nächsten oder die Dauer der Eiablage verkürzt [70–72]. Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden daher Auswirkungen des Klimawandels auf einheimische und medizinisch bedeutende, einschleppbare Schildzeckenarten genauer untersucht [73, 74]. Als Grundlage für Modellierungen wurden georeferenzierte Europa-Karten für 17 in Deutschland einheimische bzw. einschleppbare Zeckenarten erstellt und der erste Zecken-Atlas für Deutschland veröffentlicht [75, 76] (aktueller Zecken-Atlas veröffentlicht unter [77]). *I. ricinus* ist gegenwärtig bereits deutschlandweit verbreitet [74, 78]. Im Zuge des Klimawandels ist in geeigneten Biotopen, wie z. B. Eichen-Buchen-Mischwäldern mit Unterholz, ausreichend Wirten und schützender Laubstreu eine höhere Zeckendichte möglich. Kommt es etwa unter günstigen klimatischen Bedingungen in kürzeren Abständen zu einer effektiven Buchenmast und in Folge zu größeren Nagetierpopulationen [79, 80], stehen damit mehr Wirte für Zecken wie *Ixodes* spp. und *Dermacentor* spp. zur Blutaufnahme und Erregerübertragung zur Verfügung. Temperaturen und Luftfeuchtigkeit beeinflussen die Aktivität, Entwicklungsdauer, Diapause, Überwinterung und die Überlebensraten der Zecken. Einzelne aktive Zecken wurden bereits ab einer Bodentemperatur von 4 °C beobachtet [73].

Verbreitungsmodellierungen für *D. reticulatus* und *D. marginatus* mittels MAXENT- und BIOCLIM-Modell (statistische Habitatmodelle) unter Berücksichtigung biologischer und geografischer Besonderheiten und unter Verwendung von Landschafts- und Gewässerdaten wiesen darauf hin, dass bereits gegenwärtig in Deutschland eine

weitere Verbreitung dieser Zeckenarten, insbesondere von *D. reticulatus*, möglich ist [74, 81]. Aktuellere Nachweise dieser Zeckenarten in weiteren Regionen bestätigten diese Ergebnisse [82, 83]. Für *H. marginatus* wurden ebenfalls Habitategnungsmodellierungen mittels MAXENT- und BIOCLIM-Modell durchgeführt [74, 84]. Eine Projektion für 2050 weist darauf hin, dass sich die klimatischen Bedingungen für *H. marginatus* in Deutschland weiter verbessern werden [74]. Die neuen Nachweise der Zecken des *H. marginatus*-Komplexes seit 2018 in Deutschland bestätigen den Eintrag und zumindest in warmen und trockeneren Frühjahrs- und Sommerperioden für diese Zecken geeignete Bedingungen für die Entwicklung zu adulten Zecken. Modellierungen, insbesondere auch unter Berücksichtigung von Wirtspopulationen, z. B. Modellierungen zur potenziellen Verbreitung von *H. marginatus* durch Zugvögel [85], unterstützen die Risikobewertung und geben Hinweise, wo diese Zecken im Rahmen eines systematischen Monitorings zur Früherkennung zu suchen sind. Generell bestehen allerdings bei solchen Modellierungen aufgrund des multifaktoriellen Geschehens und der Abhängigkeit von den Modellannahmen noch große Unsicherheiten.

Steigende Temperaturen vor allem in den Winter- bis Sommermonaten, Hitzeperioden und Extremwetterlagen sowie Veränderungen des Wasserhaushalts mit Auswirkungen auf die relative Luftfeuchtigkeit und das Sättigungsdefizit der Luft beeinflussen die Naturherde der Infektionen mit ihren Pflanzen- und Tiergemeinschaften einschließlich der Schildzecken und der in ihnen befindlichen Pathogene. Es bedarf weiterer Forschung, um die komplexen Zusammenhänge besser zu verstehen und für Präventionsstrate-

Ein ökologisches Nischenmodell zeigte, dass die Verbreitung der Frühsommer-Meningoenzephalitis-Virus-Infektionsorte in Deutschland mit erhöhtem Niederschlag/erhöhter Temperatur im Sommer und mit einer Abnahme von Frosttagen im Winter in Verbindung steht.

gien zu nutzen. Im Folgenden werden die zwei bedeutendsten von Schildzecken übertragenen Krankheiten thematisiert.

4.2 Frühsommer-Meningoenzephalitis

Das FSME-Virus wird in Deutschland vorrangig von *I. ricinus*-Zecken übertragen, seltener von anderen Zeckenarten (u. a. möglich durch *D. reticulatus*) oder über infizierte Rohmilch(-produkte). Etwa 70–95% der Infektionen verlaufen asymptomatisch. Symptomatische Erkrankungen verlaufen teils mild, teils schwerer mit Manifestationen des zentralen Nervensystems (Meningitis, Enzephalitis, Myelitis), bis hin zum Tod bei 1% der Erkrankten [86]. Ältere Personen erkranken generell schwerer als Kinder. Dennoch kommen auch bei Kindern schwere Verlaufsformen vor.

Die seit 2001 nach IfSG gemeldeten FSME-Erkrankungen weisen eine ausgeprägte Saisonalität auf, mit den meisten Erkrankungen (98%) zwischen April und November. Die jährlichen Fallzahlen schwanken stark zwischen 195 (2012) und 712 Fällen (2020). Von 2001 bis 2016 wurden im Median jährlich 276 Fälle gemeldet. Von 2017 bis 2022 wurden im Median jährlich 505 Fälle registriert, also über 200 Fälle mehr. Im Zeitraum 2001 bis 2018 wurde ein statistisch signifikanter Trend von jährlich 2% höheren Fallzahlen beobachtet sowie eine saisonale Verschiebung, so dass Infektionen jedes Jahr 0,69 Tage früher auftraten [87, 88]. Während *I. ricinus* in ganz Deutschland verbreitet ist und auch weiträumig die Erreger der Lyme-Borreliose übertragen kann, tritt das FSME-Virus vor allem im Süden von Deutschland endemisch auf, hier in Form kleinräumiger Naturherde. Die Anzahl von Risiko-Land- und Stadtkreisen nach der Definition des RKI (Fünffahresinzi-

denz > 1:100.000) stieg von 129 Kreisen (2007) auf 175 Kreise (2022) [86], mit einer deutlichen Ausweitung Richtung Norden (Abbildung 2). Bemerkenswert ist die Entwicklung in Sachsen: 2014 wurde der erste Kreis zum Risikogebiet erklärt, 2022 waren bereits 10 von 13 Kreisen Risikogebiete. Etwa 3% der Meldedefälle treten zudem außerhalb der offiziellen Risikogebiete auf [86].

Das FSME-Virus zirkuliert in der Natur zwischen seinen Vektoren (Schildzecken) und den natürlichen Wirten (Kleinsäugetern wie der Rötelmaus *Clethrionomys glareolus* oder der Gelbhalsmaus *Apodemus flavicollis*). Das Virusvorkommen wird damit durch ein komplexes Zusammenspiel von klimatisch-ökologischen Faktoren bedingt, welche sich in verschiedener Weise auf den Übertragungszyklus auswirken können. Sie können sowohl synergistisch auf beide biologische Systeme (Vektor und Wirt) wirken, jedoch auf jeweils einen Partner im Übertragungssystem oder auf beide Systeme auch antagonistisch. Dieses komplexe Zusammenwirken erschwert Vorhersagen oder Modellierungen der zukünftigen Entwicklung der FSME.

Wärmere Temperaturen, insbesondere milde Winter und warme Frühlinge, sind vorteilhaft für die Zeckenaktivität und das Überleben. Ist die Temperatur in heißen und trockenen Sommern zu hoch, ziehen die Zecken sich in geschützte Vegetationsschichten zurück [89]. Eigene Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Zahl der Nymphen (Jugendstadium) im Frühjahr nach milden Wintern deutlich erhöht ist, d. h. mehr Zeckenlarven und/oder Nymphen überleben. Insgesamt scheint allerdings die Zahl der adulten Zecken nicht zuzunehmen. Trockenperioden in den Folgemonaten führen möglicherweise zu erhöhter Sterblichkeit der Adulten oder sich nicht zu Adulten weiter

Abbildung 2
Entwicklung der FSME-Risikogebiete,
2007 – 2022

Quelle: Robert Koch-Institut



entwickelnden Nymphen. Zu den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Nagetierpopulation, z. B. der Röteldmaus, sind Erkenntnisse weiter unten zusammengefasst ([Abschnitt 5 Hantaviren](#)). Zu direkten Auswirkungen auf mit dem FSME-Virus infizierte Kleinsäuger und damit indirekt auf den Übertragungszyklus des FSME-Virus gibt es

bisher keine Analysen. Der Einfluss klimatischer Faktoren auf die Virusreplikation ist ebenfalls nicht geklärt. Es gibt allerdings Hinweise, dass bestimmte FSME-Virus-Stämme sich an unterschiedliche Umgebungstemperaturen in der Zecke anpassen können [90]. Ein ökologisches Nischenmodell zeigt, dass die Verbreitung der FSME-Virus-Infektionsorte in Deutschland dort signifikant häufiger ist, wo Niederschlag und Temperatur im Sommer hoch sind und wenige Frosttage im Winter auftreten [91]. Angesichts der voraussehbaren klimatischen Veränderungen könnte sich das Habitat von *I. ricinus* laut einer Modellierung ausdehnen, insbesondere in Nord- und Osteuropa [92]. Auch eine Ausbreitung in größere Höhenlagen wird u. a. aus der Tschechischen Republik berichtet [93]. Regelmäßig werden erste FSME-Fälle aus Ländern berichtet, die bislang als FSME-frei galten, z. B. 2019 aus dem Vereinigten Königreich oder den Niederlanden [94].

Neben diesen abiotischen Faktoren spielt auch das menschliche Verhalten eine Rolle für das Infektionsrisiko. Das Rekordhoch von 712 FSME-Meldefällen im Jahr 2020 hing neben dem hohen Zeckenvorkommen auch damit zusammen, dass die Bevölkerung während der COVID-19-Pandemie häufiger Spaziergänge unternahm [95]. Auch in guten Pilzjahren können im Herbst vermehrt FSME-Virus-Infektionen auftreten. Warme Perioden können allgemein zu vermehrten Aufenthalten in der Natur führen, und, wenn es sich um Zeckenhabitate handelt, zu erhöhter Zeckenexposition und damit einem erhöhten Infektionsrisiko.

Da keine Therapie zur Behandlung der FSME existiert, hat die Prävention einen hohen Stellenwert. Schutzmaßnahmen vor Zeckenstichen, z. B. das Tragen langer und heller Kleidung, das Abdichten der Hosenbeine sowie das

Absuchen nach jedem Aufenthalt in der Natur, können das Erkrankungsrisiko deutlich senken. Außerdem kann die FSME-Virus-Impfung Infektionen effektiv verhindern [96]. Bei der Mehrzahl (99 %) der jährlichen Meldedefälle in Deutschland sind die Menschen nicht oder nicht ausreichend geimpft. Selbst in Risikogebieten verfügen nur etwa 20 % der Bevölkerung über einen vollständigen Impfschutz [86]. Hier besteht großes Potenzial für den Gesundheitsschutz, den Großteil der FSME-Erkrankungen durch eine Steigerung der Impfquoten zu verhindern.

4.3 Lyme-Borreliose

Lyme-Borreliose ist die mit Abstand häufigste Vektor-übertragene Infektionskrankheit in Deutschland.

Die von Zecken (in Mitteleuropa v. a. *I. ricinus*) übertragenen Bakterien *Borrelia (B.) burgdorferi* sensu lato (s. l.) sind die Erreger der Lyme-Borreliose, die mit klinischen Manifestationen der Haut (Erythema migrans, Acrodermatitis chronica atrophicans), des Nervengewebes (Neuroborreliose), der Gelenke (Lyme-Arthritis) und des Herzens (Lyme-Karditis) einhergehen kann. Neuroborreliose und Lyme-Karditis sind teilweise mit schweren Krankheitsverläufen verbunden. Lyme-Borreliose tritt in allen Altersgruppen auf. Die Lyme-Borreliose kommt, entsprechend dem Vorkommen ihrer Vektoren, überwiegend zwischen dem 40. und 60. nördlichen Breitengrad vor, ein Bereich, in dem Deutschland und große Teile Europas liegen.

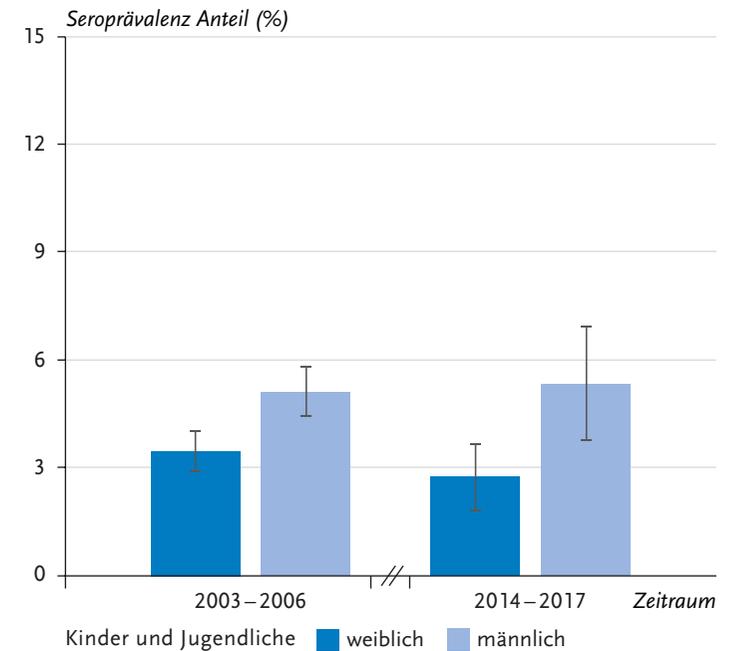
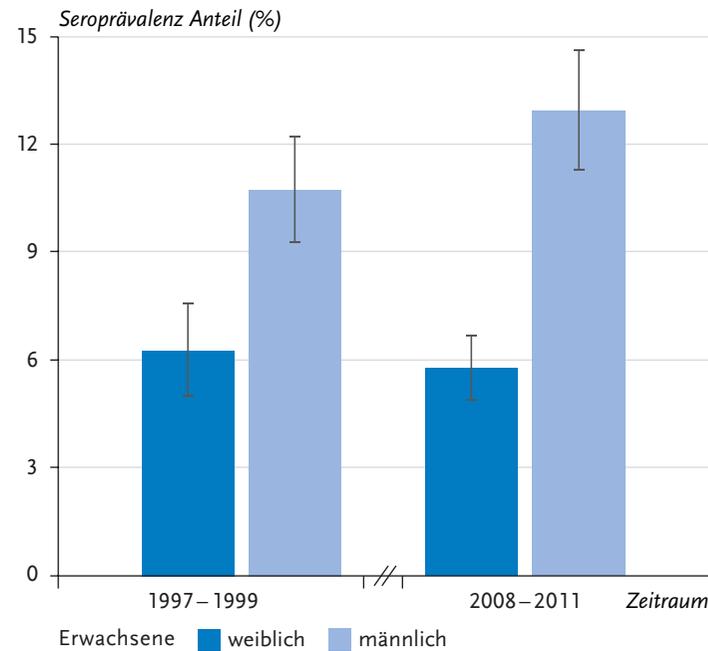
Der Klimawandel kann in einem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren Infektionen mit *B. burgdorferi* s. l. und die Inzidenz von Lyme-Borreliose innerhalb dieses Gebietes beeinflussen. Er führt in einigen Regionen zu

milden und feuchten Wintern und wärmeren Frühlingen. Dies verlängert den Zeitraum der Zeckenaktivität und -dichte und erhöht die Kontakthäufigkeit zwischen Menschen und Zecken, die sich in höheren Lyme-Borreliose-Inzidenzen manifestiert. Andererseits sind heiße, trockene Sommer für *I. ricinus* ungeeignet und können zu weniger Infektionen führen. Darüber hinaus könnte verändertes Outdoor-Verhalten der Menschen (z. B. Aufenthalte im Freien häufiger und früher in der Saison) die Kontakthäufigkeit zu Zecken in der Bevölkerung verändern und somit zu häufigeren Infektionen führen [97].

In Deutschland werden durch das RKI und das Nationale Referenzzentrum für Borrelien regelmäßig bevölkerungsrepräsentative Untersuchungen zur *B. burgdorferi*-Seroprävalenz bei Kindern und Jugendlichen sowie bei Erwachsenen durchgeführt (Abbildung 3). In den beobachteten Zeiträumen war ein leichter Anstieg bei Männern (18–79 Jahre) und ein leichter Abfall bei Mädchen (3–17 Jahre) zu beobachten [98, 99]. Ein signifikanter Anstieg der Seroprävalenz von *B. burgdorferi*-spezifischen Antikörpern in der Gesamtbevölkerung konnte jedoch nicht beobachtet werden. Eine Veränderung des Infektionsrisikos bis 2017 konnte somit in den Serosurveys bisher nicht bestätigt werden. Dies könnte daran liegen, dass sich Einflüsse mit entgegengesetzten Wirkungen (steigende Temperaturen und größere Trockenheit) ausgeglichen bzw. sich regional unterschiedlich ausgewirkt haben, so dass diese durch bundesweite Untersuchungssurveys nicht detektierbar sind. Darüber hinaus könnten die bisherigen Studienzeiträume von etwa zehn Jahren für Langzeittrends zu kurz gewesen sein.

Die Lyme-Borreliose ist in 9 von 16 Bundesländern eine meldepflichtige Infektionskrankheit [100, 101]. Das zeitliche

Abbildung 3
 Repräsentative Schätzungen der Seroprävalenz von *Borrelia burgdorferi* bei Erwachsenen (18–79 Jahre) und Kindern und Jugendlichen (3–17 Jahre) in Deutschland, 1997–2017
 Quelle: Eigene Darstellung nach Woudenberg et al. [98]



Auftreten der Meldefälle zeigt ein ausgeprägtes saisonales Muster. Bei 57% der Fälle wurde von einem Krankheitsbeginn zwischen Juni und August berichtet, wobei die Saisonalität je nach klinischer Manifestation unterschiedlich ausfällt: Fälle von Erythema migrans erreichen ihren Höhepunkt im Juli (22%), Neuroborreliose-Fälle im August (20%) und Lyme-Arthritis-Fälle sind gleichmäßiger über das Jahr verteilt. Die Inzidenz der Lyme-Borreliose ist höher in den Monaten mit höheren Temperaturen. Diese saisonale Verteilung variiert leicht von Jahr zu Jahr, sie ist aber bisher bundeslandübergreifend relativ konstant geblieben. Relevante Veränderungen im saisonalen Ablauf können bisher nicht bestätigt werden. Dies könnte daran liegen, dass der Klimawandel keinen oder wenig Einfluss auf saisonale

Unterschiede in der Lyme-Borreliose-Inzidenz hat. Alternativ könnte der Einfluss auf die Saisonalität in großräumigen Meldedaten nicht erkennbar sein und die Ausprägungen kleinräumiger stattfinden bzw. Datenartefakte bei den Meldungen den Einfluss des Klimawandels maskieren.

International gibt es aus einigen Regionen Publikationen und Berichte, dass die Ausbreitung und Inzidenz der Lyme-Borreliose in den letzten Jahren auch im Zusammenhang mit der zunehmenden Erwärmung (und dadurch gemäßigten Wintern und feucht-warmen Sommern) zugenommen hat, beispielsweise im Mittleren Westen der USA und in Kanada [102]. Die Fallzahlen der Lyme-Borreliose sind in bestimmten Regionen Kanadas seit Beginn der Surveillance 2009 deutlich angestiegen [103]. Dies ist vor allem auf eine

Die Prävention, insbesondere Vektorkontrolle und Expositionsprävention, hat einen hohen Stellenwert bei der Risikoreduzierung der Infektion mit Vektor- und Nagetier-assoziierten Krankheitserregern.

stärkere, insbesondere klimabedingte Ausbreitung des Vektors *I. scapularis* zurückzuführen. Auch in bestimmten Gegenden Nordeuropas (z. B. Schottland) hat sich die Lyme-Borreliose verstärkt ausgebreitet [104].

Modellierungen in den USA ergaben, dass in bestimmten geografischen Räumen (Nordosten) bei fortschreitendem Temperaturanstieg (laut Klimaszenarien) die Inzidenz der Lyme-Borreliose in den nächsten Jahrzehnten wahrscheinlich signifikant ansteigen wird [105]. Diese Modellierungen sind allerdings mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet und ein Anstieg der Inzidenz konnte nicht für alle betrachteten geografischen Regionen der USA prognostiziert werden. Eine andere Analyse in den USA fand einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Inzidenz der Lyme-Borreliose [106]. Unter der Annahme eines Temperaturanstieges von 2 °C (mittlere Jahrestemperatur) in den nächsten Dekaden wurde in dieser Studie eine Zunahme der Fälle von Lyme-Borreliose in den USA um über 20 % prognostiziert.

In einer Studie aus Österreich wurden die zeitlichen und geografischen Trends von Lyme-Borreliose und FSME für den Zeitraum 2005–2018 ausgewertet [107]. Die Inzidenzen der beiden Krankheiten und ihre jährlichen Fluktuationen waren geografisch nicht konkordant, obwohl die Erreger den gleichen Zeckenvektor und die gleichen Nagetierreservoir aufweisen. Zum Teil noch unbekannte kleinräumige Faktoren wie Vektor- und Erregerbiologie und Verhaltensmuster scheinen eine Rolle zu spielen.

Auch wenn die Einflussfaktoren auf die Inzidenz der Lyme-Borreliose komplex sind, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass klimatische Faktoren wie mildere Winter und wärmere, feuchtere Frühjahr- bis Herbstperioden zu einem

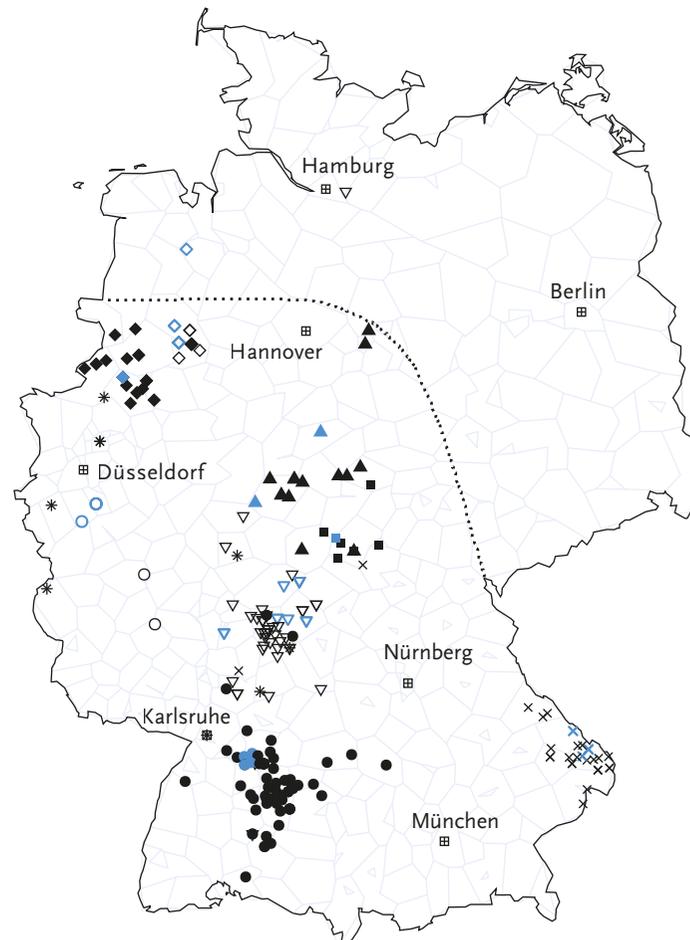
Anstieg der Infektions- und Erkrankungsinzidenz in bestimmten kleinräumigen Regionen führen können.

5. Hantaviren

Nagetiere fungieren als bedeutsame Reservoirwirte und Überträger von verschiedenen Zoonoseerregern aus der Gruppe der Bakterien, Viren und Protozoen, d. h. eukaryotische Einzeller. Zudem sind in Nagetieren auch eine Vielzahl von Viren beschrieben worden, die vermutlich nicht auf den Menschen übertragen und als Nagetier-spezifisch angesehen werden. Im Weiteren soll als epidemiologisch bedeutendste Nagetier-assoziierte Erregergruppe auf Hantaviren eingegangen werden, da hierzu in den vergangenen Jahren ein deutlicher Wissenszuwachs zu den ökologischen Hintergründen der Erkrankungen verzeichnet worden ist. In Deutschland kommen mindestens neun verschiedene Hantaviren vor; die meisten humanen Erkrankungen werden in Deutschland durch das Puumala-Orthohantavirus (PUUV) verursacht. Obwohl der Reservoirwirt des PUUV, die Rötelmaus (*Clethrionomys glareolus*) deutschlandweit vorkommt, sind PUUV-Infektionen nur bei Rötelmäusen im südlichen, westlichen und nordwestlichen Teil Deutschlands nachgewiesen worden. Umfangreiche Untersuchungen haben zur Postulierung einer nördlichen und östlichen Verbreitungsgrenze des PUUV in der Rötelmaus geführt (Abbildung 4) [108]. Das Dobrava-Belgrad-Orthohantavirus (DOBV), Genotyp Kurkino, kommt dagegen ausschließlich im östlichen Teil Deutschlands vor. Diese Verbreitung wird durch das auf den Osten Deutschlands begrenzte Vorkommen des Reservoirs, der Brandmaus (*Apodemus agrarius*) verursacht. Infektionen der deutschlandweit verbreiteten

Abbildung 4
Verteilung von Puumala-Orthohantavirus-Sequenzen in Deutschland. Die Symbole entsprechen den Sequenzen aus **Abbildung 6** und zeigen Infektionen aus bekannten Endemiegebieten in Deutschland. Mehrere Sequenzen vom gleichen Ort wurden einmal dargestellt.

Vom Menschen stammende Sequenzen wurden in schwarz gekennzeichnet, solche von Rötelmäusen in blau. Die gepunktete Linie stellt die hypothetische Verbreitungsgrenze von PUUV-positiven Rötelmäusen dar.
Quelle: Eigene Darstellung nach Drewes et al. [108] and Weiss et al. [114 (CC BY 4.0)]



PUUV = Puumala-Orthohantavirus

Gelbhalsmaus (*A. flavicollis*) wurden nur im Verbreitungsbereich der Brandmaus gefunden. Obgleich auch in der Gelbhalsmaus DOBV molekular nachgewiesen und ein DOBV-Stamm isoliert werden konnte, ist unklar, inwieweit die Gelbhalsmaus das Virus auch auf den Menschen übertragen kann [109, 110]. Das Tula-Orthohantavirus (TULV)

kommt deutschlandweit in der Feldmaus (*Microtus arvalis*) vor, ist bislang aber nur selten mit humanen Infektionen und Erkrankungen in Zusammenhang gebracht worden [111, 112]. Das Seoul-Orthohantavirus (SEOV) ist in Rattenpopulationen in Teilen Asiens endemisch und wurde wiederholt auch in Zuchtratten in Europa und den Vereinigten Staaten nachgewiesen; in Deutschland kamen bisher vereinzelte Infektionen im Zusammenhang mit Auslandsreisen oder nach Kontakt zu Heimratten vor [113]. Daneben wurden fünf weitere Hantaviren in Deutschland beschrieben, deren Humanpathogenität bisher ungeklärt ist.

Bei der Hantavirus-Erkrankung beim Menschen handelt es sich um eine klassische Zoonose. Zur Infektion kommt es durch Einatmen von Staub, der mit Speichel, Kot oder Urin infizierter Tiere kontaminiert ist, durch den Kontakt von verletzter Haut mit kontaminierten Materialien oder selten durch Bisse. Auch eine Infektion durch Aufnahme kontaminierter Lebensmittel ist möglich. Ein großer Teil der Hantavirus-Infektionen verläuft asymptomatisch bzw. mit unspezifischen Symptomen, so dass häufig keine diagnostische Abklärung veranlasst wird und eine hohe Dunkelziffer anzunehmen ist. Symptomatische Infektionen mit den in Deutschland für den Menschen relevanten Virusarten (PUUV, DOBV-Kurkino) präsentieren sich in der Regel als eine grippeähnliche Erkrankung mit Fieber, kolikartigen, oft einseitigen Flankenschmerzen, Übelkeit und Durchfall, Kopfschmerzen und Nackensteifigkeit, Sehstörungen (Myopie, Fotophobie) und konjunktivalen Einblutungen [115]. In Deutschland sind hauptsächlich Erwachsene zwischen 20 und 60 Jahren und Kinder nur äußerst selten betroffen. Männer sind in allen Altersgruppen deutlich überrepräsentiert [116]. Es ist wahrscheinlich, dass

Alter und Geschlecht einen signifikanten Einfluss auf die Empfänglichkeit für die Infektion sowie auf die Schwere der Erkrankung haben. Expositions-faktoren scheinen allenfalls eine untergeordnete Rolle zu spielen. Symptomatische Hantavirus-Infektionen mit Labornachweis sind nach IfSG seit 2001 meldepflichtig. Von den Gesundheitsämtern werden Daten der gemeldeten Fälle anonymisiert elektronisch an das jeweilige Landesgesundheitsamt und von dort an das RKI übermittelt.

Die Epidemiologie der Hantavirus-Erkrankung beim Menschen ist geprägt von zyklisch auftretenden Ausbrüchen des PUUV, die sich etwa alle zwei bis drei Jahre vor allem im Süden, Westen und Nordwesten Deutschlands bemerkbar machen [116]. Das im Norden und Osten Deutschlands vorkommende DOBV-Kurkino führt lediglich zu einer geringen Anzahl sporadischer Erkrankungsfälle und soll im Rahmen dieser auf den Klimawandel fokussierten Darstellung nicht näher behandelt werden.

Mit einer mittleren jährlichen Inzidenz von 2,3 je 100.000 Einwohner in Deutschland trugen die sechs größten Ausbruchsjahre 2007, 2010, 2012, 2017, 2019 und 2021 einen Großteil der Gesamtfälle bei, die zwischen 2001 und 2021 in Deutschland gemeldet wurden ($n=11.464$ von 15.823 ; $72,4\%$). In den verbleibenden 15 Jahren war die mittlere jährliche Inzidenz mit $0,35$ je 100.000 Einwohner deutlich geringer (Abbildung 5). Die Mehrzahl der Fälle ($n=10.988$ von 15.823 ; $69,4\%$) wurde aus Bayern und Baden-Württemberg übermittelt, wo sich bekannte PUUV-Endemiegebiete befinden (z. B. Schwäbische Alb, Region Unterfranken, Bayerischer Wald). Die restlichen Bundesländer tragen verhältnismäßig wenige Fälle bei, wobei dortige Endemiegebiete (z. B. die Region Osnabrück oder der Westen Thüringens) in Ausbruchsjahren ebenfalls lokal hohe Inzidenzen verzeichnen. Eine detaillierte molekulare Analyse der PUUV-Ausbrüche bis 2018 sowie gegenwärtige Untersuchungen von Rötelmäusen an der postulierten Verbreitungsgrenze

Abbildung 5
Übermittelte Hantavirus-Erkrankungen nach Melderegion, Erkrankungsjahr und -monat in Deutschland, 2001–2021 ($n=14.786$ Fälle mit bekanntem Erkrankungsdatum). Pfeile kennzeichnen Jahre mit starker Buchenmast ($>40\%$ mittel und stark fruktifizierender Buchen) in Baden-Württemberg [117].
Quelle: Eigene Darstellung

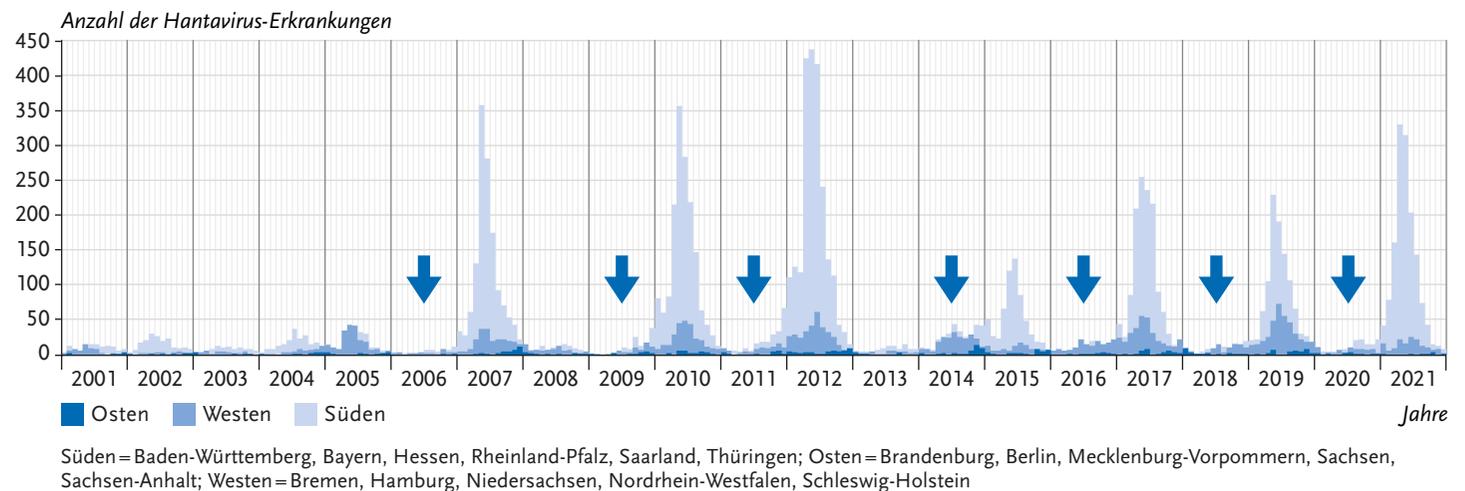
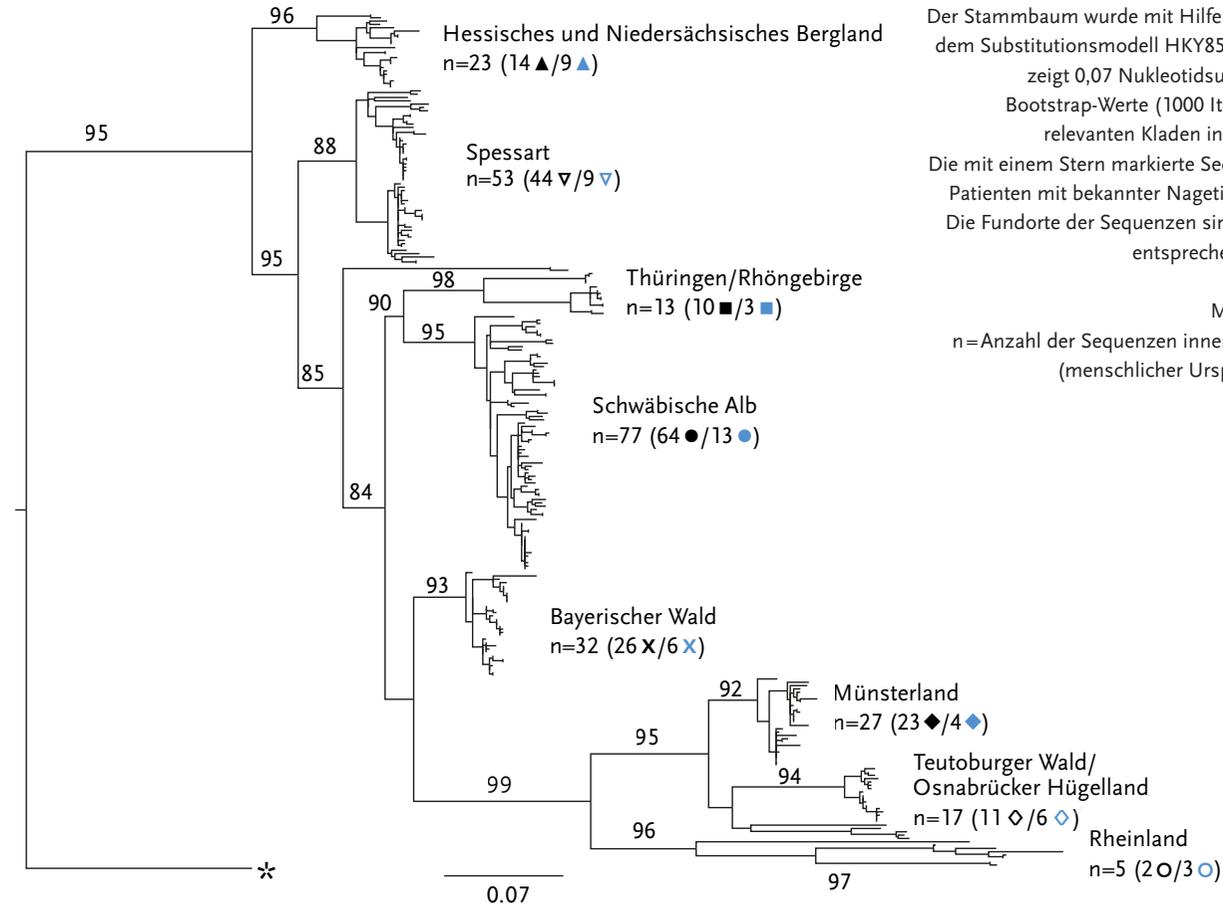


Abbildung 6
Phylogenetische Analyse der S-Segment-
Sequenz des Puumala-Orthohantavirus,
basierend auf einem 504 Nukleotide langen
Alignment von 258 bei GenBank
veröffentlichten Sequenzen

Quelle: Eigene Darstellung nach
 Drewes et al. [108] and
 Weiss et al. [114] (CC BY 4.0)



des PUUV zeigen eine über lange Zeiträume getrennte evolutionäre Entwicklung der für das jeweilige Endemiegebiet spezifischen Viren ([Abbildung 6](#)). Dies deutet darauf hin, dass die räumliche Ausdehnung der verschiedenen Endemiegebiete stabil ist.

Die Hantavirus-Erkrankung weist eine deutliche Saisonalität auf, wobei die höchsten Erkrankungszahlen im Frühjahr und Sommer zu verzeichnen sind ([Abbildung 5](#)). Ein

Wiederanstieg der Fallzahlen im Herbst und Winter scheint auf ein bevorstehendes Ausbruchsjahr hinzuweisen. Trotzdem muss auch bei Erkrankungsfällen außerhalb dieser Hauptsaison an Hantavirus-Erkrankungen gedacht werden; so wurde über eine Häufung von Erkrankungsfällen in einem Betrieb in Niedersachsen im Dezember 2017 berichtet [118].

Das Vorkommen von Erkrankungen mit dem PUUV in der Bevölkerung ist eng verknüpft mit dem Vorkommen

und der Abundanz von Rötelmäusen [119]. Eine hohe Populationsdichte von Rötelmäusen steigert die Transmissionsrate innerhalb der Rötelmauspopulation, was dort zu höheren PUUV-Prävalenzen führt [120, 121]. Ein Anstieg der Population infizierter Reserviertiere erhöht die Menge virushaltiger Exkrememente in der Umwelt und die Wahrscheinlichkeit, dass Menschen mit diesen in Kontakt kommen. Dies wiederum kann zu einer erhöhten Ansteckungsrate beim Menschen führen. Für die Betrachtung des Einflusses des Klimawandels auf das künftige Vorkommen von PUUV-Erkrankungen ist es daher von entscheidender Bedeutung, die zukünftige Entwicklung von Rötelmauspopulationen zu prognostizieren. Diese hängt wiederum stark von der Entwicklung der Wälder, insbesondere derjenigen mit Buchenbestand, ab.

Die Abundanz von Rötelmäusen unterliegt zyklischen Schwankungen. Massenvermehrungen werden ausgelöst durch Mastjahre, d. h. Jahre, in denen es zu einer deutlich überdurchschnittlichen Fruchtbildung bei den Nahrungspflanzen der Rötelmaus kommt, in diesem Fall hauptsächlich Buchen (*Fagus sylvatica*). Massenvermehrungen von Rötelmäusen treten regelmäßig in auf Mastjahren folgenden Jahren auf [119, 121].

Die Frequenz, mit der Mastjahre auftreten, ist klimabhängig. Es gibt Anzeichen dafür, dass der Klimawandel die Frequenz von Mastjahren in den letzten hundert Jahren gesteigert hat [122, 123]. Demzufolge hat auch die Häufigkeit von Jahren mit Massenvermehrungen von Rötelmäusen zugenommen, so dass sich mittlerweile alle zwei bis drei Jahre Mastjahre mit darauffolgenden Massenvermehrungen von Rötelmäusen ereignen (Abbildung 5). Die Frequenzsteigerung von Mastjahren ist allerdings dadurch

limitiert, dass ein Baum nicht in zwei aufeinander folgenden Jahren eine Mast hervorbringen kann. Die Mast stellt eine hohe physiologische Belastung dar, was sich auch in einem verringerten Dickenwachstum der Bäume in Mastjahren zeigt [124]. Es ist allerdings möglich, dass der Klimawandel die räumliche Synchronität von Mastereignissen auflöst. Dies hätte zur Folge, dass die massenhafte Fruchtbildung bei Buchen räumlich heterogen auftritt [125, 126]. Beobachtungen zu derartigen asynchronen Mastereignissen und ihr Effekt auf Rötelmauspopulationen liegen bereits vor und lassen den Schluss zu, dass möglicherweise zukünftig Ausbrüche eher auf lokaler Ebene und nicht mehr überregional oder bundesweit stattfinden werden [127]. Es gibt weiterhin Hinweise darauf, dass die Übertragung von PUUV innerhalb von Rötelmauspopulationen unabhängig von deren Größe und Dichte, zumindest in Nordeuropa, durch warme, feuchte Winter begünstigt wird. Das Klima kann also auch einen direkten Einfluss auf die Überlebensfähigkeit des PUUV in der Umwelt haben [128]. In Deutschland wird der Klimawandel allerdings die Waldbestände voraussichtlich eher durch zunehmende Trockenheit beeinflussen. Ausgehend von Beobachtungen der Dürrejahre 2018 bis 2020 lässt sich prognostizieren, dass mehr als 30 % der Waldstandorte mit der führenden Baumart Buche als wichtiger Nahrungsquelle für Rötelmäuse gefährdet sind [129]. In Dürrejahren werfen Buchen ihre verkümmerten Bucheckern trotz zuvor erfolgter guter Fruchtanlage vorzeitig ab, so dass sie kaum als Nahrung für Rötelmäuse zur Verfügung stehen [130]. Weiterhin kann als wahrscheinlich betrachtet werden, dass Extremwetterereignisse wie Stürme oder Starkregen neben Waldbränden als Dürrefolge Auswirkungen auf das Vorkommen von Rötelmäusen

Der mögliche Einfluss des Klimawandels auf humane Erkrankungen durch das Puumala-Orthohantavirus ist nicht abschließend geklärt.

und PUUV haben werden. Welche Folgen all diese Phänomene auf die Rötelmauspopulationen und damit schlussendlich auf die weitere Entwicklung der Zahl der PUUV-Erkrankungen haben werden, ist zurzeit noch nicht ausreichend geklärt und muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Aufgrund der oben dargestellten natürlichen Begrenzung der Frequenz der Mastjahre als auch der zu erwartenden negativen Klimawirkungen auf Wachstum und Verbreitung der Buche ist jedoch, bei jetzigem Kenntnisstand, mit einer starken Zunahme der Inzidenz der Hantavirus-Erkrankung in Deutschland im Zusammenhang mit den Wirkungen des Klimawandels nicht zu rechnen.

6. Handlungsempfehlungen

6.1 Allgemeine Handlungsempfehlungen

Zum Schutz der Bevölkerung vor Vektor- und Nagetier-assoziierten Krankheiten in Deutschland können folgende allgemein gültige Handlungsempfehlungen gegeben werden:

- (1) Stärkung der Wissenschafts- und Forschungskapazitäten zu Klimawandel und Gesundheit, um eine genauere Einschätzung der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten geben zu können
- (2) Erhalt oder Stärkung der ressortübergreifenden One-Health-basierten Zusammenarbeit in den Sektoren Gesundheit, Umwelt und Tiergesundheit, um eine effektivere interdisziplinäre Zusammenarbeit für Infektionsprävention zu gewährleisten
- (3) Ausbau des Monitorings von Vektor- und Nagetier-übertragbaren Infektionserregern in Mensch und Tier

- (4) Gezielte Informationskampagnen zum Infektionsrisiko und zu Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung

- (5) Erarbeitung von Kommunikationsstrategien für die Ärzteschaft

- (6) Weiterbildung (a) von Fachpersonal mit Bezug zur Verhaltensprävention und Gesundheitsförderung in human- und veterinärmedizinischen Praxen oder Einrichtungen des öffentlichen Gesundheitsdienstes (ÖGD); (b) von Angestellten in Schädlingsbekämpfungsunternehmen; (c) von in der Natur arbeitenden Fachkräften, z. B. in forstlichen Einrichtungen, mit erhöhtem Infektionsrisiko und (d) von Fachkräften für Arbeitsschutz für diese Berufsgruppen

6.2 Gezielte Handlungsempfehlungen

Ergänzt werden die allgemeingültigen Handlungsempfehlungen durch folgende gezielte Empfehlungen für Deutschland:

Mit Stechmücken assoziierte Infektionskrankheiten

- (1) Förderung der Entwicklung lokaler Response-Pläne für WNV sowie das Auftreten neuer vektorkompetenter Stechmückenarten (z. B. *Ae. albopictus*)
- (2) Informationskampagnen für die Öffentlichkeit zur Vermeidung von Reproduktionsstätten für Stechmücken und der Ausbreitung neuer Stechmückenarten
- (3) Berücksichtigung von Präventionsmaßnahmen, wie Brutstätten-Sanierung und Brutstätten-Vermeidung, bei der Planung von klimaresilienten Städten
- (4) Sensibilisierung des ÖGD bei gemeldeten Fällen (Infobox 1)

Es bedarf weiterer Forschung, um den Einfluss des Klimawandels auf zoonotische Krankheitserreger sowie deren Reservoir und Vektoren besser zu verstehen. Daraus können Präventionsstrategien entwickelt werden.

Mit Schildzecken assoziierte Infektionskrankheiten

- (1) Absicherung korrekter Zeckenbestimmung als Basis für richtiges Erkennen von Zusammenhängen
- (2) Vernetzung von Untersuchungen zu Zecken- und Nagetier-assoziierten Erregern

Infobox 1: Empfehlungen für den Öffentlichen Gesundheitsdienst (ÖGD) mit Bezug auf DENV-, CHIKV- und ZIKV-Infektionen

Lokale Gesundheitsämter sollten bei gemeldeten Fällen von mutmaßlich virämischen DENV-, CHIKV- und ZIKV-Infektionen in Gebieten mit *Ae. albopictus* saisonal auf die Gefahr von Weiterübertragungen hinweisen und für nicht-reiseassoziierte Folgefälle wachsam sein [131]. Ärztinnen und Ärzte in entsprechenden Gebieten sollten saisonal bei Häufungen von Erkrankungen mit Fieber und/oder Hautausschlag auch an diese in Deutschland nicht-endemischen Erreger denken und ggf. eine entsprechende Diagnostik veranlassen.

Infobox 2: Empfehlungen für den ÖGD mit Bezug auf Zecken-assoziierte Krankheiten

Die Gesundheitsbehörden sollten weiterhin präventive Aufklärung zur Vermeidung von Zeckenstichen und der sofortigen Entfernung von Zecken betreiben. Darüber hinaus sollte die Bevölkerung auch über klinische Manifestationen, z. B. Erythema migrans, informiert werden, um frühzeitig eine ärztliche Praxis aufsuchen zu können und eine frühzeitige Diagnose und Behandlung sicherzustellen, die schwereren Krankheitsverläufen vorbeugen kann. Ein Schwerpunkt dieser Kommunikationsanstrengungen könnte bei bestimmten Gruppen mit erhöhtem Zeckenstich-Risiko liegen, z. B. bei Personen, die im Wald oder in öffentlichen Einrichtungen am Waldrand oder im Wald arbeiten (z. B. Waldkindergärten, Kinder- und Jugendfreizeiten), Mitgliedern bei den Pfadfindern, der GeoCaching-Szene, Personen, die Pilze sammeln, oder Imkerinnen und Imkern.

(3) Erarbeitung von wirksamen und nachhaltigen Mitteln, Verfahren und Strategien zum Schutz vor Schildzeckenbefall und Erregerübertragung (u. a. Impfstoffentwicklung gegen Zecken, biologische Zeckenbekämpfung, Zeckenfallen, wirksame Repellents)

(4) Förderung und Durchführung von weiteren bevölkerungsrepräsentativen Surveys zur Prävalenz von *B. burgdorferi*-spezifischen Antikörpern, um einen möglichen Anstieg (evtl. auch bedingt durch klimatische Faktoren) erkennen zu können

(5) Förderung und Durchführung von Studien zur Häufigkeit und Trends von Erythema migrans in ausgewählten geografischen Regionen

(6) Präventionsmaßnahmen und Information durch den ÖGD (Infobox 2)

(7) Aufklären der Bevölkerung und der Ärzteschaft zu Lyme-Borreliose (Infobox 3)

Hantaviren

(1) Verstärkte Verbreitung von Information zu Hantavirus-Infektionen für die Bevölkerung in betroffenen Gebieten, z. B. anhand des Merkblatts „Wie vermeide ich Hantavirus-Infektionen?“ [132]

(2) Saisonale und gezielte Kommunikation zum Risiko durch Hantavirus-Infektionen (Infobox 4)

(3) Kontinuierliche Surveillance von Hantavirus-Infektionen beim Menschen und Monitoring von Trends im Tierreservoir

(4) Vernetzung von Untersuchungen zu verschiedenen Nagetier- und Vektor-assoziierten Zoonoseerregern

(5) Weiterentwicklung von Hantavirus-Prognosemodellen und feinauflösenden Risikokarten

Infobox 3: Benötigte Kommunikationsstrategien für Lyme-Borreliose

Zu Symptomen und Diagnosehäufigkeit von Lyme-Borreliose existieren in Teilen der Bevölkerung fehlerhafte Vorstellungen, die seit längerer Zeit über soziale Netzwerke und Blogging-Dienste verbreitet werden. Hinzu kommt, dass Personen fälschlicherweise mit Lyme-Borreliose diagnostiziert werden und längerem Leidensdruck ausgesetzt sind bis sie eine korrekte Diagnose und Therapie erhalten. Zu den Folgen gehören neben der Einleitung unwirksamer Therapien wie Antibiotikabehandlungen unnötige Belastungen des Gesundheitswesens und verunsicherte und unzufriedene Patientinnen und Patienten. Kommunikationsstrategien sollten die Bevölkerung über die Krankheit, korrekte Diagnosemöglichkeiten und mögliche Differentialdiagnosen der Lyme-Borreliose aufklären.

Infobox 4: Kommunikation zur Gefährdung der Bevölkerung durch Hantavirus-Infektionen

Die Aufklärung der Bevölkerung zur Gefährdung durch Hantavirus-Infektionen und entsprechende Präventionsmaßnahmen sollte saisonal und unter Verwendung ausgewählter Kommunikationsstrategien erfolgen. Neben einer direkten Information der Allgemeinbevölkerung sollten auch Multiplikatoren eingebunden werden, die gezielt besonders gefährdete Personengruppen informieren, z. B. Waldarbeiterinnen und Waldarbeiter, Personen in der Schädlingsbekämpfung. Während für PUUV in dessen Verbreitungsgebiet entsprechende Vorhersagen möglich sind, ist das für DOBV wegen des sporadischen Auftretens bisher nicht der Fall. Hier sollte deshalb eine allgemeine Information im Verbreitungsgebiet dieses Virus (östlicher Teil Deutschlands) erfolgen. Der erstmalige Nachweis von durch Heimratten verursachten Hantavirus-Infektionen (Seoul-Orthohantavirus) hat verdeutlicht, dass einerseits Halterinnen und Halter, andererseits Verkäuferinnen und Verkäufer von Heimratten über dieses Risiko informiert werden müssen; wünschenswert wäre eine verpflichtende Untersuchung von Heimratten auf diesen und andere Erreger.

(6) Förderung und Durchführung von Studien zur Synchronität bzw. zunehmenden Asynchronität von Massenvermehrungen der Rötelmaus

7. Fazit

Höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und das Verhalten der Menschen können die Epidemiologie von Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionskrankheiten in Deutschland beeinflussen. Die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf die Ausbreitung der Vektor- und Nagetier-assoziierten Infektionskrankheiten müssen im Detail weiter untersucht und bei Klimaanpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

Korrespondenzadresse

Dr. Hendrik Wilking
Robert Koch-Institut
Abteilung für Infektionsepidemiologie
Seestraße 10
13353 Berlin
E-Mail: WilkingH@rki.de

Zitierweise

Beermann S, Dobler G, Faber M, Frank C, Habedank B et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. J Health Monit 8(S3):36–66. DOI 10.25646/11392

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Sandra Beermann gibt an, seit Juni 2022 an das Bundesministerium für Gesundheit abgeordnet zu sein. Die anderen Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Beiträge der Autorinnen und Autoren

Alle Autorinnen und Autoren haben vergleichbare Beiträge geleistet und sind nach alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Koordinierung und Redaktion des Gesamtmanuskripts, Ausarbeitung der Einleitung und des Abstracts:

Beermann S, Wilking H

Ausarbeitung Abschnitt 3 – Mit Stechmücken assoziierte Infektionskrankheiten: Frank C, Kampen H, Kuhn C, Schmidt-Chanasit J

Ausarbeitung Abschnitt 4 – Mit Schildzecken assoziierte Infektionskrankheiten: Dobler G, Habedank B, Hagedorn P, Nygren TM, Stark K, Wilking H

Ausarbeitung Abschnitt 5 – Hantaviren: Faber M, Schmolz E, Ulrich RG, Weiss S

Danksagung

Die Autorin und Autoren des Abschnitts 5 danken Herrn Stephan Drewes für die Hilfe bei der Erstellung der Abbildungen 4 und 6.

Das RKI-Koordinationssteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Bruce-Chwatt L, de Zulueta J (1980) The rise and fall of malaria in Europe: A historico-epidemiological study. Oxford University Press, Oxford
2. Kuhlisch C (2022) Discovery of *Aedes (Ochlerotatus) pionips* Dyar, 1919 (Diptera, Culicidae) in Germany. Check List 18:897–906
3. Pernat N, Kampen H, Jeschke JM et al. (2021) Citizen science versus professional data collection: Comparison of approaches to mosquito monitoring in Germany. J Appl Ecol 58:214–223
4. Walther D, Kampen H (2017) The citizen science project 'Mueckenatlas' helps monitor the distribution and spread of invasive mosquito species in Germany. J Med Entomol 54(6):1790–1794
5. Reisen WK (1989) Estimation of vectorial capacity: Introduction/relationship to disease transmission by malaria and arbovirus vectors. Bull Soc Vector Ecol 14(2):39–40, 67–70
6. Kampen H, Kuhlisch C, Frohlich A et al. (2016) Occurrence and spread of the invasive Asian bush mosquito *Aedes japonicus japonicus* (Diptera: Culicidae) in West and North Germany since detection in 2012 and 2013, respectively. PLoS One 11(12):e0167948
7. Ratte HT (1984) Temperature and insect development. In: Hoffmann KH (Hrsg) Environmental physiology and biochemistry of insects. Springer, Berlin; Heidelberg, S. 33–66
8. Mellor PS, Leake CJ (2000) Climatic and geographic influences on arboviral infections and vectors. Rev Sci Tech 19(1):41–54

9. Kamiya T, Greischar MA, Wadhawan K et al. (2019) Temperature-dependent variation in the extrinsic incubation period elevates the risk of vector-borne disease emergence. *Epidemics* 30:100382
10. Jansen S, Cadar D, Lühken R et al. (2021) Vector competence of the invasive mosquito species *Aedes koreicus* for arboviruses and interference with a novel insect specific virus. *Viruses* 13(12):2507
11. Jansen S, Heitmann A, Lühken R et al. (2018) Experimental transmission of Zika virus by *Aedes japonicus japonicus* from southwestern Germany. *Emerg Microbes Infect* 7(1):192
12. Jansen S, Heitmann A, Lühken R et al. (2019) *Culex torrentium*: A potent vector for the transmission of West Nile virus in Central Europe. *Viruses* 11(6):492
13. Ziegler U, Lühken R, Keller M et al. (2019) West Nile virus epizootic in Germany, 2018. *Antiviral Res* 162:39–43
14. Kampen H, Holicki CM, Ziegler U et al. (2020) West Nile virus mosquito vectors (Diptera: Culicidae) in Germany. *Viruses* 12(5):493
15. Komar N, Langevin S, Hinten S et al. (2003) Experimental infection of North American birds with the New York 1999 strain of West Nile virus. *Emerg Infect Dis* 9(3):311–322
16. Hubálek Z, Halouzka J (1999) West Nile fever – A reemerging mosquito-borne viral disease in Europe. *Emerg Infect Dis* 5(5):643–650
17. Young JJ, Haussig JM, Aberle SW et al. (2021) Epidemiology of human West Nile virus infections in the European Union and European Union enlargement countries, 2010 to 2018. *Euro Surveill* 26(19):2001095
18. Brugman VA, Hernandez-Triana LM, Medlock JM et al. (2018) The role of *Culex pipiens* L. (Diptera: Culicidae) in virus transmission in Europe. *Int J Env Res Public Health* 15(2):389
19. Kampen H, Tews BA, Werner D (2021) First evidence of West Nile virus overwintering in mosquitoes in Germany. *Viruses* 13(12):2463
20. Werner D, Kowalczyk S, Kampen H (2020) Nine years of mosquito monitoring in Germany, 2011–2019, with an updated inventory of German culicid species. *Parasitol Res* 119(9):2765–2774
21. Lowe S, Browne M, Boudjelas S et al. (2000) 100 of the world's worst invasive alien species: A selection from the Global Invasive Species Database. The Invasive Species Specialist Group, a specialist group of the Species Survival Commission of the World Conservation Union, New Zealand. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2000-126.pdf> (Stand: 20.12.2022)
22. Cancrini G, Di Frangipane Regalbono A, Ricci I et al. (2003) *Aedes albopictus* is a natural vector of *Dirofilaria immitis* in Italy. *Vet Parasitol* 118(3–4):195–202
23. Paupy C, Delatte H, Bagny L et al. (2009) *Aedes albopictus*, an arbovirus vector: From the darkness to the light. *Microbes Infect* 11(14–15):1177–1185
24. Rezza G (2014) Dengue and chikungunya: Long-distance spread and outbreaks in naive areas. *Pathog Glob Health* 108(8):349–355
25. Becker N, Geier M, Balczun C et al. (2013) Repeated introduction of *Aedes albopictus* into Germany, July to October 2012. *Parasitol Res* 112(4):1787–1790
26. Reiter P (1998) *Aedes albopictus* and the world trade in used tires, 1988–1995: The shape of things to come? *J Am Mosq Control Assoc* 14(1):83–94
27. Walther D, Scheuch DE, Kampen H (2017) The invasive Asian tiger mosquito *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Germany: Local reproduction and overwintering. *Acta Trop* 166:186–192
28. Nationale Expertenkommission "Stechmücken als Überträger von Krankheitserregern" am Friedrich-Loeffler-Institut (2022) Vorkommen der Asiatischen Tigermücke *Aedes albopictus* in Deutschland. <https://www.fli.de/de/kommissionen/nationale-expertenkommission-stechmuecken-als-uebertraeger-von-krankheitserregern> (Stand: 15.12.2022)
29. Becker N, Schön S, Klein AM et al. (2017) First mass development of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) – Its surveillance and control in Germany. *Parasitol Res* 116(3):847–858
30. Kobayashi M, Nihei N, Kurihara T (2002) Analysis of northern distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Japan by geographical information system. *Journal of Med Entomol* 39(1):4–11

31. Waldock J, Chandra NL, Lelieveld J et al. (2013) The role of environmental variables on *Aedes albopictus* biology and chikungunya epidemiology. *Pathog Glob Health* 107(5):224–241
32. Tippelt L, Werner D, Kampen H (2019) Tolerance of three *Aedes albopictus* strains (Diptera: Culicidae) from different geographical origins towards winter temperatures under field conditions in northern Germany. *PLoS One* 14(7):e0219553
33. Tippelt L, Werner D, Kampen H (2020) Low temperature tolerance of three *Aedes albopictus* strains (Diptera: Culicidae) under constant and fluctuating temperature scenarios. *Parasit Vectors* 13(1):587
34. Fischer D, Thomas SM, Neteler M et al. (2014) Climatic suitability of *Aedes albopictus* in Europe referring to climate change projections: Comparison of mechanistic and correlative niche modelling approaches. *Euro Surveill* 19(6):20696
35. Thomas SM, Tjaden NB, Frank C et al. (2018) Areas with high hazard potential for autochthonous transmission of *Aedes albopictus*-associated arboviruses in Germany. *Int J Env Res Public Health* 15(6):1270
36. Cunze S, Kochmann J, Koch LK et al. (2016) *Aedes albopictus* and its environmental limits in Europe. *PLoS One* 11(9):e0162116
37. Kampen H, Walther D (2018) Vector potential of mosquito species occurring in central Europe: Mosquito-borne diseases. In: Benelli G, Mehlhorn H (Hrsg) *Parasitology Research Monographs*, Vol 10, Springer, Cham, S. 41–68
38. Koban MB, Kampen H, Scheuch DE et al. (2019) The Asian bush mosquito *Aedes japonicus japonicus* (Diptera: Culicidae) in Europe, 17 years after its first detection, with a focus on monitoring methods. *Parasit Vectors* 12(1):109
39. Pfitzner WP, Lehner A, Hoffmann D et al. (2018) First record and morphological characterization of an established population of *Aedes (Hulecoeteomyia) koreicus* (Diptera: Culicidae) in Germany. *Parasit Vectors* 11(1):662
40. Tsai TF, Popovici F, Cernescu C et al. (1998) West Nile encephalitis epidemic in southeastern Romania. *Lancet* 352(9130):767–771
41. May FJ, Davis CT, Tesh RB et al. (2011) Phylogeography of West Nile virus: From the cradle of evolution in Africa to Eurasia, Australia, and the Americas. *J Virol* 85(6):2964–2974
42. European Centre for Disease Prevention and Control (2019) West Nile virus infection. In: ECDC (Hrsg) *Annual epidemiological report for 2018*. ECDC, Stockholm. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/west-nile-virus-infection-annual-epidemiological-report-2018> (Stand: 20.12.2022)
43. Frank C, Schmidt-Chanasit J, Ziegler U (2022) West Nile virus in Germany: An emerging infection and its relevance for transfusion safety. *Transfus Med Hemother* 49:192–203
44. Petersen LR, Brault AC, Nasci RS (2013) West Nile virus: Review of the literature. *JAMA* 310(3):308–315
45. Offergeld R, Schmidt-Chanasit J, Frank C (2022) West Nil-Virus in Deutschland – Relevanz für die Transfusionsicherheit. *Hämotherapie* 38:23–33
46. Lorenz C, Azevedo TSd, Chiaravalloti-Neto F (2022) Impact of climate change on West Nile virus distribution in South America. *Tran R Soc Trop Med Hyg* 116(11):1043–1053
47. Caputo B, Russo G, Manica M et al. (2020) A comparative analysis of the 2007 and 2017 Italian chikungunya outbreaks and implication for public health response. *PLoS Negl Trop Dis* 14(6):e0008159
48. Giron S, Franke F, Decoppet A et al. (2019) Vector-borne transmission of Zika virus in Europe, southern France, August 2019. *Euro Surveill* 24(45):1900655
49. Schmidt-Chanasit J, Haditsch M, Schoneberg I et al. (2010) Dengue virus infection in a traveller returning from Croatia to Germany. *Euro Surveill* 15(40):19677
50. Heitmann A, Jansen S, Lühken R et al. (2018) Experimental risk assessment for chikungunya virus transmission based on vector competence, distribution and temperature suitability in Europe, 2018. *Euro Surveill* 23(29):1800033
51. Heitmann A, Jansen S, Lühken R et al. (2017) Experimental transmission of Zika virus by mosquitoes from central Europe. *Euro Surveill* 22(2):30437
52. Mercier A, Obadia T, Carraretto D et al. (2022) Impact of temperature on dengue and chikungunya transmission by the mosquito *Aedes albopictus*. *Sci Rep* 12(1):6973
53. Cochet A, Calba C, Jourdain F et al. (2022) Autochthonous dengue in mainland France, 2022: Geographical extension and incidence increase. *Euro Surveill* 27(44):2200818

54. Petney T, Moser E, Littwin N et al. (2015) Additions to the 'Annotated Checklist of the Ticks of Germany': *Ixodes acuminatus* and *Ixodes inopinatus*. *Exp Appl Acarol* 20:221–224
55. Petney T, Pfäffle M, Skuballa J (2012) An annotated checklist of the ticks (Acari: Ixodida) of Germany. *Syst Appl Acarol* 17:115–170
56. Facht K, Lindau A, Mackenstedt U (2022) Ungebetenes Souvenir – der Hund als Transportmittel für *Rhipicephalus sanguineus* s.l. In: 6. Süddeutscher Zeckenkongress 28. – 30. März 2022, Hohenheim, S. 39. <https://zeckenkongress.de/wp-content/uploads/2022/03/tagungsband2.pdf> (Stand: 20.12.2022)
57. Hoffmann G (1981) Die Braune Hundezecke (*Rhipicephalus sanguineus* L.) in Berlin (West). Epizootiologische Untersuchungen unter Einschaltung von Massenmedien. *Bundesgesundheitsbl* 24(3):41–50
58. Chitimia-Dobler L, Schaper S, Rieß R et al. (2019) Imported *Hyalomma* ticks in Germany in 2018. *Parasit Vectors* 12(1):134
59. Hagedorn D (2019) Fund von Zecken der Gattung *Hyalomma* in Deutschland. *Epid Bull* 7:70–71
60. Lindau A, Drehmann M, Springer A et al. (2022) *Hyalomma* in Deutschland - 3 Jahre Citizen Science. In: 6 Süddeutscher Zeckenkongress 28. – 30. März 2022, Hohenheim, S. 36. <https://zeckenkongress.de/wp-content/uploads/2022/03/tagungsband2.pdf> (Stand: 20.12.2022)
61. Grandi G, Chitimia-Dobler L, Choklikitumnuey P et al. (2020) First records of adult *Hyalomma marginatum* and *H. rufipes* ticks (Acari: Ixodidae) in Sweden. *Ticks Tick Borne Dis* 11(3):101403
62. Hansford KM, Carter D, Gillingham EL et al. (2019) *Hyalomma rufipes* on an untraveled horse: Is this the first evidence of *Hyalomma* nymphs successfully moulting in the United Kingdom? *Ticks Tick Borne Dis* 10(3):704–708
63. Uiterwijk M, Ibáñez-Justicia A, van de Vossen B et al. (2021) Imported *Hyalomma* ticks in the Netherlands 2018–2020. *Parasit Vectors* 14(1):244
64. Chitimia-Dobler L, Nava S, Bestehorn M et al. (2016) First detection of *Hyalomma rufipes* in Germany. *Ticks Tick Borne Dis* 7(6):1135–1138
65. Mancuso E, Toma L, Pascucci I et al. (2022) Direct and indirect role of migratory birds in spreading CCHFV and WNV: A multidisciplinary study on three stop-over islands in Italy. *Pathogens* 11(9):1056
66. Portillo A, Palomar AM, Santibáñez P et al. (2021) Epidemiological aspects of Crimean-Congo hemorrhagic fever in Western Europe: What about the future? *Microorganisms* 9(3):649
67. Gray JS, Dautel H, Estrada-Peña A et al. (2009) Effects of climate change on ticks and tick-borne diseases in Europe. *Interdiscip Perspect Infect Dis* 2009:593232
68. Medlock JM, Hansford KM, Bormane A et al. (2013) Driving forces for changes in geographical distribution of *Ixodes ricinus* ticks in Europe. *Parasit Vectors* 6(1):1
69. Kahlenborn W, Porst L, Voß M et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung). Umweltbundesamt (Hrsg) *Climate Change* 26/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_zusammenfassung_bf_211027_o.pdf (Stand: 18.01.2023)
70. Gothe R, Hamel HD (1973) Zur Ökologie eines deutschen Stammes von *Rhipicephalus sanguineus* (Latreille, 1806). *Z Parasitenkd* 41(2):157–172
71. Zahler M, Gothe R (1995) Effect of temperature and humidity on longevity of unfed adults and on oviposition of engorged females of *Dermacentor reticulatus* (Ixodidae). *Appl Parasitol* 36(3):200–211
72. Zahler M, Gothe R (1995) Effect of temperature and humidity on egg hatch, moulting and longevity of larvae and nymphs of *Dermacentor reticulatus* (Ixodidae). *Appl Parasitol* 36(1):53–65
73. Gethmann J, Hoffmann B, Kasbohm E et al. (2020) Research paper on abiotic factors and their influence on *Ixodes ricinus* activity – Observations over a two-year period at several tick collection sites in Germany. *Parasitol Res* 119(5):1455–1466
74. Kahl O, Dautel H, Mackenstedt U et al. (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorkommen, die Aktivität und Verbreitung von als Überträger von Krankheitserregern bedeutenden Schildzecken. Fortführung von Vorhaben FKZ 3711 48 402. Forschungsbericht FB 002708 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Umweltbundesamt

75. Rubel F, Brugger K, Monazahian M et al. (2014) The first German map of georeferenced ixodid tick locations. *Parasit Vectors* 7(1):477
76. Rubel F, Brugger K, Pfeffer M et al. (2016) Geographical distribution of *Dermacentor marginatus* and *Dermacentor reticulatus* in Europe. *Ticks Tick Borne Dis* 7(1):224–233
77. Rubel F, Brugger K, Chitimia-Dobler L et al. (2021) Atlas of ticks (Acari: Argasidae, Ixodidae) in Germany. *Exp Appl Acarol* 84(1):183–214
78. Brugger K, Boehnke D, Petney T et al. (2016) A density map of the tick-borne encephalitis and Lyme borreliosis vector *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) for Germany. *J Med Entomol* 53(6):1292–1302
79. Imholt C, Reil D, Eccard JA et al. (2015) Quantifying the past and future impact of climate on outbreak patterns of bank voles (*Myodes glareolus*). *Pest Manag Sci* 71(2):166–172
80. Reil D, Imholt C, Eccard JA et al. (2015) Beech fructification and bank vole population dynamics – Combined analyses of promoters of human Puumala virus infections in Germany. *PLoS One* 10(7):e0134124
81. Walter M, Brugger K, Rubel F (2016) The ecological niche of *Dermacentor marginatus* in Germany. *Parasitol Res* 115(6):2165–2174
82. Drehmann M, Springer A, Lindau A et al. (2020) The spatial distribution of *Dermacentor* ticks (Ixodidae) in Germany – Evidence of a continuing spread of *Dermacentor reticulatus*. *Front Vet Sci* 7:578220
83. Răileanu C, Tauchmann O, Silaghi C (2022) Sympatric occurrence of *Ixodes ricinus* with *Dermacentor reticulatus* and *Haemaphysalis concinna* and the associated tick-borne pathogens near the German Baltic coast. *Parasit Vectors* 15(1):65
84. Fernández-Ruiz N, Estrada-Peña A (2021) Towards new horizons: Climate trends in Europe increase the environmental suitability for permanent populations of *Hyalomma marginatum* (Ixodidae). *Pathogens* 10(2):95
85. Estrada-Peña A, D'Amico G, Fernández-Ruiz N (2021) Modelling the potential spread of *Hyalomma marginatum* ticks in Europe by migratory birds. *Int J Parasitol* 51(1):1–11
86. Robert Koch-Institut (2022) FSME: Risikogebiete in Deutschland (Stand: Januar 2022). *Epid Bull* 9:3–21
87. Borde JP, Kaier K, Hehn P et al. (2019) Tick-borne encephalitis virus infections in Germany. Seasonality and in-year patterns. A retrospective analysis from 2001–2018. *PLoS One* 14(10):e0224044
88. Hellenbrand W, Kreuzsch T, Bohmer MM et al. (2019) Epidemiology of tick-borne encephalitis (TBE) in Germany, 2001–2018. *Pathogens* 8(2):42
89. Daniel M, Danielova V, Fialova A et al. (2018) Increased relative risk of tick-borne encephalitis in warmer weather. *Front Cell Infect Microbiol* 8:90
90. Elvang A, Melik W, Bertrand Y et al. (2011) Sequencing of a tick-borne encephalitis virus from *Ixodes ricinus* reveals a thermosensitive RNA switch significant for virus propagation in ectothermic arthropods. *Vector Borne Zoonotic Dis* 11(6):649–658
91. Friedsam AM, Brady OJ, Pilic A et al. (2022) Geo-spatial characteristics of 567 places of tick-borne encephalitis infection in southern Germany, 2018–2020. *Microorganisms* 10(3):643
92. Alkische AA, Peterson AT, Samy AM (2017) Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes ricinus*. *PLoS One* 12(12):e0189092
93. Daniel M, Danielová V, Kríz B et al. (2003) Shift of the tick *Ixodes ricinus* and tick-borne encephalitis to higher altitudes in central Europe. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis* 22(5):327–328
94. Kreuzsch TM, Holding M, Hewson R et al. (2019) A probable case of tick-borne encephalitis (TBE) acquired in England, July 2019. *Euro Surveill* 24(47):1900679
95. Nygren TM, Pilic A, Böhmer MM et al. (2022) Tick-borne encephalitis risk increases with dog ownership, frequent walks, and gardening: A case-control study in Germany 2018–2020. *Microorganisms* 10(4):690
96. Nygren TM, Pilic A, Böhmer MM et al. (2022) Tick-borne encephalitis vaccine effectiveness and barriers to vaccination in Germany. *Sci Rep* 12(1):11706
97. Medlock JM, Leach SA (2015) Effect of climate change on vector-borne disease risk in the UK. *Lancet Infect Dis* 15(6):721–730

98. Woudenberg T, Böhm S, Böhmer M et al. (2020) Dynamics of *Borrelia burgdorferi*-specific antibodies: Seroconversion and seroreversion between two population-based, cross-sectional surveys among adults in Germany. *Microorganisms* 8(12):1859
99. Böhm S, Woudenberg T, Böhmer M et al. (eingereicht) Seroprevalence, seroconversion and seroreversion of *Borrelia burgdorferi* specific antibodies using two population-based studies in children and adolescents in Germany (KiGGS), 2003–2006 and 2014–2017
100. Enkelmann J, Böhmer M, Fingerle V et al. (2018) Incidence of notified Lyme borreliosis in Germany, 2013–2017. *Sci Rep* 8(1):14976
101. Wilking H, Stark K (2014) Trends in surveillance data of human Lyme borreliosis from six federal states in eastern Germany, 2009–2012. *Ticks Tick Borne Dis* 5(3):219–224
102. Semenza JC, Rocklöv J, Ebi KL (2022) Climate change and cascading risks from infectious disease. *Infect Dis Ther* 11(4):1371–1390
103. Ogden NH, Bouchard C, Badcock J et al. (2019) What is the real number of Lyme disease cases in Canada? *BMC Public Health* 19(1):849
104. Millins C, Leo W, MacInnes I et al. (2021) Emergence of Lyme disease on treeless islands, Scotland, United Kingdom. *Emerg Infect Dis* 27(2):538–546
105. Couper LI, MacDonald AJ, Mordecai EA (2021) Impact of prior and projected climate change on US Lyme disease incidence. *Glob Chang Biol* 27(4):738–754
106. Dumić I, Severnini E (2018) ‘Ticking Bomb’: The impact of climate change on the incidence of Lyme disease. *Can J Infect Dis Med Microbiol* 2018:5719081
107. Stiasny K, Santonja I, Holzmann H et al. (2021) The regional decline and rise of tick-borne encephalitis incidence do not correlate with Lyme borreliosis, Austria, 2005 to 2018. *Euro Surveill* 26(35):2002108
108. Drewes S, Sheikh Ali H, Sachsenhofer M et al. (2017) Host-associated absence of human Puumala virus infections in Northern and Eastern Germany. *Emerg Infect Dis* 23(1):83–86
109. Schlegel M, Klempa B, Auste B et al. (2009) Dobrava-Belgrade virus spillover infections, Germany. *Emerg Infect Dis* 15(12):2017–2020
110. Hofmann J, Meier M, Enders M et al. (2014) Hantavirus disease in Germany due to infection with Dobrava-Belgrade virus genotype Kurkino. *Clin Microbiol Infect* 20(19):O648–55
111. Hofmann J, Kramer S, Herrlinger KR et al. (2021) Tula virus as causative agent of hantavirus disease in immunocompetent person, Germany. *Emerg Infect Dis* 27(4):1234–1237
112. Schmidt S, Reil D, Jeske K et al. (2021) Spatial and temporal dynamics and molecular evolution of Tula orthohantavirus in German vole populations. *Viruses* 13(6):1132
113. Hofmann J, Heuser E, Weiss S et al. (2020) Autochthonous ratborne Seoul virus infection in woman with acute kidney injury. *Emerg Infect Dis* 26(12):3096–3099
114. Weiss S, Klempa B, Tenner B et al. (2019) Prediction of the spatial origin of Puumala virus infections using L segment sequences derived from a generic screening PCR. *Viruses* 11(8):694
115. Hofmann J, Løyen M, Faber M et al. (2022) Hantavirus-Erkrankungen: Ein Update. *Dtsch Med Wochenschr* 147(6):312–318
116. Faber M, Krüger DH, Auste B et al. (2019) Molecular and epidemiological characteristics of human Puumala and Dobrava-Belgrade hantavirus infections, Germany, 2001 to 2017. *Euro Surveill* 24(32):1800675
117. Meining S, Puhlmann H, Hartmann P et al. (2020) Waldzustandsbericht 2020. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlr/intern/dateien/publikationen/Wald/Waldzustandsbericht_2020.pdf (Stand: 16.12.2022)
118. Princk C, Drewes S, Meyer-Schlinkmann KM et al. (2022) Cluster of human Puumala orthohantavirus infections due to indoor exposure? – An interdisciplinary outbreak investigation. *Zoonoses Public Health* 69(5):579–586
119. Tersago K, Verhagen R, Servais A et al. (2009) Hantavirus disease (Nephropathia epidemica) in Belgium: Effects of tree seed production and climate. *Epidemiol Infect* 137(2):250–256
120. Reil D, Rosenfeld UM, Imholt C et al. (2016) Puumala hantavirus infections in bank vole populations: Host and virus dynamics in Central Europe. *BMC Ecol* 17(1):9

121. Reil D, Imholt C, Drewes S et al. (2016) Environmental conditions in favour of a hantavirus outbreak in 2015 in Germany? *Zoonoses Public Health* 63(2):83–88
122. Övergaard R, Gemmel P, Karlsson M (2007) Effects of weather conditions on mast year frequency in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Sweden. *Forestry* 80(5):555–565
123. Paar U, Guckland A, Dammann I et al. (2011) Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-DerWald* 6/2011:26–29
124. La Bastide JGA, van Vredenburch CLH (1970) Factoren die de zaadproductie van bomen beïnvloeden: Analyse, prognose en consequenties voor de praktijk. Bericht Stichting Bosbouw proefstation, Wageningen.
<https://edepot.wur.nl/269079> (Stand: 20.12.2022)
125. Bogdziewicz M (2022) How will global change affect plant reproduction? A framework for mast seeding trends. *New Phytol* 234(1):14–20
126. Hacket-Pain A, Bogdziewicz M (2021) Climate change and plant reproduction: Trends and drivers of mast seeding change. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 376(1839):20200379
127. Binder F, Drewes S, Imholt C et al. (2020) Heterogeneous Puumala orthohantavirus situation in endemic regions in Germany in summer 2019. *Transbound Emerg Dis* 67(2):502–509
128. Sipari S, Khalil H, Magnusson M et al. (2022) Climate change accelerates winter transmission of a zoonotic pathogen. *Ambio* 51(3):508–517
129. Bolte A, Höhl M, Hennig P et al. (2021) Zukunftsaufgabe Waldanpassung. *AFZ-DerWald* 4/2021:12–16
130. Nussbaumer A, Meusburger K, Schmitt M et al. (2020) Extreme summer heat and drought lead to early fruit abortion in European beech. *Sci Rep* 10(1):5334
131. Nationale Expertenkommission "Stechmücken als Überträger von Krankheitserregern" am Friedrich-Loeffler-Institut (2022) Integriertes Management von vektorkompetenten Stechmücken in Deutschland unter Berücksichtigung der Anwendung von Adultiziden.
https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00049699/Handlungsempfehlung_Management_inkl_Anwendung_Adultizide_o8-11-2022_bf.pdf (Stand: 16.12.2022)
132. Robert Koch-Institut (2019) Information zur Vermeidung von Hantavirus-Infektionen. Robert Koch-Institut.
https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/H/Hantavirus/Merkblatt_PDF.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 08.12.2022)

Impressum

Journal of Health Monitoring

www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11394

Robert Koch-Institut, Berlin

Susann Dupke¹, Udo Buchholz²,
Jutta Fastner³, Christina Förster⁴,
Christina Frank², Astrid Lewin⁵,
Volker Rickerts⁵, Hans-Christoph Selinka⁶

¹ Robert Koch-Institut, Berlin
Zentrum für Biologische Gefahren und
Spezielle Pathogene

² Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionsepidemiologie

³ Umweltbundesamt, Berlin
Abteilung Trinkwasser- und
Badebeckenwasserhygiene

⁴ Umweltbundesamt, Bad Elster
Abteilung Trinkwasser- und
Badebeckenwasserhygiene

⁵ Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionskrankheiten

⁶ Umweltbundesamt, Berlin
Abteilung Umwelthygiene

Eingereicht: 30.09.2022

Akzeptiert: 21.12.2022

Veröffentlicht: 01.06.2023

Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen

Abstract

Der fortschreitende Klimawandel birgt das Potenzial für eine zunehmende menschliche Gesundheitsgefährdung durch wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen, z. B. durch eine Erhöhung von Pathogenkonzentrationen in Gewässern, durch die Ansiedlung neuer Pathogene oder durch mögliche Veränderungen von Erregerereigenschaften. Dieser Beitrag stellt exemplarisch einige Beispiele für mögliche Auswirkungen des Klimawandels dar. Nicht-Cholera-Vibrionen kommen natürlicherweise im Meerwasser vor, können sich aber in flachem Wasser bei erhöhter Temperatur erheblich vermehren. Im Falle von Legionellen könnten die Klimaveränderungen durch das Zusammenwirken von warmem und feuchtem Wetter zu temporären oder längerfristig erhöhten Legionellose-Inzidenzen führen. Auch könnten durch wärmeres Kaltwasser oder Senkungen der Temperatur des Warmwassers Bedingungen entstehen, die höheren Legionellenkonzentrationen Vorschub leisten. In nährstoffreichen Gewässern kann es bei Temperatursteigerung zu erhöhten Konzentrationen an toxischen Cyanobakterien kommen. Durch Starkregenfälle nach Stürmen oder längeren Hitzeperioden mit Trockenheit können humanpathogene Viren vermehrt in Gewässer eingeschwemmt werden. Und auch bei Erregern von Mykosen und fakultativ pathogenen Mikroorganismen besteht bei steigenden Temperaturen eine mögliche Gefährdung für die menschliche Gesundheit. So wurden nach Extremwetterereignissen bereits erhöhte Infektionsraten mit nicht-tuberkulösen Mykobakterien oder Pilzen dokumentiert.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

◆ NICHT-CHOLERA-VIBRIONEN · LEGIONELLOSEN · CYANOBAKTERIEN · UMWELTMIKROBEN · VIRUSINFESTIONEN

1. Einleitung

Zahlreiche Krankheitserreger des Menschen können durch Kontakt mit Wasser übertragen werden. Orale Aufnahme, Inhalation oder Hautkontakt mit Erregern wie Legionellen, Vibrionen, Cyanobakterien oder nicht-tuberkulösen Mykobakterien führen zu Erkrankungen mit zum Teil hohem Ge-

fährdungspotenzial und fulminanten Verläufen. Auch stellen Erreger von Mykosen und andere fakultativ pathogene Mikroorganismen eine Gefährdung der Gesundheit dar.

Durch die Folgen der globalen Erwärmung und den daraus resultierenden Klimawandel sind auch Effekte auf wasserbürtige Infektionen für die Zukunft zu erwarten. Längere saisonale Wärmeperioden durch heiße Sommer oder

anhaltende warme Herbste können auch in unseren nördlichen Breitengraden zur Zunahme der Wassertemperaturen führen. Diese erhöhten Temperaturen können die Vermehrung von Krankheitserregern begünstigen. Ein solcher klimatischer Effekt konnte beispielsweise für die Ostsee mittels Satellitendaten seit 1990 gezeigt werden. Eine Auswertung ergab, dass sich die Oberfläche der gesamten Ostsee im Jahresmittelwert in den letzten 16 Jahren um rund 0,8°C erwärmt hat [1]. Auch Sturmfluten und Überschwemmungen können wasserbürtige Keime, insbesondere wasserbürtige Viren und fakultativ pathogene Umweltmikroben, verbreiten. Es ist anzunehmen, dass diese Wetterphänomene mit fortschreitendem Klimawandel vermehrt auftreten.

Ein Großteil wasserbürtiger Infektionen kann bei Freizeitaktivitäten erworben werden. Dies hat weitreichende Folgen für die menschliche Gesundheit, da sich im Rahmen steigender Außentemperaturen auch das Freizeitverhalten der Bevölkerung stärker an wasserassoziierten Aktivitäten orientieren kann. Nachfolgend soll das Risiko wasserbürtiger Infektionen und Intoxikationen beispielhaft an verschiedenen Mikroorganismen erörtert werden, deren Vorkommen durch den Klimawandel beeinflusst wird.

Von den Autorinnen und Autoren dieses Artikels wurden gemeinsam die gemäß ihrer Expertenmeinung darzustellenden Inhalte festgelegt. Entsprechende Verweise auf die aktuelle Literatur wurden hinzugefügt, ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht jedoch nicht.

2. Nicht-Cholera-Vibrionen

Vibrionen sind gramnegative, stäbchenförmige Bakterien, die mäßig bis ausgeprägt halophil (salzbedürftig) sind.

Vibrio (V.) cholerae O1/O139, die das Cholera-Toxin bilden können, sind die wohl bekanntesten Vertreter der Vibrionen. Sie lösen die epidemische Cholera aus. Cholera wird in Deutschland gelegentlich als im Ausland erworbene Infektion diagnostiziert, ist in Europa aber nicht endemisch.

So genannte Nicht-Cholera-Vibrionen (NCV) wie die ebenfalls humanpathogenen *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus*, *V. cholerae* non-O1/non-O139, *V. fluvialis*, *V. furnissii*, *V. alginolyticus*, *V. mimicus* und *V. metschnikovii* kommen jedoch als Bestandteile der normalen Bakterienflora auch in der Nord- und Ostsee, und vereinzelt in leicht salzhaltigen Binnengewässern vor. Nord- und Ostsee enthalten leicht unterschiedliche Zusammensetzungen von NCV, vermutlich aufgrund unterschiedlicher Salinität des Wassers. Eine Studie mit Gewässer- und Sedimentuntersuchungen konnte zeigen, dass in der deutlich salzhaltigen Nordsee vermehrt *V. parahaemolyticus* zu finden ist, während in der Ostsee hauptsächlich *V. vulnificus* neben anderen NCV nachgewiesen wird. Auch *V. cholerae* non-O1/non-O139 ist hier häufig nachweisbar [2]. Besonders betroffen sind flache Gewässer, die sich bei Sonneneinstrahlung stark erhitzen können und zudem wenig durch Wind, Gezeiten oder andere Strömungen durchmischt werden. Bei Wassertemperaturen von über 20°C können sich NCV hier stark vermehren. An der Nordseeküste sind vor allem Strände an Flussmündungen aufgrund des dort reduzierten Salzgehaltes für das Auftreten von höheren NCV-Konzentrationen anfällig. An der Ostseeküste erfüllen z. B. Boddengewässer im Sommer und Frühherbst viele Bedingungen für das Wachstum von NCV. Prognosen für die NCV-Vermehrung sind einsehbar im „Vibrio map viewer“, einem Tool des Europäischen Zentrums für die Prävention und die Kontrolle

Menschen mit Vorerkrankungen haben ein erhöhtes Risiko von wasserbürtigen Infektionen, dies gilt auch für ältere und immungeschwächte Personen.

von Krankheiten (European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC), das unter Verwendung von Echtzeitdaten zu Wassertemperatur und Salzgehalt der Meeresoberfläche das Auftreten von Umweltbedingungen vorher sagt, die die Vermehrung von Vibrionen begünstigen. [3].

Menschen können sich auf verschiedene Weise mit NCV infizieren: Sie können die Erreger in roher oder unzureichend erhitzter Nahrung marinen Ursprungs aufnehmen, z. B. in Austern oder anderen Meeresfrüchten [4]. In einem anderen Artikel dieses Sachstandsberichts wird auf Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen näher eingegangen (Dietrich et al. [5]). Die Erreger können bei Kontakt von größeren Wunden, aber auch sehr kleinen Hautverletzungen mit Wasser in den Körper eindringen. Hierbei sind häufig Infektionen mit *V. vulnificus* beschrieben. Selten, aber ebenfalls möglich, sind Infektionen durch direkt im Wasser auftretende Hautverletzungen [6, 7] und solche beim Umgang mit Tieren, Muscheln und Steinen, denen Meerwasser anhaftet, beispielsweise bei der Verarbeitung von Fisch. Vor allem bei Kindern kommt es häufig zu Ohrinfektionen mit NCV, hauptsächlich mit *V. cholerae* non-O1/non-O139, z. B. durch Schwimmen oder Baden im Flachwasser.

Entsprechend den unterschiedlichen Infektionswegen und den verschiedenen Erregerspezies manifestieren sich unterschiedliche Krankheitsbilder in Form von Gastroenteritis, Wundinfektionen oder Ohrinfektionen; bei Aspiration von Meerwasser sind sogar Lungenentzündungen durch *V. vulnificus* beschrieben [8, 9]. Die Gastroenteritis entspricht dabei in der Regel nicht dem Krankheitsbild der Cholera mit extrem starken, reiswasserartigen Durchfällen mit großer Dehydratationsgefahr, da NCV das Cholera-

Toxin fehlt. Ausgehend von Wunden, bzw. Verletzungen der Hautbarriere, können sich durch die bakteriellen Toxine invasive, grenzüberschreitende, meist eitrige Infektionen entwickeln, die dringend chirurgisch versorgt werden müssen [10]. Sowohl bei Wundinfektionen als auch bei Gastroenteritis kann es zum Krankheitsbild der Sepsis kommen, welche mit einer signifikanten Letalität verbunden ist. Hier ist eine schnelle ärztliche Behandlung notwendig. Während die Infektionen mit NCV alle Altersgruppen betreffen können, sind gerade bei schwer verlaufenden Wund- und Weichteilinfektionen und Sepsis klare Risikogruppen benennbar: Hierzu zählen ältere sowie immungeschwächte Personen. Auch Menschen mit Vorerkrankungen wie Diabetes mellitus, Lebererkrankungen (z. B. Leberzirrhose, chronische Hepatitis), Krebserkrankungen (z. B. nach einer Chemotherapie) sowie schweren Herzerkrankungen haben ein erhöhtes Risiko für eine symptomatische Infektion und auch für einen schweren Krankheitsverlauf [11]. Dagegen sind unter den in Europa bekannten Fällen nur selten junge gesunde Erwachsene, die in der Regel auch nicht schwer erkranken. Bei einer schnellen, geeigneten und ausreichend dosierten antimikrobiellen Therapie mit Antibiotika sind Infektionen auch bei Risikopatientinnen und -patienten in den Griff zu bekommen. Unbehandelt oder zu spät behandelt kann – durch das schnelle Fortschreiten der Infektion – zusätzlich eine chirurgische Behandlung (bis hin zur Amputation betroffener Gliedmaßen) erforderlich sein. Bei Verletzungen oder bereits sichtbaren Infektionen von Haut und Weichgewebe mit Salzwasser-Exposition empfiehlt daher die aktuelle Leitlinie „Haut- und Weichgewebeanfektionen“ die Anwendung einer sofortigen Antibiotika-Kombinationstherapie [12]. Diese sollte bei Risikopatientinnen und

-patienten im Zweifel bereits begonnen werden, wenn die mikrobiologische Bestätigung von NCV noch aussteht [9]. Auch Patientinnen und Patienten mit einer Gastroenteritis durch NCV, bei denen durch Vorerkrankungen wie Diabetes oder eine Leberanschädigung ein erhöhtes Sepsis-Risiko besteht, sollten frühzeitig antibiotisch behandelt werden.

In den Jahren vor der Einführung der expliziten Meldepflicht wurden dem Robert Koch-Institut (RKI) jährlich bis zu 20 Fälle von NCV-Infektionen mit Infektionsorten in Deutschland bekannt. Die Fälle traten vermehrt in den wärmeren Sommern 2003, 2006, 2010, 2018 und 2019 auf.

Eine große Studie über 63 deutsche Fälle in den Jahren mit sehr heißen Sommern 2018 und 2019 beschrieb Patientinnen und Patienten mit eindeutiger Alters- und Geschlechtsverteilung (mehrheitlich über 60 Jahre alt und

überwiegend männlich) sowie Saisonalität der Infektionen. Die Patientinnen und Patienten hatten sich deutlich öfter an bzw. in der Ostsee als an der Nordsee mit NCV infiziert. Wundinfektionen waren die häufigste Krankheitsform, wobei sich mehrheitlich (84%) vorbestehende Wunden durch Meerwasserkontakt entzündeten. Häufige Vorerkrankungen der zumeist älteren Personen waren Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes mellitus oder Immunschwäche. 51% der Patientinnen und Patienten mussten auf einer Intensivstation behandelt werden, insgesamt acht Menschen verstarben im Zusammenhang mit der Infektion [9].

Seit dem 01.03.2020 besteht neben der Meldepflicht für Cholera in Deutschland auch eine Meldepflicht für Infektionen mit anderen humanpathogenen Vibrionen gemäß Infektionsschutzgesetz (IfSG). Ein Auszug der seit 2020 übermittelten NCV-Infektionen wird in [Tabelle 1](#) beschrieben.

	2020 (ab März)	2021
Nicht explizit auslandreiseassoziierte Fälle	13 (von insgesamt 13 gemeldeten NCV-Infektionen)	25 (von insgesamt 29 gemeldeten NCV-Infektionen)
Umfeld der Infektionen (soweit bekannt)	9 x Ostsee 1 x Nordsee	14 x Ostsee 2 x Binnengewässer
Geschlecht männlich	9 (69%)	16 (64%)
Altersspanne (in Jahren)	22–87, Median: 60	8–89, Median: 68
Erkrankungsbeginn von Juli–September	9 (100% derer mit Angabe)	16 (80% derer mit Angabe)
Erreger	8 x <i>V. vulnificus</i> 4 x <i>V. cholerae</i> non-O1/non-O139 1 x <i>V. parahaemolyticus</i>	14 x <i>V. vulnificus</i> 4 x <i>V. cholerae</i> non-O1/non-O139 3 x <i>V. alginolyticus</i> 2 x <i>V. parahaemolyticus</i> 1 x andere Spezies 1 x Ko-Infektion mit 2 Spezies
Krankheitsformen (soweit bekannt)	5 x Wundinfektion/Sepsis 2 x Ohrinfektion	18 x Wundinfektion/Sepsis 3 x Gastroenteritis 1 x Ohrinfektion

NCV = Nicht-Cholera-Vibrionen, V. = Vibrio

Tabelle 1

Auszug der seit Einführung der Meldepflicht für NCV an das Robert Koch-Institut übermittelten, mutmaßlich nicht reiseassoziierten NCV-Infektionen

Quelle: SurvNet, Datenbank der in Deutschland meldepflichtigen Infektionskrankheiten

Eine Zunahme von Infektionen durch Nicht-Cholera-Vibrionen vor allem in den Küstengewässern der Ostsee ist mit fortschreitendem Klimawandel zu erwarten.

Hier wird eine klare Saisonalität der Erkrankungsbeginne in den Sommermonaten der vor allem älteren betroffenen Patientinnen und Patienten deutlich. Ebenso ist erkennbar, dass der Großteil der Infektionen mit NCV mit Gewässerkontakt (v. a. der Ostsee) assoziiert ist. Eine Zunahme dieser Infektionen vor allem in den Küstengewässern ist mit fortschreitendem Klimawandel in heißen, langen Sommern zu erwarten.

2.1 Einfluss des Klimawandels auf Infektionen mit Vibrionen

Der Klimawandel beeinflusst Infektionen mit Vibrionen mindestens auf zweierlei Weise:

Da sich Wassertemperaturen oberhalb von 12 °C im Allgemeinen begünstigend auf das Vorkommen von Vibrionen auswirken und sich NCV in warmem Wasser ab 20 °C besonders stark vermehren können, tragen häufigere längere Wärmeperioden zur Konzentration der Erreger im Wasser bei. Diese Konzentration kann zusätzlich erhöht werden, wenn die Gewässerumwälzung aufgrund geänderter Tidenhubs, geringerer Frequenz von Stürmen oder veränderter Einflüsse sonstiger Strömungen vermindert wird oder sogar ausbleibt. Eine klimabedingte Verlängerung des Jahreszeitraums, in dem mit hohen NCV-Konzentrationen gerechnet werden muss, verlängert auch die Phase, in der vor allem vulnerable Menschen mit den Erregern in Kontakt kommen können, z. B. durch die Verlängerung der Badesaison. Zusätzlich ist zu beachten, dass der demografische Wandel den Anteil vulnerabler Gruppen in der Bevölkerung, und vermutlich auch unter Urlauberinnen und Urlaubern an deutschen Küsten, generell ansteigen

lässt. Als Folge der globalen Erwärmung ist außerdem zu erwarten, dass die Oberflächentemperatur in der Ostsee in den nächsten Jahrzehnten um etwa 3–4 °C ansteigen wird [13], was generell zu einer Zunahme humanpathogener NCV in den Küstengewässern führen wird.

2.2 Handlungsoptionen zur Begrenzung der Exposition durch NCV

Die hier dargestellten Handlungsoptionen konzentrieren sich aufgrund der Breite des Themas auf Wundinfektionen und Sepsis, vor allem durch *V. vulnificus*, da es sich dabei um die schwerwiegendsten NCV-Infektionen in Deutschland handelt. Untersuchungen bezüglich *V. vulnificus* als menschlichem Pathogen wurden bereits ausführlich beschrieben, und zeigen eine deutlich erhöhte Gefährdung bestimmter Personengruppen, sich mit diesem Erreger zu infizieren und schwer zu erkranken [14].

(1) Infektionen mit NCV lassen sich reduzieren, wenn potenziell infektiöser Wasserkontakt vermieden wird, insbesondere sollten Wunden nicht gegenüber Meerwasser exponiert werden. Theoretisch hilfreich ist, auf Wasserkontakte mit geringeren Infektionswahrscheinlichkeiten auszuweichen wie z. B. das Waten oder Schwimmen eher an zum Meer offenen und von Gezeiten beeinflussten Strandabschnitten statt an besonders schlecht durchmischten und brackigen Küstenabschnitten wie Boddengewässern. Von dieser Vermeidung würden Menschen, die bei einer Infektion mit NCV das höchste Risiko eines schweren Krankheitsverlaufs tragen, am meisten profitieren: vor allem Seniorinnen und Senioren, insbesondere solche mit den beschriebenen Vorerkrankungen, z. B. schlecht heilenden

Wunden an den Beinen. Schwerwiegende Krankheitsverläufe können durch schnelle und angemessene Behandlung verhindert oder abgemildert werden.

(2) Dass Meerwasser Wunden desinfiziert, ist eine leider weit verbreitete Fehlinformation. Patientinnen und Patienten mit Risikofaktoren für schwere Erkrankungsverläufe sollten z. B. durch ihre Hausärztinnen und -ärzte über das grundsätzliche Infektionsrisiko informiert sein, wenn Wunden mit natürlichen Gewässern in Kontakt kommen. Küstennahe Reha-Kliniken und ähnliche Einrichtungen sollten Bewohnerinnen und Bewohner saisonal aktiv über die Risiken von Infektionen mit NCV informieren und Hinweise zur Infektionsvermeidung geben. Auch touristische Einrichtungen sollten zielgruppengerecht die entsprechenden Risiken thematisieren. Ärztinnen und Ärzte, vor allem – aber nicht nur – in Küstennähe, sollten besonders bei umgehend behandlungsbedürftigen Wundinfektionen und Sepsis nach Aufenthalt an den Küsten differenzialdiagnostisch auch eine Infektion mit NCV in Betracht ziehen und schnellstmöglich eine Therapie mit geeigneten Antibiotika einleiten.

3. Legionellen

Die Legionärskrankheit (LK) ist eine durch Legionellen, zum größten Teil der Spezies *Legionella (L.) pneumophila*, verursachte Form der Lungenentzündung. Typischerweise wird das Bakterium in Wassersystemen oder Biofilmen gefunden, aber es muss vernebelt und dann eingeatmet werden, um Krankheiten zu verursachen [15]. Epidemiologisch werden drei Kategorien unterschieden: reiseassoziierte, krankenhaussassoziierte und ambulant – d. h. im privaten

oder beruflichen Umfeld – erworbene Fälle von LK. Eine Übertragung von Legionellen ist prinzipiell durch eine Vielzahl von Quellen möglich, z. B. durch Aerosole von Verdunstungskühlsystemen [16, 17] oder Whirlpools [18], die epidemiologisch wichtigste Infektionsquelle stellt nach gegenwärtigem Kenntnisstand jedoch das häusliche Trinkwasser dar [19]. Allerdings verbleibt in Studien zur Infektionsquellensuche bei LK mindestens die Hälfte der sporadischen (d. h. nicht im Rahmen eines Ausbruchs auftretenden) Erkrankungen ohne gesicherte Infektionsquelle [19, 20]. Ein Teil davon könnte – auch über alternative Übertragungswege – im Kontext bestimmter Wetterbedingungen (z. B. erhöhte Niederschlagsmengen) auftreten [21]. Größere Ausbrüche von LK sind relativ selten und wurden in der Vergangenheit häufig durch Verdunstungskühlanlagen verursacht, z. B. 2009/2010 in Ulm [22] oder 2013 in Warstein [23]. Die LK ist eine saisonal auftretende Erkrankung, wobei die meisten Fälle in den Sommer- und Herbstmonaten zu verzeichnen sind. Von den drei epidemiologischen Gruppen ist die Saisonalität bei den reiseassoziierten Fällen am deutlichsten ausgeprägt, gefolgt von ambulant erworbenen Fällen. Krankenhausassoziierte Fälle weisen dagegen kaum eine Saisonalität auf.

In Deutschland ist die LK nach IfSG meldepflichtig. Die jährliche Inzidenz beträgt etwa 1,9:100.000 Einwohner, entsprechend etwa 1.500 übermittelten Fällen pro Jahr. Allerdings wird von einer Dunkelziffer von 15.000–30.000 Erkrankungen ausgegangen [24]. Ambulant erworbene Fälle von LK sind mit einem Anteil von etwa 70 % am häufigsten, gefolgt von reiseassoziierten Fällen (ca. 20 %) und mit einem Aufenthalt in einem Krankenhaus oder Altenpflegeheim assoziierten Fällen (ca. 10 %). Als Risikogruppen

Der Klimawandel könnte zu Erhöhungen der Inzidenz von Legionellosen führen.

gelten ältere Menschen, insbesondere männlichen Geschlechts, sowie Menschen mit Vorerkrankungen des Herzens, der Lunge oder an anderen Organen. Rauchen stellt einen starken Risikofaktor dar [25].

3.1 Einfluss des Klimawandels auf Legionellosen

Der Klimawandel könnte auf zweierlei Art und Weise die Häufigkeit des Auftretens der LK beeinflussen:

(1) Durch Umweltfaktoren, mitunter ausbruchsmitierend: Eine erhöhte Inzidenz von LK war in Studien mit verschiedenen Wetterbedingungen assoziiert. Dazu gehörten erhöhte Luftfeuchtigkeit [26–29], erhöhte Niederschlagsmengen [26–31], erhöhte Lufttemperatur [26, 29, 31], niedriger Luftdruck [30] oder Kombinationen aus diesen Faktoren. In den Niederlanden wurden ausbruchsartige Inzidenzerhöhungen mit warmen, feuchten Wetterbedingungen in Zusammenhang gebracht [26]. Auch in Deutschland gab es im Sommer 2018 in Bayern und Baden-Württemberg unerwartete Erhöhungen von Fallzahlen, die vermutlich mit einem derartigen Effekt assoziiert waren. Der Mechanismus der Umweltfaktoren-assoziierten Inzidenzerhöhung ist nicht bekannt. Es wird diskutiert, ob Regenwasser auf Straßen durch Befahren mit Autos zur Aerosolisierung von mit Legionellen kontaminiertem Pfützenwasser führt [28, 32]. Dazu würde passen, dass in einer japanischen Studie in Luftproben in der Nähe von befahrenen Straßen Legionellen-DNA identifiziert wurde, mitunter sogar *L. pneumophila* [28]. Dabei korrelierte die Legionellen-DNA-Menge mit der monatlichen Niederschlagsmenge. An Orten, wo der Klimawandel zu einem häufigeren Zusammentreffen von warmem und feuchtem

Wetter führt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Inzidenz der LK ansteigt und es gelegentlich auch zu ausbruchsartigen Fallhäufungen kommen kann.

(2) Längerfristig, durch Haushaltstrinkwasser: Angesichts der ansteigenden durchschnittlichen Luft- und Bodentemperatur ist es möglich, dass sich die Basistemperatur von Kaltwasser erhöht. Ein solcher Effekt könnte zu einem vermehrten Legionellenwachstum in Kaltwasser führen, was wiederum zu einer erhöhten Legionellenkonzentration in Kalt- wie auch in Warmwasser führen könnte. Ein weiterer Faktor, der zu einem vermehrten Legionellenwachstum führen könnte, ist das zunehmende Bestreben vieler Haushalte, durch niedrigere Warmwassertemperaturen sowohl Energie zu sparen, um das Klima zu schützen, als auch Kosten zu sparen bei steigenden Energiepreisen. Dadurch könnte die zuführende Warmwassertemperatur in einen Bereich, z. B. unter 50°C, geraten, bei dem Legionellenwachstum nicht nur nicht unterdrückt, sondern unter Umständen sogar gefördert wird. Es ist im Rahmen des Klimawandels dann von einem erhöhten Risiko auszugehen, wenn man als Prämisse setzt, dass eine höhere Legionellenkonzentration im Trinkwasser mit einem erhöhten Risiko für LK einhergeht. Allerdings gibt es schon seit langer Zeit den Begriff des Dosis-Wirkungs-Paradoxons [33], d. h. es wurde beobachtet, dass eine höhere Legionellenkonzentration nicht notwendigerweise mit einem erhöhten Risiko für LK einhergeht. Auch in einer in Berlin durchgeführten Fall-Kontroll-Studie (der LeTriWa-Studie) wurde als stärkster Risikofaktor auf mikrobiologischer Ebene nicht die Legionellenkonzentration, sondern die Anwesenheit von Virulenz-assoziierten (so genannten MAb 3/1-positiven) Legionellen in häuslichem Trinkwasser identifiziert [19].

3.2 Handlungsoptionen zur Begrenzung der gesundheitlichen Auswirkungen durch Legionellen

Zur Prävention der LK gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaerwärmung ist es wichtig, Forschungsansätze zu entwickeln, mit denen die möglichen, oben genannten Mechanismen untersucht werden können, durch die der Klimawandel die Entwicklung der Inzidenz der LK beeinflusst.

(1) Auf technischer Seite ist noch erheblicher Forschungsbedarf vorhanden. Zum Beispiel hat sich gezeigt, dass auch in der Version der Trinkwasserverordnung von 2011 (TrinkwV) als nicht untersuchungspflichtig geltende Trinkwasserinstallationen (vor allem Wohnungen mit dezentraler Trinkwassererwärmung, z. B. Durchlauferhitzer) durchaus (auch hohe) Legionellenkonzentrationen beinhalten können [34]. Darüber hinaus wurde in der LeTriWa-Studie gefunden, dass Virulenz-assoziierte Legionellen nicht nur in untersuchungspflichtigen, sondern auch in nichtuntersuchungspflichtigen Trinkwasserinstallationen identifiziert wurden und mit dem Auftreten von LK in Zusammenhang gebracht werden konnten [19, 34–36]. Es ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Wassertemperatur in Trinkwasserinstallationen, die Legionellenkonzentration und die Art des Stammes auf das Risiko von LK haben. Aus den Erkenntnissen könnten sich neue oder modifizierte Präventionsmöglichkeiten ergeben, deren Wirksamkeit geprüft werden sollte.

(2) Es ist auch wichtig herauszufinden, welche von Menschen beeinflussbaren präventiven Faktoren bzw. Verhaltensweisen evidenzbasiert die Übertragung von LK zu verhindern helfen. In der LeTriWa-Studie wurde herausgefunden,

dass die Kenntnis von Legionellen und ihren Eigenschaften bzw. individuelle, präventive Verhaltensweisen das Risiko zu senken vermögen (Buchholz et al.; Daten nicht veröffentlicht). Eine dabei als signifikant identifizierte Verhaltensweise war das Ablaufenlassen von Wasser vor Gebrauch.

(3) Da der negative und sehr starke Effekt von Rauchen als Risikofaktor für das Auftreten von LK gut belegt ist, könnten auch Kampagnen zur Reduktion des Rauchens vor diesem Hintergrund sehr effektiv sein. Durch weitere Forschung sollte untersucht werden, wie die Co-Benefits von reduziertem Tabakkonsum besser kommuniziert werden können.

4. Cyanobakterien

Cyanobakterien gehören zu den gramnegativen Bakterien, unterscheiden sich jedoch von anderen Bakterien durch ihre Fähigkeit zur Photosynthese unter Bildung von Sauerstoff. Wegen ihrer den Algen ähnlichen Lebensweise und dem Besitz von akzessorischen Pigmenten wie dem blauen Phycocyanin werden Cyanobakterien oft auch „Blualgen“ genannt. Sie besiedeln weltweit verschiedene Habitats und sind in Gewässern ein natürlicher Teil der Lebensgemeinschaft. In Gewässern mit hohen Nährstoffkonzentrationen (Phosphor, Stickstoff) können sich Cyanobakterien jedoch stark vermehren, mit negativen Effekten für das Ökosystem sowie für die Nutzung dieser Gewässer als Trinkwasser-Reserve oder als Badegewässer, v. a. wegen der Fähigkeit einiger Cyanobakterien potente Toxine zu produzieren [37]. Vor allem die im Süßwasser häufig vorkommenden Cyanobakterien wie *Microcystis*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon* und

Dolichospermum sind potenziell toxisch und bilden unter günstigen Bedingungen Massenentwicklungen, sogenannte Algenblüten. Nicht alle Genotypen von Cyanobakterien können Toxine produzieren und in der Regel bestehen Populationen aus einer Mischung von nicht-toxischen und toxischen Genotypen, letztere mit teils deutlichen Unterschieden im Toxingehalt. Die Toxinkonzentration in einem Gewässer hängt maßgeblich von der Biomasse an Cyanobakterien, aber auch von der Genotypenzusammensetzung ab. Umweltfaktoren beeinflussen sowohl das Vorkommen und Ausmaß der Cyanobakterien-Populationen als auch die Genotypenzusammensetzung und können sich somit im Saisonverlauf verändern.

Cyanobakterien können durch ihre Fähigkeit zur Toxinbildung gesundheitsschädlich sein, vermehren sich aber nicht im menschlichen Körper. Die wichtigsten Toxingruppen der Cyanobakterien umfassen Hepatotoxine (Microcystine, Nodularine, Cylindrospermopsine) sowie Neurotoxine (Anatoxine, Saxitoxine) [37]. Die systemische Wirkung der Toxine erfolgt ausschließlich bei oraler Aufnahme, eine Aufnahme über die Haut ist Untersuchungen zufolge nicht wahrscheinlich. Für die Hepatotoxine ist vor allem die chronische Toxizität von Bedeutung, für Neurotoxine besteht das gesundheitliche Risiko vorwiegend in ihrer z. T. ausgeprägten akuten oralen Toxizität.

Allergische Wirkungen der Cyanotoxine sind bislang nicht nachgewiesen worden, allerdings wurden irritierende und sensibilisierende Eigenschaften bei Hautkontakt mit unnatürlich hohen Konzentrationen an Cylindrospermopsin beobachtet. Die oft in Zusammenhang mit Cyanobakterien-Kontakt berichteten Symptome wie Schleimhautreizungen, Übelkeit und Atemwegserkrankungen werden sehr wahr-

scheinlich nicht durch Cyanotoxine hervorgerufen, sondern sind auf andere Zellbestandteile, Begleitbakterien der Cyanobakterien oder andere pathogene Organismen im Gewässer zurückzuführen [37]. Eine eindeutige Kausalität bei eher unspezifischen Symptomen ist aufgrund der Vielzahl möglicher Ursachen in der Regel nicht nachweisbar.

Menschen können Cyanobakterien und ihren Cyanotoxinen bei Freizeitaktivitäten in Gewässern mit Algenblüten ausgesetzt sein, aber auch durch Trinkwasser, wenn die Trinkwasseraufbereitung Cyanotoxine aus belasteten Gewässern nicht wirksam entfernt. Ferner können sie in Nahrungsmitteln enthalten sein (z. B. Fisch, Nahrungsergänzungsmittel aus Cyanobakterien). Eindeutig belegte schwere Erkrankungen oder gar Todesfälle beim Menschen durch Cyanotoxin-Aufnahme sind international nur in Einzelfällen, in Deutschland gar nicht bekannt.

4.1 Einfluss des Klimawandels auf Cyanobakterien

Primäre Ursache für das massenhafte Vorkommen von Cyanobakterien sind erhöhte Nährstoffkonzentrationen (Phosphor, Stickstoff) im Gewässer. Die Effekte des Klimawandels können das Vorkommen von Cyanobakterien verstärken, aber auch abschwächen. Günstig auf das Wachstum wirken z. B. in nährstoffreichen Gewässern eine durch hohe Temperaturen bedingte stabile Schichtung des Gewässers. Dagegen können in nährstoffärmeren Gewässern sinkende Pegel durch geringe Niederschläge einerseits sowie Abschwemmung von Nährstoffen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen bei Starkregenereignissen andererseits zu einer Erhöhung der Nährstoffe und damit zu mehr Cyanobakterien führen [38, 39]. Ausgeprägte Schichtung

Durch den Klimawandel wird es in manchen Gewässern zu einer Zunahme von (potenziell toxischen) Cyanobakterien kommen.

eines Gewässers mit unvollständiger Durchmischung kann aber auch zu einem Rückgang von Nährstoffen und damit auch der Cyanobakterien führen, und auch Starkregen sowie Wind können ihre Vermehrung negativ beeinflussen [40]. Da die Daten zum Einfluss von Umweltfaktoren auf den Toxingehalt einer Population nicht eindeutig sind, ist hierzu noch keine Einschätzung zum Einfluss des Klimawandels möglich.

Zusammenfassend ist es sehr wahrscheinlich, dass es durch den Klimawandel zu einer signifikanten Änderung der ökologischen Prozesse in Gewässern kommen wird. Wie sich diese Änderungen auswirken, lässt sich für einzelne Gewässer zurzeit schwer abschätzen: In manchen Gewässern wird dies zu häufigeren und ausgeprägteren Cyanobakterien-Blüten führen, in anderen jedoch nicht. Da dies von der Trophie und Morphometrie eines Gewässers sowie regionalen Wetterphänomenen abhängt, kann kein allgemeingültiger Einfluss des Klimawandels auf Cyanobakterien-Blüten für alle Gewässer abgeleitet werden [39].

4.2 Handlungsoptionen zur Vermeidung der gesundheitlichen Auswirkungen von Cyanobakterien

Für die wichtigsten Toxine hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) Leitwerte sowohl für Trinkwasser als auch für Badegewässer festgelegt [37]. Die im Jahr 2021 revidierte EU-Trinkwasserrichtlinie übernimmt den WHO-Leitwert von 1 µg/l für Microcystin-LR als Grenzwert; dies ist bis 2023 in nationales Recht zu überführen. Für Badegewässer regelt Artikel 8 „Gefährdung durch Cyanobakterien“ der EU-Badegewässerrichtlinie die Vorgehensweise, um eine

Exposition gegenüber Cyanobakterien und Cyanotoxinen zu minimieren.

Für Trinkwasser ist durch den geringen Anteil aufbereiteten Oberflächenwassers in Deutschland sowie wirksamer Verfahren der Trinkwasseraufbereitung gemäß den rechtlichen Vorgaben keine Gefahr durch Cyanotoxine zu erwarten. Hingegen kann das Baden in stark mit Cyanobakterien belasteten Gewässern ein Gesundheitsrisiko darstellen, da die meisten Cyanobakterien-Blüten in Deutschland Cyanotoxine enthalten. Vor allem die Aufnahme größerer Mengen belasteten Wassers gilt es zu vermeiden, weshalb im Spülsaum spielende Kinder durch ihren häufigen Hand-Mund-Kontakt, Kinder, die Schwimmen lernen, oder Aerosol-exponierte Wassersportlerinnen und -sportler (z. B. beim Wasserskifahren) zu den Risikogruppen gehören. Die größten Wassermengen werden jedoch vermutlich bei Badeunfällen (Beinahe-Ertrinken) aufgenommen.

Um Badende zu schützen werden der EU gemeldete Badegewässer auch auf das Vorkommen von Cyanobakterien untersucht und je nach Ausmaß der Belastung Warnhinweise oder gar ein Badeverbot ausgesprochen [41]. Daneben ist Aufklärung für eigenverantwortliches Handeln notwendig, da Gewässer nicht immer zeitnah untersucht werden können und ufernahe, dichte Algenblüten sporadisch auftreten können.

Schlussendlich ist der nachhaltigste Schutz vor Cyanobakterien, deren (massenhafte) Vermehrung im Gewässer zu verhindern. Dies ist nur durch Sicherstellen hinreichend geringer Konzentration von Nährstoffen zu erreichen und ist auch zur Beherrschung der Auswirkungen des Klimawandels zwingend notwendig [42].

Extremwetterereignisse können zu verstärkter Exposition gegenüber wasser- und erdbewohnenden Pathogenen führen.

5. Wasserbedingte Virusinfektionen

Im Gegensatz zur eindeutig nachvollziehbaren Wirkung des Klimawandels auf die Vermehrung vektorübertragener Viren (siehe hierzu den Artikel dieses Sachstandsberichts zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor-assoziierte Infektionskrankheiten, [Beermann et al.](#) [43]) sind die Auswirkungen des Klimawandels auf humanpathogene enterale Viren nicht sofort erkennbar. Gastrointestinale Infektionen durch humanpathogene enterale Viren, wie Noroviren, Rotaviren, Enteroviren sowie Hepatitis-A- und Hepatitis-E-Viren, die durch Kontamination der Gewässer auch wasserbürtige Infektionen verursachen können, sind in Europa durch hygienische Maßnahmen in den vergangenen Jahrzehnten eher rückläufig. Aufgrund der seit 2019 herrschenden COVID-19-Pandemie und der dadurch erfolgten Hygienemaßnahmen (reduzierte Kontakte, Lockdowns und das Tragen von Gesichtsmasken), die zu einer allgemeinen Reduzierung der Zirkulation humanpathogener Viren führten, blieben auch die teilweise deutlichen Änderungen des saisonalen Auftretens und der Biodiversität enteraler Viren in Gewässern weitestgehend unbeachtet.

5.1 Einfluss des Klimawandels auf wasserbürtige Virusinfektionen

Wasserbürtige Infektionen durch enterale Viren sind jedoch stark von den sekundären Effekten des Klimawandels betroffen [44]. Humanpathogene Viren, die in die Gewässer gelangen, können ihre Infektiosität, abhängig von der Stabilität ihres Virus-Kapsids, oft über lange Zeiträume aufrechterhalten. Die Viren können sich jedoch im Wasser nicht

mehr vermehren. Daher spielt eine Erhöhung der Wassertemperatur für enterale Viren meist keine zentrale Rolle. Erhöhte Konzentrationen der Erreger im Wasser werden jedoch vor allem durch die vom Klimawandel verursachten Stürme, längeren Hitzeperioden mit Trockenheit, sowie Starkregenfälle verursacht. Solche Extremwetterereignisse führen häufig zu einer erhöhten Einschwemmung pathogener Viren in die Gewässer und damit zu einer Verschlechterung der hygienischen Qualität der Gewässer [45]. Auch in Trockenperioden kann das Infektionsrisiko durch ein verringertes Wasservolumen und geringere Fließraten in Flüssen erhöht sein. Diese zeitweise erhöhten Viruslasten führen zu erhöhten Risiken der Übertragung wasserbürtiger Infektionen und gastrointestinaler Erkrankungen. Auch in Deutschland treten Extremwetterereignisse mit Starkregenfällen und Überschwemmungen immer häufiger auf, wie die Flutkatastrophen in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen im Juli 2021 zeigten, die durch eine Vermischung von Abwasser und Flutwasser zu einem erhöhten Risiko für Infektionen mit gastrointestinalen Krankheitserregern führten. Der Einfluss auf die Gesundheit von durch den Klimawandel verursachten Extremwetterereignissen wird in einem weiteren Artikel dieses Sachstandsbericht genauer betrachtet ([Butsch et al.](#) [46]).

5.2 Handlungsoptionen zur Begrenzung der gesundheitlichen Auswirkungen von wasserbedingten Virusinfektionen

(1) Die Mehrzahl neu entdeckter oder wiederkehrender Erreger sind Viren [47]. Bedingt durch die Veränderungen der klimatischen Bedingungen ist auch im Wasser mit dem

Auftreten neuer zoonotischer Erreger und einem Anstieg neuer wasserbürtiger Virusinfektionen zu rechnen. Dafür müssen effiziente Methoden zum Nachweis der Erreger und ihrer Elimination entwickelt werden.

(2) Des Weiteren muss genauer untersucht werden, welchen Einfluss der Klimawandel auf beobachtete Veränderungen des saisonalen Auftretens potenziell pathogener Viren in Gewässern hat. Die wasserbasierte Epidemiologie sowie die One-Health- und Planetary-Health-Konzepte, die eine Betrachtung der Umweltbedingungen auf das Infektionsgeschehen mit einbeziehen, bieten dazu gute Gelegenheiten. Vor allem nach Extremwetterlagen können durch verstärkte Monitoringprogramme zum Vorkommen pathogener Viren in Gewässern klimabedingte Anstiege wasserbürtiger Virusinfektionen frühzeitig erkannt und durch die Aufdeckung möglicher Infektionsketten reduziert oder verhindert werden.

6. Fakultativ pathogene Umweltmikroben

Zahlreiche fakultativ pathogene Mikroorganismen (z. B. Pilze, Amöben, Bakterien, Mykobakterien) sind Teil polymikrobieller Gemeinschaften in verschiedenen Umwelthabitaten (z. B. in Erde und Wasser). Gegenüber nicht-pathogenen Mikroben sind diese durch Thermotoleranz, d. h. Wachstumsfähigkeit bei humaner Körpertemperatur, gekennzeichnet. Im Gegensatz zu Infektionen durch klassische bakterielle Pathogene bereitet die Diagnose, Therapie und Kontrolle von Infektionsausbrüchen durch solche Umweltmikroben besondere Schwierigkeiten. Die mikrobiologische Diagnostik ist aufgrund oft langsamen Wachstums und ubiquitären Vorkommens eingeschränkt. Viele dieser

Erreger sind wegen Antiinfektivaresistenzen schwer therapierbar. Aufgrund längerer Inkubationszeiten werden Ausbrüche ggf. erst spät bzw. ohne molekulare Typisierung nicht als Ausbrüche erkannt.

6.1 Einfluss des Klimawandels auf fakultativ pathogene Umweltmikroben

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Erhöhung der Umwelttemperaturen einen Selektionsvorteil für bestimmte fakultativ pathogene Umweltmikroben darstellt. Daneben wurde auch eine Adaptation bislang apathogener Pilze an höhere Temperaturen berichtet, die infolge dessen als Infektionserreger in Frage kommen [48]. Die anhand eines Ausbruchs des tropischen Mykoseerregers *Cryptococcus gattii* beobachtete Ansiedlung von Mikroorganismen aus warmen tropischen Regionen in den gemäßigten Klimazonen der nordamerikanischen Westküste belegt die Änderungsdynamik der Habitate [49].

Insbesondere nach Extremwetterereignissen könnten Menschen durch solche Änderungen der Erregereigenschaften und Verbreitung vermehrt gegenüber diesen Mikroorganismen exponiert sein. Nach Flutkatastrophen beispielsweise werden zunehmend Ereignisse wie erhöhte Raten an Infektionen mit nicht-tuberkulösen Mykobakterien oder Pilzen dokumentiert, die im Sinne dieser Hypothese ausgelegt werden können (z. B. [49–51]).

Änderungen klimatischer Faktoren können zu einem Selektionsvorteil thermotoleranter fakultativ pathogener Mikroben führen sowie zu einer Temperaturadaptation bislang apathogener Mikroorganismen.

6.2 Handlungsoptionen zur Begrenzung der gesundheitlichen Auswirkungen von fakultativ pathogenen Umweltmikroben

(1) Zur Dokumentation von Änderungen mikrobieller Bestandteile von Umwelthabitaten und Risikobewertung ist ein umfassendes Monitoring der Mikroorganismen-Population notwendig, z. B. durch metagenomische Surveillance von Mikroorganismen in Umweltproben mit Methoden, die auch für diese Erregergruppen geeignet sind [52].

(2) Die Verbesserung diagnostischer Verfahren (z. B. Polymerase-Kettenreaktion (PCR), Sequenzierung) für diese Erreger und polymikrobielle Infektionen sind entscheidend für erfolgreiche Therapiestrategien.

(3) Die Entwicklung molekularer Typisierungsschemata ist notwendig zur Erkennung und Begrenzung von Ausbrüchen.

7. Fazit und Ausblick

Die globale Erwärmung und der damit verbundene fortschreitende Klimawandel haben weitreichende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen stellen in diesem Zusammenhang eine erhöhte Gefahr dar. Krankheitserreger, die durch Kontakt mit Wasser zu Infektionen und Intoxikationen des Menschen führen können, können durch steigende Wassertemperaturen gehäuft auftreten. Auch Extremwetterereignisse können zu verstärkter Exposition gegenüber wasser- und erdbewohnenden Pathogenen führen. Bedingt durch die Veränderungen der klimatischen Bedingungen ist im Wasser auch mit dem Auftreten neuer zoonotischer Erreger

und einem vermehrten Anstieg neuer wasserbürtiger Virusinfektionen zu rechnen. Durch Klimaveränderungen können auch Selektionsvorteile für thermotolerante fakultativ pathogene Mikroben entstehen, und es kann zu Temperaturadaptation bislang apathogener Mikroorganismen kommen.

Handlungsempfehlungen für den besseren Schutz der menschlichen Gesundheit vor wasserbürtigen Infektionen und Intoxikationen sehen wir in drei großen Kategorien: Maßnahmen zur Reduktion der Expositionsgefahr, Aufklärung und Forschung.

Die Reduktion der Expositionsgefahr steht hierbei an erster Stelle, dies gilt vor allem für Infektionen mit NCV, aber auch für Cyanobakterien und Cyanotoxine. Der nachhaltigste Schutz vor Cyanobakterien ist es, deren (massenhafte) Vermehrung im Gewässer zu verhindern. Dies ist nur durch Sicherstellen hinreichend geringer Konzentration von Nährstoffen zu erreichen, um Badende zu schützen. Vor allem für Menschen in den Risikogruppen können die Vermeidung von potenziell infektiösem Wasserkontakt sowie eine schnellstmögliche Antibiotikatherapie im begründeten Verdachtsfall helfen, Infektionen mit NCV und vor allem schwere Krankheitsverläufe zu verhindern.

Da Menschen mit Vorerkrankungen, immungeschwächte und ältere Personen ein erhöhtes Risiko für wasserbürtige Infektionen haben, ist verbesserte Aufklärung über die entsprechenden Risiken von großer Bedeutung. Auch medizinische und touristische Einrichtungen an Nord- und Ostsee müssen über die steigenden Risiken insbesondere von NCV-Infektionen informiert sein.

Forschungsansätze zu Risikofaktoren und deren Eindämmung sollten ausgebaut werden, bei LK beispielsweise der Tabakkonsum. Effiziente Methoden zum Nachweis

unterschiedlicher, auch neuartiger Erreger und ihrer Elimination sollten entwickelt werden. Vor allem nach Extremwetterlagen können breitflächig angelegte Untersuchungen zum Vorkommen pathogener Viren und anderer Mikroben in Gewässern mögliche auftretende Gefahren dokumentieren, und somit klimabedingte Anstiege wasserbürtiger Infektionen frühzeitig erkannt werden.

Zur Reduktion der im Rahmen des Klimawandels zu erwartenden zunehmenden Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen sind deshalb gemeinsame Anstrengungen vieler Akteurinnen und Akteure erforderlich.

Korrespondenzadresse

Dr. Susann Dupke
Robert Koch-Institut
Zentrum für Biologische Gefahren und Spezielle Pathogene
Seestr. 10
13353 Berlin
E-Mail: DupkeS@rki.de

Zitierweise

Dupke S, Buchholz U, Fastner J, Förster C, Frank C et al. (2023)
Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige
Infektionen und Intoxikationen.
J Health Monit 8(S3): 67–84.
DOI 10.25646/11394

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Beiträge der Autorinnen und Autoren

Von den Autorinnen und Autoren dieses Artikels wurden gemeinsam die gemäß ihrer Expertenmeinung darzustellenden Inhalte festgelegt. Einzelne Personen bereiteten Entwürfe für die verschiedenen Unterkapitel vor, die von allen Autorinnen und Autoren gemeinsam finalisiert wurden:

Nicht-Cholera-Vibrionen: Frank C, Dupke S

Legionellen: Buchholz U, Förster C

Cyanobakterien: Fastner J

Wasserbedingte Virusinfektionen: Selinka HC, Förster C

Fakultativ pathogene Umweltmikroben: Rickerts V,
Lewin A

Nach der Erstautorin haben alle Autorinnen und Autoren vergleichbare Beiträge geleistet und sind nach alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Danksagung

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (2022) Faktenübersicht zum Klimawandel und seinen Folgen in der Ostsee-Region. <https://www.io-warnemuende.de/im-fokus-details/items/faktenuebersicht-zu-klimawandel-und-folgen-in-der-ostsee-region.html> (Stand: 21.12.2022)
2. Fleischmann S, Herrig I, Wesp J et al. (2022) Prevalence and distribution of potentially human pathogenic *Vibrio* spp. on German North and Baltic Sea Coasts. *Front Cell Infect Microbiol* 12:846819
3. ECDC (2022) ECDC Geoportal - Vibrio Map Viewer. <https://geoportal.ecdc.europa.eu/vibriomapviewer> (Stand: 21.12.2022)
4. Vu TTT, Alter T, Huehn S (2018) Prevalence of *Vibrio* spp. in retail seafood in Berlin, Germany. *J Food Prot* 81(4):593–597
5. Dietrich J, Hammerl JA, John A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen. *J Health Monit* 8(S3):85–101. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
6. Brehm TT, Berneking L, Rohde H et al. (2020) Wound infection with *Vibrio harveyi* following a traumatic leg amputation after a motorboat propeller injury in Mallorca, Spain: A case report and review of literature. *BMC Infect Dis* 20(1):104
7. Hecht J, Borowiak M, Fortmeier B et al. (2022) Case Report: *Vibrio fluvialis* isolated from a wound infection after a piercing trauma in the Baltic Sea. *Access Microbiol* 4(1):000312
8. Brehm TT, Berneking L, Sena Martins M et al. (2021) Heat-wave-associated *Vibrio* infections in Germany, 2018 and 2019. *Euro Surveill* 26(41):2002041
9. Brehm TT, Dupke S, Hauk G et al. (2021) Non-cholera *Vibrio* species - Currently still rare but growing danger of infection in the North Sea and the Baltic Sea. *Internist (Berl)* 62(8):876–886
10. Meyer HL, Polan C, Burggraf M et al. (2022) 'The Baltic Sea Germ': A case report of necrotizing fasciitis following *Vibrio vulnificus* infection. *Case Rep Orthop* 2022:5908666
11. Metelmann C, Metelmann B, Grundling M et al. (2020) *Vibrio vulnificus*, an increasing threat of sepsis in Germany? *Anaesthetist* 69(9):672–678
12. Sunderkötter C, Becker K, Eckmann C et al. (2019) Haut- und Weichgewebeinfektionen. In: Paul-Ehrlich-Gesellschaft für Chemotherapie e. V. (Hrsg) S2k Leitlinie: Kalkulierte parenterale Initialtherapie bakterieller Erkrankungen bei Erwachsenen – Update 2018, S. 173–227. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/o82-006> (Stand: 21.12.2022)
13. Meier HEM, Dieterich C, Gröger M (2021) Natural variability is a large source of uncertainty in future projections of hypoxia in the Baltic Sea. *Commun Earth Environ* 2(50):1–13
14. Baker-Austin C, Oliver JD (2018) *Vibrio vulnificus*: New insights into a deadly opportunistic pathogen. *Environ Microbiol* 20(2):423–430
15. Prussin AJ 2nd, Schwake DO, Marr LC (2017) Ten questions concerning the aerosolization and transmission of *Legionella* in the built environment. *Build Environ* 123:684–695
16. Walser SM, Gerstner DG, Brenner B et al. (2014) Assessing the environmental health relevance of cooling towers – A systematic review of legionellosis outbreaks. *Int J Hyg Environ Health* 217(2-3):145–154
17. Ricketts KD, Joseph CA, Lee JV et al. (2012) Wet cooling systems as a source of sporadic Legionnaires' disease: A geographical analysis of data for England and Wales, 1996–2006. *J Epidemiol Community Health* 66(7):618–623
18. Jernigan DB, Hofmann J, Cetron MS et al. (1996) Outbreak of Legionnaires' disease among cruise ship passengers exposed to a contaminated whirlpool spa. *Lancet* 347(9000):494–499
19. Buchholz U, Jahn HJ, Brodhun B et al. (2020) Source attribution of community-acquired cases of Legionnaires' disease-results from the German LeTriWa study; Berlin, 2016–2019. *PLoS One* 15(11):e0241724
20. Den Boer JW, Euser SM, Brandsema P et al. (2015) Results from the National Legionella Outbreak Detection Program, the Netherlands, 2002-2012. *Emerg Infect Dis* 21(7):1167–1173
21. Sakamoto R (2015) Legionnaire's disease, weather and climate. *Bull World Health Organ* 93(6):435–436
22. von Baum H, Harter G, Essig A et al. (2010) Preliminary report: Outbreak of Legionnaires disease in the cities of Ulm and Neu-Ulm in Germany, December 2009 – January 2010. *Euro Surveill* 15(4):19472

23. Maisa A, Brockmann A, Renken F et al. (2015) Epidemiological investigation and case-control study: A Legionnaires' disease outbreak associated with cooling towers in Warstein, Germany, August-September 2013. *Euro Surveill* 20(46):pii=30046
24. von Baum H, Ewig S, Marre R et al. (2008) Community-acquired *Legionella pneumoniae*: New insights from the German competence network for community acquired pneumonia. *Clin Infect Dis* 46(9):1356–1364
25. Phin N, Parry-Ford F, Harrison T et al. (2014) Epidemiology and clinical management of Legionnaires' disease. *Lancet Infect Dis* 14(10):1011–1021
26. Brandsema PS, Euser SM, Karagiannis I et al. (2014) Summer increase of Legionnaires' disease 2010 in the Netherlands associated with weather conditions and implications for source finding. *Epidemiol Infect* 142(11):2360–2371
27. Fisman DN, Lim S, Wellenius GA et al. (2005) It's not the heat, it's the humidity: Wet weather increases legionellosis risk in the greater Philadelphia metropolitan area. *J Infect Dis* 192(12):2066–2073
28. Kanatani JI, Watahiki M, Kimata K et al. (2021) Detection of *Legionella* species, the influence of precipitation on the amount of *Legionella* DNA, and bacterial microbiome in aerosols from outdoor sites near asphalt roads in Toyama Prefecture, Japan. *BMC Microbiol* 21(1):215
29. Karagiannis I, Brandsema P, van der Sande M (2009) Warm, wet weather associated with increased Legionnaires' disease incidence in The Netherlands. *Epidemiol Infect* 137(2):181–187
30. Beaute J, Sandin S, Uldum SA et al. (2016) Short-term effects of atmospheric pressure, temperature, and rainfall on notification rate of community-acquired Legionnaires' disease in four European countries. *Epidemiol Infect* 144(16):3483–3493
31. Han XY (2021) Effects of climate changes and road exposure on the rapidly rising legionellosis incidence rates in the United States. *PLoS One* 16(4):e0250364
32. van Heijnsbergen E, de Roda Husman AM, Lodder WJ et al. (2014) Viable *Legionella pneumophila* bacteria in natural soil and rainwater puddles. *J Appl Microbiol* 117(3):882–890
33. O'Brien SJ, Bhopal RS (1993) Legionnaires' disease: The infective dose paradox. *Lancet* 342(8862):5–6
34. Buchholz U, Lehfeld AS, Brodhun B et al. (2022) Einfluss der häuslichen Trinkwasser-Installation auf das Risiko, an Legionärskrankheit zu erkranken. *Epid Bull* (35):3–17
35. Lehfeld AS, Jahn HJ, Brodhun B et al. (2022) Infektionsquellen-suche bei ambulant erworbenen Fällen von Legionärskrankheit – Ergebnisse der LeTriWa-Studie; Berlin, 2016–2020 – Teil 2 (Ergebnisse und Diskussion). *Epid Bull* (28):3–16
36. Buchholz U, Lehfeld AS, Jahn HJ et al. (2022) Infektionsquellen-suche bei ambulant erworbenen Fällen von Legionärskrankheit – Ergebnisse der LeTriWa-Studie; Berlin, 2016–2020 – Teil 1 (Studienmethodik). *Epid Bull* (27):13–22
37. Chorus I, Welker M (Hrsg) (2021) Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. CRC Press, on behalf of the World Health Organization, Geneva, Boca Raton (FL)
38. Rigosi A, Carey CC, Ibelings BW et al. (2014) The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnol Oceanogr* 59:99–114
39. Ibelings BW, Kurmayer R, Azevedo SMFO et al. (2021) Understanding the occurrence of cyanobacteria and cyanotoxins. In: Chorus I, Welker M (Hrsg) Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. CRC Press, on behalf of the World Health Organization, Geneva, Boca Raton (FL), S. 213–294
40. Salmaso N, Boscaini A, Capelli C et al. (2018) Ongoing ecological shifts in a large lake are driven by climate change and eutrophication: Evidences from a three-decade study in Lake Garda. *Hydrobiologia* 824:177–195
41. Umweltbundesamt (2015) Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen. Bundesgesundheitsbl 58:908–920
42. Fastner J, Abella S, Litt A et al. (2016) Combating cyanobacterial proliferation by avoiding or treating inflows with high P load – Experiences from eight case studies. *Aquat Ecol* 50:367–383
43. Beermann S, Dobler G, Faber M et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. *J Health Monit* 8(S3):36–66. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)

44. Semenza JC, Rocklov J, Ebi KL (2022) Climate change and cascading risks from infectious disease. *Infect Dis Ther* 11(4):1371–1390

45. Karthe D (2015) Bedeutung hydrometeorologischer Extremereignisse im Kontext des Klimawandels für die Trinkwasserhygiene in Deutschland und Mitteleuropa. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59(5):264–270

46. Butsch C, Beckers LM, Nilson E et al. (demnächst) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. *J Health Monit* www.rki.de/jhealthmonit

47. Nichol ST, Arikawa J, Kawaoka Y (2000) Emerging viral diseases. *Proc Natl Acad Sci U S A* 97(23):12411–12412

48. Garcia-Solache MA, Casadevall A (2010) Global warming will bring new fungal diseases for mammals. *mBio* 1(1):e00061–10

49. Engelthaler DM, Casadevall A (2019) On the emergence of *Cryptococcus gattii* in the Pacific Northwest: Ballast tanks, tsunamis, and black swans. *mBio* 10(5):e02193–19

50. Benedict K, Park BJ (2014) Invasive fungal infections after natural disasters. *Emerg Infect Dis* 20(3):349–355

51. Honda JR, Bernhard JN, Chan ED (2015) Natural disasters and nontuberculous mycobacteria: A recipe for increased disease? *Chest* 147(2):304–308

52. Ko KKK, Chng KR, Nagarajan N (2022) Metagenomics-enabled microbial surveillance. *Nat Microbiol* 7(4):486–496

Impressum

Journal of Health Monitoring

www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11393

Robert Koch-Institut, Berlin

Jessica Dietrich¹, Jens-Andre Hammerl²,
Annette Johne², Oliver Kappenstein¹,
Christopher Loeffler¹, Karsten Nöckler²,
Bettina Rosner³, Astrid Spielmeyer¹,
Istvan Szabo², Martin H. Richter²

¹ Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin
Abteilung Sicherheit in der Nahrungskette

² Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin
Abteilung Biologische Sicherheit

³ Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionsepidemiologie

Eingereicht: 30.09.2022

Akzeptiert: 12.01.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen

Abstract

Hintergrund: Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit sind wichtige Faktoren, welche die Verbreitung, die Vermehrung und das Überleben von Erregern beeinflussen können. Im Zuge des Klimawandels ändern sich diese Faktoren und es kommt zu erhöhten Luft- und Wassertemperaturen, zunehmenden Niederschlägen oder Wasserknappheit. Der Klimawandel kann so einen steigenden Einfluss auf viele Infektionserkrankungen ausüben.

Methode: Vor diesem Hintergrund betrachtet die vorliegende Übersichtsarbeit auf der Basis einer selektiven Literaturauswahl die für Deutschland bedeutendsten lebensmittelassoziierten Erregern und Toxine in tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln: die bakteriellen Erreger der Gattungen *Salmonella*, *Campylobacter* und *Vibrio*, Parasiten der Gattungen *Cryptosporidium* und *Giardia*, sowie marine Biotoxine.

Ergebnisse: Mit weiter fortschreitendem Klimawandel ist damit zu rechnen, dass alle hier diskutierten Infektionen und Intoxikationen auch in Deutschland vermehrt auftreten werden.

Schlussfolgerungen: Die zu erwartende Zunahme lebensmittelassoziiierter Infektionen und Intoxikationen stellt ein wachsendes Public-Health-Risiko in Deutschland dar.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

🔍 [CAMPYLOBACTER](#) · [SALMONELLA](#) · [VIBRIO](#) · [CRYPTOSPORIDIUM](#) · [GIARDIA](#) · [MARINE BIOTOXINE](#) · [ONE HEALTH](#)

1. Einleitung

Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit und Bodenbeschaffenheit sind wichtige Umweltfaktoren, die die Verbreitung und das Überleben von Zoonoserregern beeinflussen. Änderungen dieser Umweltfaktoren im Zuge des Klimawandels, wie dauerhaft erhöhte Umgebungstemperaturen, zunehmende Niederschläge, aber auch Wasserknappheit können dazu beitragen, die Verbreitung und das Überleben

von Pathogenen zu begünstigen. Der Klimawandel kann so einen steigenden Einfluss auf über die Hälfte aller Infektionserkrankungen ausüben [1]. Dies gilt nicht nur für bereits vorhandene, also endemische, Infektionserreger, sondern die klimatischen Veränderungen begünstigen auch das Ansiedeln neuartiger Infektionserreger (Emergence) sowie die Rückkehr in der Vergangenheit bereits verdrängter Erreger (Re-emergence). So wird zum Beispiel die Landwirtschaft zukünftig wegen Wasserknappheit, die durch

den Klimawandel verstärkt wird, möglicherweise häufiger auf behandeltes Abwasser zurückgreifen müssen. Dies birgt eine Reihe von Risiken für die Lebensmittelsicherheit, darunter die Kontamination von bewässerten Erzeugnissen durch verschiedene Arten von Krankheitserregern [2].

Diese Übersichtsarbeit geht auf Gefahren für die menschliche Gesundheit durch die in Deutschland wichtigsten lebensmittelassoziierten Bakterien, Parasiten und marinen Biotoxine ein und spricht Handlungsempfehlungen aus, wie die Risiken reduziert werden können. So kann beispielsweise das Risiko aller hier behandelten Infektionen durch gute Hygiene bei der Zubereitung von Speisen (Küchenhygiene) und die Einhaltung von Kühlketten reduziert werden.

Da Viren im Zusammenhang mit dem Einfluss klimatischer Veränderungen auf Lebensmittel eine noch untergeordnete Rolle spielen, werden sie in diesem Artikel nicht näher beleuchtet. Ihre Bedeutung im Rahmen des Klimawandels wird in weiteren Artikeln dieses Sachstandsberichts intensiv behandelt, z. B. im Zusammenhang mit Vektor-assoziierten Infektionskrankheiten (Beermann et al. [3]).

2. Bakterien

2.1 *Campylobacter*

Bakterien der Gattung *Campylobacter* (C.) verursachen eine Darminfektion, die typischerweise mit Bauchschmerzen und wässrigem, gelegentlich blutigem Durchfall einhergeht. Als seltene Komplikationen können Gelenkentzündungen sowie das Guillain-Barré-Syndrom, eine mit Lähmungsercheinungen einhergehende Nervenerkrankung, auftreten. Bereits eine niedrige Infektionsdosis von ≥ 500 Keimen

kann eine *Campylobacter*-Infektion auslösen. Jährlich werden etwa 50.000–70.000 Fälle an das Robert Koch-Institut (RKI) übermittelt. Die *Campylobacter*-Enteritis ist seit Jahren die häufigste bakterielle, nach dem Infektionsschutzgesetz (IfSG) meldepflichtige Durchfallerkrankung in Deutschland. Die wichtigsten humanpathogenen *Campylobacter*-Spezies sind *C. jejuni* und *C. coli*. Die Übertragung auf den Menschen erfolgt vor allem über kontaminierte Lebensmittel tierischen Ursprungs. Insbesondere der Verzehr von kontaminiertem Hühnerfleisch stellt einen bedeutenden Risikofaktor für *Campylobacter*-Infektionen dar [4–6]. Auch über andere Lebensmittel, z. B. nicht-pasteurisierte Milch, sind Übertragungen auf den Menschen möglich. Anders als bei Salmonellen wird eine Vermehrung von *Campylobacter* in Lebensmitteln wegen ihrer mikrobiologischen Charakteristika (Wachstum unter mikroaeroben Bedingungen, d. h. bei verminderter Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre, und bei Temperaturen von 30–42 °C) als unwahrscheinlich angesehen [7]. *Campylobacter*-Infektionen über kontaminiertes Trinkwasser oder mit tierischen Fäkalien verunreinigte Badegewässer sind ebenfalls beschrieben worden [8, 9].

Einfluss des Klimas auf *Campylobacter*-Infektionen

Das Infektionsgeschehen der *Campylobacter*-Enteritis zeigt typischerweise einen saisonalen Verlauf mit den höchsten Fallzahlen in den Sommermonaten Juli bis September, auch bei nicht-reiseassoziierten Infektionen. Mit fortschreiten der Erwärmung in Folge des Klimawandels und damit einhergehenden verlängerten Wärmeperioden wird daher mit einer Zunahme von *Campylobacter*-Erkrankungsfällen beim Menschen gerechnet.

Die Zahl der Infektionen mit Keimen wie Salmonellen oder *Campylobacter* korreliert positiv mit Höchsttemperatur und Niederschlagsmengen.

In den Sommermonaten ist aufgrund der erhöhten Temperatur eine höhere *Campylobacter*-Prävalenz in Geflügelherden und somit eine höhere Exposition von Verbraucherinnen und Verbrauchern über den Verzehr von Geflügelfleisch denkbar, auch wenn die Datenlage dazu nicht einheitlich ist [10–14].

Ein wichtiger indirekter Effekt auf die Zunahme von Humaninfektionen ist ein verändertes Verzehr- und Freizeitverhalten in den Sommermonaten, das mit einer erhöhten Exposition einhergeht und dadurch Infektionen begünstigt, z. B. häufigeres Grillen von Geflügel- und anderem Fleisch oder Baden in Oberflächengewässern [14, 15].

Ein Zusammenhang von humanen *Campylobacter*-Infektionen wurde nicht nur mit der Temperatur [16, 17], sondern auch mit der Präzipitationsmenge in den Tagen vor dem Erkrankungsbeginn in Verbindung gebracht [18, 19]. Nach Starkregen und Überschwemmungen wurde eine Zunahme von *Campylobacter*-Infektionen und *Campylobacter*-Enteritis-Krankheitsausbrüchen beobachtet, wahrscheinlich aufgrund erhöhter Exposition über mit Fäkalien kontaminierte Oberflächengewässer oder kontaminiertes Trinkwasser [9, 20]. Dagegen wird nach Dürreperioden eher eine Abnahme von *Campylobacter*-Fällen erwartet [18, 19].

Mit zunehmender Wasserknappheit in Folge des Klimawandels ist denkbar, dass aufbereitetes Abwasser, welches mit Krankheitserregern aus tierischen oder menschlichen Fäkalien verunreinigt sein kann, häufiger für die Bewässerung von pflanzlichen Lebensmitteln verwendet wird [21]. Über diesen Weg wäre eine zunehmende Kontamination pflanzlicher Lebensmittel mit gastrointestinalen Krankheitserregern, inklusive *Campylobacter*, und damit eine Beeinträchtigung der Lebensmittelsicherheit zu erwarten [21]. Die

Verordnung der Europäischen Union (EU) 2020/741 soll dem entgegenwirken und regelt Mindeststandards für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung (Infobox).

In einer Modellrechnung wurde der Effekt von zunehmender Temperatur und Präzipitation auf die Anzahl von *Campylobacter*-Fällen in Skandinavien geschätzt. Für Dänemark, Finnland, Norwegen und Schweden wurde bis zum Jahr 2080 eine Verdoppelung von *Campylobacter*-Fällen vorhergesagt [19]. Weitere wissenschaftliche Studien sind notwendig, um die multifaktoriellen, direkten und indirekten Zusammenhänge zwischen klimatischen Veränderungen und *Campylobacter*-Erkrankungsfällen besser zu verstehen.

2.2 Salmonellen

Die Bakterien der Gattung *Salmonella* sind Zoonoseerreger, die direkt oder indirekt zwischen Menschen und Tieren übertragen werden können. Sie sind in der Natur weit verbreitet. Das Hauptreservoir für Salmonellen sind warmblütige Tiere, einschließlich Nutz- und Wildtiere. Salmonellen kommen auch bei kaltblütigen Tieren wie Reptilien oder Insekten vor, die als Vektoren fungieren und Salmonellen auf warmblütige Tiere bzw. Menschen übertragen können. Obwohl die meisten Salmonellen bei Tieren üblicherweise keine Symptome hervorrufen, können sie bei Menschen leichte bis schwere gesundheitliche Probleme verursachen. Die Salmonellose des Menschen geht oft mit Fieber, Übelkeit, Erbrechen, Bauch- und Kopfschmerzen einher, Krankheitszeichen können aber auch völlig fehlen.

In Deutschland ist die Salmonellose nach der *Campylobacteriose* die am zweithäufigsten gemeldete bakterielle

Infobox EU-Verordnung zur Wasserwiederverwendung

Klimatische Veränderungen erhöhen den Druck auf die Wasserressourcen in Deutschland und Europa. Um diesem Druck zu begegnen, wurden in der Verordnung (EU) 2020/741 Mindestanforderungen an die Nutzung von aufbereitetem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung festgelegt. Sie trat am 26. Juni 2020 in Kraft und gilt ab dem 26. Juni 2023 für alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union.

Die Verordnung soll die Wasserknappheit in der Europäischen Union in Folge des Klimawandels durch Wasserwiederverwendung für die landwirtschaftliche Bewässerung verringern und den Mitgliedstaaten die Umsetzung mit einheitlichen Vorgaben erleichtern. Ziel ist ein hohes Schutzniveau für die Umwelt und für die Gesundheit von Mensch und Tier sowie die Förderung der Kreislaufwirtschaft [22]. Die Verordnung über Mindestanfor-

derungen an die Wasserwiederverwendung ist auf die landwirtschaftliche Bewässerung beschränkt. Neben einheitlichen Mindestanforderungen an die Wasserqualität und die Überwachung sind ein Risikomanagement und Bestimmungen zur Datentransparenz die wesentlichen Elemente der Verordnung [22]. In diesem Zusammenhang wurden vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) Stellungnahmen zu möglichen Risiken bei der Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser zur Bewässerung essbarer Pflanzen veröffentlicht [23–25]. Auch bereits behandelte Abwässer können noch Parasiten, Bakterien und Viren in krankmachenden Konzentrationen enthalten. Daher ist insbesondere darauf zu achten, dass Pflanzenteile, die üblicherweise roh verzehrt werden, nicht in direkten Kontakt mit dem Bewässerungswasser treten oder falls sich das nicht sicher vermeiden lässt, weiterhin mit Trinkwasser bewässert werden sollten. Personen, die Risikogruppen angehören, wird vom Rohverzehr abgeraten.

Lebensmittelinfektion beim Menschen; *Salmonella* (*S.*) *enterica* stellt eine wichtige Ursache für lebensmittelbedingte Ausbrüche dar. Darunter sind *S.* Enteritidis und *S.* Typhimurium die häufigsten Serovare, die zusammen für etwa 75% aller gemeldeten Salmonellose-Fälle verantwortlich sind [26]. Geflügel ist die mutmaßlich wichtigste Quelle für *Salmonella*-Infektionen beim Menschen. Insbesondere Eier und Eiprodukte spielen hier eine übergeordnete Rolle. Eine weitere wichtige Quelle stellen Schweinefleisch und Schweinefleischerzeugnisse dar [27, 28]. Es wird zunehmend berichtet, dass *Salmonella*-Infektionen auch mit dem Verzehr von Lebensmitteln nicht tierischen Ursprungs in Zusammenhang stehen [27, 29]. Dabei waren rohes Blattgemüse, Zwiebel- und Stängelgemüse, Tomaten und Melonen die am häufigsten betroffenen Produkte. Die Kontamination dieser Produkte mit Salmonellen kann sowohl

vor der Ernte (Fäkalien, Bewässerungswasser, Staub, Insekten etc.) als auch nach der Ernte (Erntegeräte, Transportbehälter, Insekten, Staub, Spülwasser, Eis, Transportfahrzeuge, Verarbeitungsgeräte) stattfinden [30].

Einfluss des Klimas auf *Salmonella*-Infektionen

In Europa werden die meisten Salmonellose-Fälle in den Sommermonaten gemeldet [28]. Die Inzidenz von Salmonellen ist in nördlichen Ländern oft geringer als in Ländern, die in wärmeren Klimazonen liegen.

Die Umgebungstemperatur kann die Entwicklung von Salmonellen auf verschiedenen Stufen der Lebensmittelkette beeinflussen: z. B. durch bakterielle Belastung bei der Herstellung roher Lebensmittel, beim Transport und bei unsachgemäßer Lagerung [31]. Die optimale Temperatur für das Wachstum von Salmonellen liegt zwischen 35°C

und 37°C. Unter 15°C ist das Wachstum der Salmonellen stark reduziert. Demzufolge vermehren sich Salmonellen bei höheren Temperaturen schneller. Die signifikante Korrelation zwischen den Außentemperaturen und den von Salmonellen verursachten Ausbrüchen ist seit längerer Zeit bekannt. Studien berichten über die Zunahme von Salmonellen, aber auch anderen bakteriellen Darmerkrankungen bei steigenden Temperaturen [32]. Laut Zhang et al. [31] ist bei einem Anstieg der mittleren wöchentlichen Höchsttemperatur um 1°C mit einem Anstieg der wöchentlichen Fallzahlen um 8,8% zu rechnen. Bei einem Anstieg der mittleren wöchentlichen Mindesttemperatur um 1°C, ist mit einem Anstieg der wöchentlichen Zahl der Erkrankungen um 5,8% zu rechnen.

Die Temperatur kann die Übertragung von Salmonellen auf Menschen über mehrere Wege beeinflussen; durch die direkte Auswirkung auf die Vermehrung von Salmonellen und die indirekte Auswirkung auf die Essgewohnheiten während der heißen Tage. Das begünstigte Wachstum von Salmonellen bei höheren Temperaturen führt in den wärmeren Monaten zu einer höheren Konzentration von Salmonellen in kontaminierten Lebensmitteln. Dies hat u. a. mit der mangelhaften Zubereitung und Kühlung von Speisen beim Grillen oder Picknick zu tun, die in diesen Monaten ebenfalls häufiger ist. Erhöhte Umgebungstemperaturen erhöhen das Risiko einer Unterbrechung der Kühlketten, was erhebliche Auswirkungen auf den mikrobiologischen Status der Lebensmittel haben kann.

Zhang et al. [33] haben einen starken Zusammenhang zwischen Trinkwasserqualität, Niederschlag und Gastroenteritis festgestellt. Dabei korrelierten die Höchst- und Min-

destemperaturen, relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag positiv mit der Zahl der Salmonellose-Fälle.

In Gebieten, in denen Niederschläge zunehmen, könnte sich die Wasserqualität verschlechtern. Starke Regenfälle können die Abflussmengen in den Flüssen und Seen erhöhen und Sedimente, Schadstoffe, Müll, tierische Abfälle und andere Materialien in die Wasserversorgung spülen. Schwere Überschwemmungen können Kläranlagen überfluten. Dies kann zu einer Verunreinigung der Umwelt von Menschen, Tieren und landwirtschaftlichen Betrieben durch Bakterien in menschlichen Abwässern führen, die nicht nur infektiös sind, sondern auch gegen antimikrobielle Mittel resistent sein können. In einem weiteren Artikel dieses Sachstandsberichts wird auf diese Problematik aus der Perspektive von gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels durch Extremwetterereignisse gesondert eingegangen (Butsch et al. [34]).

2.3 Vibrionen

Vibrionen sind Umweltbakterien, die weltweit salzhaltige Gewässer, Brackwasser und Feuchtgebiete besiedeln, aber auch in der mikrobiellen Flora aquatischer Tiere auftreten können. Für Menschen können der Wasserkontakt und die Aufnahme von *Vibrio* (V.)-haltigem Seafood (Fische, Meerestiere) problematisch werden. Als bakterielle Kontaminanten können insbesondere *V. cholerae*, *V. vulnificus* und *V. parahaemolyticus* Infektionen auslösen [35, 36]. Die humane Bedeutung der einzelnen Spezies ist regional unterschiedlich und an gebietsspezifische Faktoren gekoppelt, wie den Salzgehalt der Gewässer, die Luft- und Wassertemperaturen sowie Schwankungen, denen sie unterliegen [37].

Die Gattung *Vibrio* weist mehr als 135 Spezies auf [38], von denen drei zum Großteil für intestinale (z. B. Gastroenteritis) bzw. extraintestinale Infektionen (z. B. Mittelohrentzündung) ursächlich sind [35]. Weltweit bedeutend sind *V. cholerae* O1/O139 Serotypen mit dem Cholera-Toxin, da sie in tropischen und subtropischen Regionen mit einer mangelhaften Wasserhygiene zu pandemischen Cholera-Ausbrüchen führen können. In Europa sind bisher nur *V. cholerae* non-O1/non-O139 Serogruppen und andere *Vibrio*-Arten, auch Nicht-Cholera-Vibrionen (NCV) genannt, endemisch. *V. cholerae* non-O1/non-O139 können zu selbstlimitierenden Infektionen mit moderaten Durchfallssymptomen führen, stehen jedoch kaum im Zusammenhang mit dem Lebensmittelkonsum. Gastrointestinale Erkrankungen werden in Europa hauptsächlich mit Hämolyisierenden (*trh/tdh*)-kodierenden *V. parahaemolyticus*-Isolaten und dem Verzehr von rohem oder nicht durchgegartem Seafood in Verbindung gebracht. *V. vulnificus* hingegen spielt eine wichtige Rolle bei schweren Wundinfektionen, worauf in einem anderen Artikel dieses Sachstandsberichts eingegangen wird, der sich näher mit Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen beschäftigt (Dupke et al. [39]). Diese Spezies ist weltweit in Küstengewässern mit mäßigem Salzgehalt verbreitet und wurde auch mit tödlichen Infektionen durch den Verzehr von kontaminierten Austern in Verbindung gebracht, mit Sterblichkeitsraten bei primären Septikämien (Blutvergiftungen) von teilweise über 50% [37]. Genaue Informationen zu lebensmittelbedingten *Vibrio*-Infektionen sind bisher nicht verfügbar, da der Erregernachweis bei Durchfallerkrankungen teilweise nicht zur risikobasierten Diagnostik zählt bzw. eine Meldepflicht für humane *Vibrio*-In-

fektionen europaweit nicht existiert. Auch in Deutschland wurden seit der Einführung der Meldepflicht nach IfSG im Jahr 2020 nur Einzelfälle gastrointestinaler NCV-Infektionen erfasst, was entweder auf eine geringe Exposition mit *Vibrio*-haltigen Produkten hinweisen kann, oder auch darauf, dass ein Großteil der Erkrankungen nicht erkannt und somit nicht gemeldet wird [40].

Die Bedeutung von Fisch und Meeresfrüchten als Lebensmittel hat aufgrund ihres hohen Protein-, Vitamin- und Mineralstoffgehalts zugenommen. Der jährliche Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland wurde langjährig über Wildfang aus Gewässern gedeckt, stammt aber zunehmend aus Aquakulturen. Im Allgemeinen wird Seafood prozessiert angeboten (z. B. erhitzt, mariniert, geräuchert) und sollte damit keine oder kaum Vibrionen enthalten. Eine Gefährdung geht jedoch von rohen und ungenügend erhitzten Produkten aus [40]. Insbesondere Muscheln und Austern sind durch ihre natürliche Lebensweise, Nährstoffe aus dem Wasser zu filtrieren, prädestiniert dafür, auch geringe Mengen von Vibrionen aus dem Wasser anzureichern. Sie stellen somit ein Gesundheitsrisiko insbesondere für Personen mit geschwächtem Immunsystem oder Vorerkrankungen dar.

In Muscheln und Austern werden häufig *V. alginolyticus* (teilweise im Zusammenhang mit humanen Mittelohrentzündungen) und *V. parahaemolyticus*, selten *V. cholerae* non-O1/non-O139 und *V. vulnificus* nachgewiesen, wobei *V. alginolyticus* ganzjährig und die anderen Spezies ausschließlich in den warmen Sommer- und Herbstmonaten vorkommen [41]. Innerhalb Europas züchten verschiedene Länder (z. B. Spanien, Frankreich, Vereinigtes Königreich) Muscheln und Austern an, die z. T. stark mit toxischen

Umweltassoziierte Keime wie wasserbürtige Vibrionen finden vermehrt ihren Weg in Lebensmittel, v. a. Seafood, und sorgen für einen Anstieg der Infektionen.

Vibrionen (bis zu 25% toxinogene *V. parahaemolyticus*) belastet sind [40].

Zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung nach Exposition mit humanpathogenen *Vibrio*-Spezies liegen kaum belastbare Daten vor. Grundsätzlich korreliert das Risiko einer gesundheitlichen Beeinträchtigung mit der aufgenommenen Menge pathogener Vibrionen und ist auch abhängig von der jeweiligen Spezies. Darüber hinaus ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer gesundheitlichen Beeinträchtigung bei vulnerablen Personengruppen (YOPI: young, old, pregnant, immunocompromised people) erhöht.

Einfluss des Klimas auf *Vibrio*-Infektionen

Im weltweiten Vergleich sind lebensmittelbedingte *Vibrio*-Infektionen in Europa bislang selten, was sich im Zuge des Klimawandels zukünftig ändern kann. Grundsätzlich wirken sich Wassertemperaturen oberhalb von 12 °C sowie niedrige oder moderate Salzgehalte (1–25 g/L) begünstigend auf das Vorkommen von *Vibrio* spp. aus [36]. Optimale Wachstumsbedingungen treten in Europa bereits in den Sommermonaten an der Atlantikküste und in den Binnenmeeren auf [42]. Das Auftreten von *Vibrio* spp. wird durch die globale Erwärmung und die Zunahme von Hitzeperioden begünstigt und kann zur Ausbreitung endemischer Vibrionen und ggf. auch zur Ansiedlung neuer Pathotypen in Europa führen, sodass das humane Infektionsgeschehen insbesondere in Küstenbereichen und Ästuaren, Mündungsbereichen großer Flüsse ins Meer, zukünftig erhöht werden könnte [42, 43]. Die kontinuierliche Steigerung der Wassertemperatur wird zu einer Verstärkung der *Vibrio*-Belastung in den europäischen Fang-, Ernte-

und Zuchtgebieten von Seafood führen und sich zukünftig auch über die Sommer- und Herbstmonate hinweg ausweiten. Aktuell ist das Vorkommen pathogener Vibrionen in wechselwarmen Gewässern wie Nord- und Ostsee gering, während in Gewässern mit gleichbleibend warmen Temperaturen, aus denen Seafood z. T. importiert wird, vermehrt toxinogene NCV nachgewiesen werden [41]. In Seafood korreliert das Vorkommen der humanpathogenen Spezies ebenfalls direkt mit den Wassertemperaturen [36, 40].

Eine Minimierung des Risikos für den Menschen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Kontakt mit und dem Konsum von Seafood, ist möglich durch die Vermeidung der Exposition mit pathogenen Spezies, z. B. durch geeignete Produktverarbeitungsstrategien, thermische Behandlungen, die Einhaltung hygienischer Maßnahmen, eine strikte Kühlkette und eine gute und schnelle Überwachung unmittelbar nach dem Fang, der Ernte oder beim Import [40].

3. Parasiten

Der Klimawandel kann auch Infektionen durch Parasiten beeinflussen, vor allem wenn diese sich durch eine maßgebliche Umweltpräsenz und eine hohe Umweltstabilität auszeichnen. Dies trifft im Bereich der Parasiten insbesondere auf die Protozoen, einzellige Lebewesen, die als Parasiten leben, zu. Auch wenn tiefgründige Erkenntnisse fehlen, so deuten neuere Forschungsdaten (Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR); Daten nicht veröffentlicht) darauf hin, dass sich ein veränderndes Klima auch unmittelbar auf die Prävalenz und Virulenz dieser ohnehin bereits

Steigende Temperaturen und Luftfeuchtigkeit begünstigen Fitness und möglicherweise Virulenz von Parasiten wie Kryptosporidien und Giardien.

sehr umweltstabilen Erreger auswirkt. Eine Übertragungsgefahr auf den Menschen durch Lebensmittel besteht üblicherweise bei solchen Lebensmitteln, die roh oder unzureichend gegart verzehrt werden. Die Kontamination der Lebensmittel kann beispielsweise über Vektoren (z. B. Insekten und (lebensmittelliefernde) Säugetiere) aber auch über kontaminierte Bewässerungssysteme erfolgen. Außerdem können Lebensmittel durch Kreuzkontamination beeinträchtigt werden, wie beispielsweise bei mangelnder Küchenhygiene bei der Zubereitung von Speisen.

3.1 Kryptosporidien

Von der Protozoen-Gattung Kryptosporidien sind bislang mehr als 40 verschiedene Spezies beschrieben, die eine Vielzahl verschiedener Tierarten und auch den Menschen infizieren können. Hier sind insbesondere die Spezies *Cryptosporidium (C.) parvum* und *C. hominis* von Bedeutung, da sie für den größten Anteil der humanen Infektionen verantwortlich sind [44]. Während *C. hominis* fast ausschließlich beim Menschen vorkommt, gelten vor allem Rinder, Pferde, Ziegen und Schafe, aber auch Hunde, Katzen und Vögel als Wirte für *C. parvum* [45]. Die Infektion erfolgt über den fäkal-oralen Weg durch die Aufnahme der infektiösen Entwicklungsstadien (Oozysten). Übertragungen von Tier zu Tier, von Mensch zu Mensch, von Tier zu Mensch und umgekehrt sind möglich [46]. Die Infektion kann aber auch durch die Aufnahme von kontaminiertem Wasser erfolgen (z. B. Schwimmbad-, Fluss-, See- oder Quellwasser). Eine weitere Infektionsquelle können pflanzliche Lebensmittel darstellen, die mit verunreinigtem Wasser kontaminiert wurden.

Die Kryptosporidiose gehört zu den häufigsten Durchfallerkrankungen, die mit der Aufnahme von verunreinigtem Wasser in Verbindung gebracht wird. Im Jahr 2013 wurde in Deutschland ein Ausbruch mit 167 Erkrankungsfällen im Zusammenhang mit einer Überschwemmung nach einem Starkregenereignis registriert [47]. In Europa sind auch lebensmittelbedingte Erkrankungen beschrieben, die auf den Verzehr von Salaten zurückzuführen sind [24].

In Deutschland besteht eine Meldepflicht nach IfSG über den Nachweis von Kryptosporidien im Zusammenhang mit einer Erkrankung. Jährlich werden dem RKI zwischen 900 und 2.000 Fälle gemeldet. In Europa sind es jährlich 8.000–14.000 Fälle. Daten des Europäischen Zentrums für die Prävention und die Kontrolle von Krankheiten (European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC) zeigen, dass die Kryptosporidiose in Europa einen saisonalen Anstieg jeweils im späten Frühjahr und im Spätsommer bis Frühherbst aufweist [48].

Vor allem Kleinkinder, Personen mit geschwächtem Immunsystem, Reisende in Entwicklungsländer und Personen, die unbehandeltes Wasser trinken, weisen ein erhöhtes Infektionsrisiko auf.

Eine Infektion kann asymptomatisch oder symptomatisch verlaufen. Als Symptome sind langanhaltender wässriger Durchfall mit Gewichtsverlust, starke Bauchschmerzen oder -krämpfe, Übelkeit, Erbrechen und Kopfschmerzen beschrieben [49]. Nach der Infektion kann es zu weiteren Komplikationen (z. B. Entzündungen der Bauchspeicheldrüse, Blinddarmentzündung, Beeinträchtigung der Lunge) bis hin zum Tod kommen. Nach Rückgang der Symptome werden noch über viele Wochen die Oozysten weiterhin über den Stuhl ausgeschieden. Die Infektionsdosis bei

Mit einer Zunahme von Infektionen durch Kryptosporidien und Giardien ist zu rechnen.

Kryptosporidien ist gering und liegt, je nach Spezies, zwischen 10 und 1.000 Oozysten [50]; es wird jedoch vermutet, dass eine Oozyste für eine Infektion beim Menschen ausreichen könnte [51].

3.2 Giardien

Auch die Parasiten der Protozoen-Gattung *Giardia* können durch den Klimawandel beeinflusst werden. Giardien werden derzeit in insgesamt acht Spezies eingeteilt [52]. Die Spezies *Giardia (G.) duodenalis* (Synonyme: *G. lamblia*, *G. intestinalis*) ist jedoch die einzige Spezies dieser Gattung, die neben zahlreichen Säugetierarten auch den Menschen infizieren kann. *G. duodenalis* ist weltweit verbreitet; der Mensch wird als Hauptreservoir angesehen. Die Infektion erfolgt fäkal-oral durch die Aufnahme der infektiösen Entwicklungsstadien des Parasiten (1–10 Zysten ausreichend) mit kontaminiertem Leitungswasser oder unbehandeltem Süßwasser aus Seen oder Bächen. *Giardia*-Zysten können aber auch durch den Verzehr kontaminierter Lebensmittel oder durch engen Kontakt mit infizierten Personen oder Tieren übertragen werden [53].

Die von *G. duodenalis* hervorgerufene Erkrankung Giardiasis ist weltweit eine der häufigsten Darmparasitosen beim Menschen [54]. Die Prävalenzraten liegen in Entwicklungsländern deutlich höher als in Industrieländern. So wurden beispielsweise im Jahr 2019 dem RKI 3.296 reiseassoziierte Erkrankungsfälle übermittelt. Das hierbei am häufigsten genannte Infektionsland war Indien [26]. Allerdings wird mit weiter fortschreitender klimawandelbedingter Erwärmung auch mit vermehrten lokalen Infektionen zu rechnen sein. Säuglinge und Kleinkinder, ältere Menschen, Reisende und

immungeschwächte Personen gehören zu den Hochrisikogruppen [55]. In über 50% der Fälle verläuft die Erkrankung asymptomatisch, jedoch kann der Verlauf bei Säuglingen und älteren Menschen schwerwiegend sein [56].

In Deutschland ist der Nachweis des Erregers im Zusammenhang mit einer Erkrankung meldepflichtig.

Weltweit verursacht *G. duodenalis* Schätzungen zufolge 28,2 Millionen Fälle von Durchfallerkrankungen pro Jahr, die auf eine Kontamination von Lebensmitteln zurückzuführen sind [52]. Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (European Food Safety Authority, EFSA) hat für das Jahr 2019 in Europa 14 lebensmittelbedingte Ausbrüche und 3 Ausbrüche durch den Konsum von Wasser erfasst [57]. Angaben zu lebensmittelbedingten Ausbrüchen in Deutschland liegen bislang nicht vor.

3.3 Einfluss des Klimas auf Parasiten

Kryptosporidien und Giardien können über einen längeren Zeitraum infektiös bleiben und vor allem nach Rohverzehr kontaminierter Lebensmittel Erkrankungen auslösen.

Die hohe Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen, insbesondere die lange Überlebensfähigkeit im wässrigen Milieu, legt die Schlussfolgerung nahe, dass diese Parasiten künftig als Krankheitserreger häufiger in Erscheinung treten könnten. Durch Wetterextreme wie Starkregen und Überschwemmungen, welche im Zuge des Klimawandels auch in unseren Breiten vermehrt zu erwarten sind, erhöht sich das Risiko des Eintrags infektiöser Oozysten/Zysten in Gewässern sowie das Risiko einer Kontamination von pflanzlichen Lebensmitteln. Eine Minimierung des Risikos für den Menschen erfolgt durch eine gute Küchenhygiene.

Die Erwärmung der Ozeane führt zu einem vermehrten Wachstum Toxinproduzierender Algen, deren Toxine über Meerestiere in die Nahrungskette gelangen können.

4. Biogene Toxine mariner Herkunft

Meeresfrüchte decken mehr als 20% des Proteinbedarfs von über 3 Milliarden Menschen weltweit. Der Verbrauch von Fisch als Nahrungsmittel ist in den letzten 50 Jahren jährlich um 3,1% gestiegen [58]. Durch den Klimawandel kommt es zunehmend zu einer Erwärmung, Übersäuerung und Sauerstoffarmut der Ozeane, zu verändertem Salzgehalt des Wassers sowie zum Anstieg des Meeresspiegels. Die Temperatur des Oberflächenwassers der Ozeane hat sich stark erhöht, da mehr als 90% des globalen Temperaturanstiegs bislang von den Ozeanen absorbiert wurde [59]. Durch diese Veränderungen wird die biologische Vielfalt der Meere beeinträchtigt, was sich wiederum erheblich auf die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln, tierischem Protein und essenziellen Mikronährstoffen für Milliarden von Menschen auf der ganzen Welt auswirken kann [60, 61].

Die genannten Faktoren können sich auch auf das Vorkommen und die Zusammensetzung des marinen Phytoplanktons auswirken. Planktonische Mikroalgen bilden die Grundlage des aquatischen Nahrungsnetzes, können aber bei einem massenhaften Auftreten schädliche Auswirkungen haben. Das Phänomen des plötzlichen, explosiven Wachstums von Algen wird als Algenblüte bezeichnet. Wenn diese Blüten negative Folgen haben, indem sie z. B. hypoxische oder anoxische Bedingungen schaffen (Sauerstoffmangel oder vollständiges Fehlen von Sauerstoff) oder Toxine produzieren, werden sie als schädliche Algenblüten (harmful algal blooms, HABs) bezeichnet. HABs haben das Potenzial, die Fischgemeinschaft und Nahrungsnetze zu stören, und können sogar zu massivem Artensterben führen [62]. Derzeit sind ca. 300 Mikroalgen-Arten bekannt,

die an der Entstehung solcher Algenblüten beteiligt sein können. Von diesen können rund 100 Arten Toxine bilden, die bei Tier und Mensch zu spezifischen toxischen Syndromen führen können.

Marine Biotoxine gelangen durch wasserfiltrierende und algenfressende Organismen, wie Schalentieren und Fische, in die Nahrungskette und können somit aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen [63, 64]. Weiterhin kann eine Exposition gegenüber den Toxinen, die von marinem Phytoplankton gebildet werden, inhalativ oder dermal durch Aerosole erfolgen, die Toxine und Zellfragmente enthalten und zu Hautreizungen und Atemwegsbeschwerden führen können [65, 66].

Der Klimawandel verändert die geografische Verteilung einiger Algenspezies, die an der Bildung von HABs beteiligt sein können. Warmwasser-Arten können sich z. B. polwärts ausbreiten und in Gegenden auftreten, in denen sie bisher nicht heimisch waren. In diesem Zusammenhang ist die Identifizierung und die Untersuchung der geografischen Verteilung der Toxinproduzierenden Organismen von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung geeigneter Präventiv- und Kontrollmaßnahmen vor der Ernte bzw. beim Vertrieb und dem Verkauf von Meeresfrüchten. Dies ist insbesondere wichtig, da marine Biotoxine im Normalfall organoleptisch (durch Geruch, Geschmack oder Aussehen) nicht wahrnehmbar sind und in der Regel durch Kochen, Einfrieren oder andere Lebensmittelzubereitungsprozesse nicht zerstört werden.

Im Sinne des vorsorglichen gesundheitlichen Verbraucherschutzes wurden innerhalb der EU Höchstgehalte für fünf verschiedene Toxin-Gruppen in lebenden Muscheln

festgelegt. Weiterhin dürfen Produkte, die Verbindungen der Ciguatoxin-Gruppe enthalten und beim Menschen eine leichte bis schwere Vergiftung (Ciguatera) hervorrufen können [67], innerhalb der EU nicht in Verkehr gebracht werden [68, 69].

5. Fazit und Handlungsempfehlungen

Klimaveränderungen wirken sich auf verschiedene Habitate aus, die sich durch Wetterereignisse wie langanhaltende Trockenperioden, Temperaturerhöhung und Starkregen verändern können. Diese Veränderungen beeinflussen auch die aus diesen Habitaten gewonnenen Lebensmittel und Mikroorganismen bzw. Toxine, die mit diesen Lebensmitteln assoziiert sein können. So können Lebensmittel stärker mit krankmachenden Keimen belastet sein oder Keime enthalten, die bisher in einer Region noch nicht vorkamen. Aber auch indirekt wirken sich klimabedingte Ereignisse auf Lebensmittel aus. So wird beispielsweise durch eine immer weiter zunehmende Wasserknappheit häufiger auf aufbereitete Abwässer zur Bewässerung von Lebensmitteln zurückgegriffen. Weil auch solche Abwässer noch Parasiten, Bakterien und Viren in krankmachenden Konzentrationen enthalten können, sollten Pflanzenteile, die üblicherweise roh verzehrt werden, nicht mit aufbereiteten Abwässern in Berührung kommen, oder weiterhin mit Trinkwasser bewässert werden [23–25]. Es ist damit zu rechnen, dass der fortschreitende Klimawandel zu einem Anstieg der hier diskutierten Infektionen und Intoxikationen in Deutschland führt und diese somit ein wachsendes Public-Health-Risiko darstellen.

Handlungsempfehlungen zur Minimierung des Gesundheitsrisikos durch lebensmittelbedingte Infektionen und Intoxikationen sehen wir insbesondere in der Küchenhygiene, auf die bei der Zubereitung von Speisen stets geachtet werden sollte. Hierzu gehören das gründliche Händewaschen und die Verwendung frischer Küchenutensilien nach dem Bearbeiten von rohem Fleisch und Fisch, sowie die Vermeidung von Kreuzkontaminationen, d. h. einer direkten oder indirekten Keimübertragung von einem Lebensmittel auf ein anderes Lebensmittel. Durch das Tragen von Handschuhen kann das Eindringen von Erregern über unbemerkte Hautverletzungen vermieden werden. Die Sicherheit von Lebensmitteln hängt zudem in hohem Maße davon ab, ob die Kühlkette aufrechterhalten wird. Außerdem lassen sich durch einen ausreichenden Erhitzungsprozess die meisten mikrobiologischen Erreger sicher abtöten, bei der Zubereitung von Seafood ist z. B. eine Kerntemperatur von 70 °C für mindestens zwei Minuten einzuhalten. Mit Lebensmitteln assoziierte biogene Toxine hingegen sind weitestgehend temperaturunempfindlich [40, 70, 71].

Ein weiteres Feld für Handlungsempfehlungen betrifft die Nutzung neuer Technologien zur Verfolgung von Lieferketten. Angesichts eines globalisierten Vertriebsnetzes für Lebensmittel sowie des Einsatzes verschiedener Verarbeitungs- und Konservierungstechniken kann es schwierig sein, die Lieferkette eines Produkts zu verfolgen und so die potenziellen Risiken zu ermitteln. Der technische Fortschritt hat hierfür digitale Lösungen hervorgebracht. So können beispielsweise Kenntnisse über Fischbestände, die Rückverfolgbarkeit von Seafood und die Transparenz von Lieferketten von innovativen Ansätzen profitieren. Hierzu zählen z. B. Blockchain oder Radio Frequency Identification

Device Tags zur Produktauthentifizierung (einschließlich Arten- und Fangdaten) sowie Anwendungen von maschinellem Lernen, Data Mining, künstlicher Intelligenz und weiteren digitalen Technologien [72]. Diese Methoden digital gestützter Lebensmittelversorgungsketten können die nachhaltige Entwicklung in der Lebensmittelindustrie unterstützen, die zum Ziel hat, verantwortungsvolle und ethische Erzeugerinnen und Erzeuger zu belohnen und illegale oder unethisch hergestellte Erzeugnisse aus den Lieferketten fernzuhalten [73].

Weitere Forschung, z. B. zu den Zusammenhängen von klimatischen Veränderungen und Erkrankungsfällen, oder zur geografischen Verteilung von Toxin-produzierenden Organismen, ist nötig.

Korrespondenzadresse

Dr. Martin H. Richter
Bundesinstitut für Risikobewertung
Abteilung Biologische Sicherheit
Max-Dohrn-Str. 8–10
10589 Berlin
E-Mail: Martin.Richter@bfr.bund.de

Zitierweise

Dietrich J, Hammerl JA, Johne A, Kappenstein O, Loeffler C et al. (2023)
Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte
Infektionen und Intoxikationen
J Health Monit 8(S3): 85–101.
DOI 10.25646/11393

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Datenschutz und Ethik

Dieser Artikel enthält Angaben zu eigenen Forschungsergebnissen, die unter Einhaltung ethischer Richtlinien und der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) durchgeführt wurden.

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Beiträge der Autorinnen und Autoren

Campylobacter: Rosner B

Salmonellen: Szabo I

Vibrionen: Hammerl JA, Richter MH

Parasiten: Johne A, Nöckler K, Richter MH

Biogene Toxine: Dietrich J, Spielmeier A, Loeffler C, Kappenstein O

Alle Autorinnen und Autoren haben vergleichbare Beiträge geleistet.

Danksagung

Das RKI-Koordinationssteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maïke Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Mora C, McKenzie T, Gaw IM et al. (2022) Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nat Clim Chang* 12(9):869–875
2. Thebo AL, Drechsel P, Lambin EF et al. (2017) A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. *Environ Res Lett* 12(7):074008
3. Beermann S, Dobler G, Faber M et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. *J Health Monit* 8(S3):36–66. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
4. Wingstrand A, Neimann J, Engberg J et al. (2006) Fresh chicken as main risk factor for campylobacteriosis, Denmark. *Emerg Infect Dis* 12(2):280–285
5. European Food Safety Authority (2010) Scientific opinion on quantification of the risk posed by broiler meat to human campylobacteriosis in the EU. *EFSA Journal* 8(1):1437
6. Rosner BM, Schielke A, Didelot X et al. (2017) A combined case-control and molecular source attribution study of human *Campylobacter* infections in Germany, 2011–2014. *Sci Rep* 7(1):5139
7. Stingl K, Knuver MT, Vogt P et al. (2012) Quo vadis? – Monitoring *Campylobacter* in Germany. *Eur J Microbiol Immunol (Bp)* 2(1):88–96
8. Schonberg-Norio D, Takkinen J, Hanninen ML et al. (2004) Swimming and *Campylobacter* infections. *Emerg Infect Dis* 10(8):1474–1477
9. Hyllestad S, Iversen A, MacDonald E et al. (2020) Large water-borne *Campylobacter* outbreak: Use of multiple approaches to investigate contamination of the drinking water supply system, Norway, June 2019. *Euro Surveill* 25(35):2000011
10. Patrick ME, Christiansen LE, Waino M et al. (2004) Effects of climate on incidence of *Campylobacter* spp. in humans and prevalence in broiler flocks in Denmark. *Appl Environ Microbiol* 70(12):7474–7480
11. Ishihara K, Takahashi R, Andoh M et al. (2012) Effects of climatic elements on *Campylobacter*-contaminated chicken products in Japan. *Epidemiol Infect* 140(6):991–996
12. Williams MS, Golden NJ, Ebel ED et al. (2015) Temporal patterns of *Campylobacter* contamination on chicken and their relationship to campylobacteriosis cases in the United States. *Int J Food Microbiol* 208:114–121
13. Meldrum RJ, Griffiths JK, Smith RM et al. (2005) The seasonality of human *Campylobacter* infection and *Campylobacter* isolates from fresh, retail chicken in Wales. *Epidemiol Infect* 133(1):49–52
14. David JM, Pollari F, Pintar KD et al. (2017) Do contamination of and exposure to chicken meat and water drive the temporal dynamics of *Campylobacter* cases? *Epidemiol Infect* 145(15):3191–3203
15. Rushton SP, Sanderson RA, Diggle PJ et al. (2019) Climate, human behaviour or environment: Individual-based modelling of *Campylobacter* seasonality and strategies to reduce disease burden. *J Transl Med* 17(1):34
16. Louis VR, Gillespie IA, O'Brien SJ et al. (2005) Temperature-driven *Campylobacter* seasonality in England and Wales. *Appl Environ Microbiol* 71(1):85–92
17. Oberheim J, Hoser C, Luchters G et al. (2020) Small-scaled association between ambient temperature and campylobacteriosis incidence in Germany. *Sci Rep* 10(1):17191
18. Soneja S, Jiang C, Romeo Upperman C et al. (2016) Extreme precipitation events and increased risk of campylobacteriosis in Maryland, U.S.A. *Environ Res* 149:216–221
19. Kuhn KG, Nygard KM, Guzman-Herrador B et al. (2020) *Campylobacter* infections expected to increase due to climate change in Northern Europe. *Sci Rep* 10(1):13874
20. Sterk A, Schijven J, de Roda Husman AM et al. (2016) Effect of climate change on runoff of *Campylobacter* and *Cryptosporidium* from land to surface water. *Water Res* 95:90–102
21. Duchenne-Moutien RA, Neetoo H (2021) Climate change and emerging food safety issues: A Review. *J Food Prot* 84(11):1884–1897
22. Umweltbundesamt (2021) Neue EU-Verordnung zu Wasserwiederverwendung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaften/wasserwiederverwendung/neue-eu-verordnung-zu-wasserwiederverwendung> (Stand: 15.01.2023)

23. Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2020) Aufbereitete Abwässer: Bakterielle Krankheitserreger auf frischem Obst und Gemüse vermeiden. <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/aufbereitete-abwaesser-bakterielle-krankheitserreger-auf-frischem-obst-und-gemuese-vermeiden.pdf> (Stand: 15.01.2023)
24. BfR (2022) Aufbereitete Abwässer: Protozoen auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden. <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/aufbereitete-abwaesser-protozoen-auf-pflanzlichen-lebensmitteln-vermeiden.pdf> (Stand: 15.01.2023)
25. BfR (2022) Aufbereitete Abwässer: Virale Krankheitserreger auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/aufbereitete-abwaesser-virale-krankheitserreger-auf-pflanzlichen-lebensmitteln-vermeiden.pdf> (Stand: 15.01.2023)
26. Falkenhorst G, Enkelmann J, Frank C et al. (2020) Zur Situation bei wichtigen Infektionskrankheiten – Reiseassoziierte Krankheiten 2019. *Epid Bull* 50:7–20
27. Interagency Food Safety Analytics Collaboration (2021) Food-borne illness source attribution estimates for 2019 for *Salmonella*, *Escherichia coli* O157, *Listeria monocytogenes* and *Campylobacter* using multi-year outbreak surveillance data, United States. Department of Health and Human Services' Centers for Disease Control and Prevention and U.S. Food and Drug Administration; U.S. Department of Agriculture's Food Safety and Inspection Service. <https://www.cdc.gov/foodsafety/ifsac/pdf/P19-2019-report-TriAgency-508.pdf> (Stand: 15.01.2023)
28. EFSA, ECDC (2021) The European Union One Health 2020 zoonoses report. *EFSA Journal* 19(12):6971
29. Olaimat AN, Holley RA (2012) Factors influencing the microbial safety of fresh produce: A review. *Food Microbiol* 32(1):1–19
30. Beuchat LR (2002) Ecological factors influencing survival and growth of human pathogens on raw fruits and vegetables. *Microbes Infect* 4(4):413–423
31. Zhang Y, Bi P, Hiller JE (2010) Climate variations and *Salmonella* infection in Australian subtropical and tropical regions. *Sci Total Environ* 408(3):524–530
32. Akil L, Ahmad HA, Reddy RS (2014) Effects of climate change on *Salmonella* infections. *Foodborne Pathog Dis* 11(12):974–980
33. Zhang Y, Bi P, Hiller J (2008) Climate variations and salmonellosis transmission in Adelaide, South Australia: A comparison between regression models. *Int J Biometeorol* 52(3):179–187
34. Butsch C, Beckers LM, Nilson E et al. (demnächst) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. *J Health Monit*. www.rki.de/jhealthmonit
35. Farmer III, JJ, Janda JM, Brenner FW et al. (2015) *Vibrio*. In: Whitman WB (Hrsg) *Bergey's manual of systematics of archaea and bacteria*. John Wiley & Sons, Inc., in association with Bergey's Manual Trust, S. 1–79
36. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), WHO (2020) Risk assessment tools for *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus* associated with seafood. Microbiological risk assessment series;20. Rome. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330867> (Stand: 15.01.2023)
37. Centers for Disease Control and Prevention (2019) *Vibrio* and food. <https://www.cdc.gov/vibrio/food.html> (Stand: 15.01.2023)
38. DSMZ (2022) LPSN - List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature. Genus *Vibrio*. <https://lpsn.dsmz.de/genus/vibrio> (Stand: 15.01.2023)
39. Dupke S, Buchholz U, Fastner J et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen. *J Health Monit* 8(S3): 67–84. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 01.06.2023)
40. BfR (2022) Bakterielle Lebensmittelinfektionen durch Vibrionen: Gesundheitliche Bewertung zum Vorkommen von *Vibrio* spp. (Nicht-Cholera-Vibrionen) in Lebensmitteln. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/bakterielle-lebensmittelinfektionen-durch-vibrionen-gesundheitliche-bewertung-zum-vorkommen-von-vibrio-spp-in-lebensmitteln.pdf> (Stand: 15.01.2023)
41. Martinez-Urtaza J, Bowers JC, Trinanes J et al. (2010) Climate anomalies and the increasing risk of *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus* illnesses. *Food Res Int* 43(7):1780–1790
42. Baker-Austin C, Oliver JD, Alam M et al. (2018) *Vibrio* spp. infections. *Nat Rev Dis Primers* 4(1):8

43. Vezzulli L, Baker-Austin C, Kirschner A et al. (2020) Global emergence of environmental non-O1/O139 *Vibrio cholerae* infections linked with climate change: A neglected research field? *Environ Microbiol* 22(10):4342–4355
44. O’Leary JK, Blake L, Corcoran GD et al. (2021) Development of a novel, high resolution melting analysis based genotyping method for *Cryptosporidium parvum*. *Eur J Protistol* 79:125799
45. Bouzid M, Hunter PR, Chalmers RM et al. (2013) *Cryptosporidium* pathogenicity and virulence. *Clin Microbiol Rev* 26(1):115–134
46. Davies AP, Chalmers RM (2009) Cryptosporidiosis. *BMJ* 339:b4168
47. Gertler M, Durr M, Renner P et al. (2015) Outbreak of *Cryptosporidium hominis* following river flooding in the city of Halle (Saale), Germany, August 2013. *BMC Infect Dis* 15:88
48. Caccio SM, Chalmers RM (2016) Human cryptosporidiosis in Europe. *Clin Microbiol Infect* 22(6):471–480
49. Carter BL, Chalmers RM, Davies AP (2020) Health sequelae of human cryptosporidiosis in industrialised countries: A systematic review. *Parasit Vectors* 13(1):443
50. RKI (2004) RKI-Ratgeber Infektionskrankheiten – Merkblätter für Ärzte. Kryptosporidiose. *Epid Bull* 34:279–281
51. Hamilton KA, Waso M, Reyneke B et al. (2018) *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater and surface water environments. *J Environ Qual* 47(5):1006–1023
52. Ryan U, Hijjawi N, Feng Y et al. (2019) *Giardia*: An under-reported foodborne parasite. *Int J Parasitol* 49(1):1–11
53. Burnett MW (2018) Giardiasis. *J Spec Oper Med* 18(1):106–107
54. Certad G, Viscogliosi E, Chabe M et al. (2017) Pathogenic mechanisms of *Cryptosporidium* and *Giardia*. *Trends Parasitol* 33(7):561–576
55. Leung AKC, Leung AAM, Wong AHC et al. (2019) Giardiasis: An overview. *Recent Pat Inflamm Allergy Drug Discov* 13(2):134–143
56. Rumsey P, Waseem M (2021) *Giardia* *Lambli*a Enteritis. In: StatPearls. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL)
57. EFSA, ECDC (2021) The European Union One Health 2019 zoonoses report. *EFSA Journal* 19(2):6406
58. FAO (2020) The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cag229en/> (Stand: 15.01.2023)
59. IPCC (2019) Summary for Policymakers. In: Pörtner HO, Roberts DC, Masson-Delmotte V et al. (Hrsg) Intergovernmental Panel on Climate change special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, NY, USA, S. 3–35. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/097A895553D86981DFE6195ADFD3DDA4/stamped-9781009157971pre2_3-36.pdf/summary_for_policy-makers.pdf (Stand: 16.01.2023)
60. Hicks CC, Cohen PJ, Graham NAJ et al. (2019) Harnessing global fisheries to tackle micronutrient deficiencies. *Nature* 574(7776):95–98
61. Falkenberg LJ, Bellerby RGJ, Connell SD et al. (2020) Ocean acidification and human health. *Int J Environ Res Public Health* 17(12):4563
62. Kudela RM, Berdalet E, Bernard S et al. (2015) Harmful algal blooms: A scientific summary for policy makers. Intergovernmental Oceanographic Commission, Scientific Committee on Oceanic Research, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233419> (Stand: 15.01.2023)
63. Friedman MA, Fernandez M, Backer LC et al. (2017) An updated review of ciguatera fish poisoning: Clinical, epidemiological, environmental, and public health management. *Mar Drugs* 15(3):72
64. Food and Drug Administration (2020) Fish and fishery products hazards and controls guidance. Fourth Edition U.S. Food Drug Administration. <https://www.fda.gov/media/80637/download> (Stand: 15.01.2023)
65. Ciminiello P, Dell’Aversano C, Iacovo ED et al. (2014) First finding of *Ostreopsis cf. ovata* toxins in marine aerosols. *Environ Sci Technol* 48(6):3532–3540
66. Pierce R, Henry M, Blum P et al. (2003) Brevetoxin concentrations in marine aerosol: Human exposure levels during a *Karenia brevis* harmful algal bloom. *Bull Environ Contam Toxicol* 70(1):161

67. FAO, WHO (2020) Report of the expert meeting on ciguatera poisoning: Rome, 19–23 November 2018. Food safety and quality series; 9. Rome.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/332640>
(Stand: 15.01.2023)
68. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (2010) Scientific opinion on marine biotoxins in shellfish – Emerging toxins: Ciguatoxin group. EFSA Journal 8(6):1627
69. Verordnung (EG) Nr. 853/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 mit spezifischen Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs. Amtsblatt der Europäischen Union L 139/55, Vol 47.
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R0853R\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R0853R(01)&from=EN) (Stand: 24.01.2023)
70. BfR (2018) Wildfleisch: Gesundheitliche Bewertung von humanpathogenen Parasiten.
<https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/wildfleisch-gesundheitliche-bewertung-von-humanpathogenen-parasiten.pdf>
(Stand: 15.01.2023)
71. BfR (2019) Schutz vor lebensmittelbedingten Infektionen mit *Campylobacter*.
<https://www.bfr.bund.de/cm/350/verbrauchertipps-schutz-vor-lebensmittelbedingten-infektionen-mit-campylobacter.pdf>
(Stand: 15.01.2023)
72. Loeffler CR, Tartaglione L, Friedemann M et al. (2021) Ciguatera mini review: 21st century environmental challenges and the interdisciplinary research efforts rising to meet them. Int J Environ Res Public Health 18(6):3027
73. Tsolakis N, Niedenzu D, Simonetto M et al. (2020) Supply network design to address United Nations Sustainable Development Goals: A case study of blockchain implementation in Thai fish industry. J Bus Res 131:495–519

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**



Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11395

Robert Koch-Institut, Berlin

Annika Meinen, Sara Tomczyk, Flora Noelle
Wiegand, Muna Abu Sin, Tim Eckmanns,
Sebastian Haller

Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionsepidemiologie

Eingereicht: 15.11.2022

Akzeptiert: 06.02.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel

Abstract

Hintergrund: Antimikrobielle Resistenz (AMR) gehört neben dem Klimawandel zu den zehn größten globalen Bedrohungen für Public Health. Hier werden Auswirkungen des Klimawandels wie Temperaturanstieg, Veränderung der Luftfeuchtigkeit oder des Niederschlags auf die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen und auf Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien in Deutschland zusammengefasst.

Methode: Es wurde ein Literaturreview durchgeführt, der Artikel einschloss, die zwischen Januar 2012 und Juli 2022 veröffentlicht wurden. Zwei Autorinnen sichteten Titel, Abstracts und Volltexte und extrahierten die Daten systematisch.

Ergebnisse: Von 2.389 potenziell relevanten Titeln erfüllten sechs Studien die Einschlusskriterien. Sie zeigen, dass ein Anstieg der Umgebungstemperatur zu höheren Antibiotikaresistenzraten und einem erhöhten Risiko für Besiedlung mit und Verbreitung von antibiotikaresistenten Erregern führen kann. Weiterhin steigt die Anzahl nosokomialer Infektionen. Einige Studien zeigen einen höheren Antibiotikaverbrauch bei wärmeren Durchschnittstemperaturen.

Schlussfolgerungen: Für Europa liegen nur wenige Studien vor, jedoch deuten sie darauf hin, dass die AMR-Krankheitslast durch den Klimawandel weiter verstärkt wird. Weitere Studien sind notwendig, um die Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und AMR zu untersuchen und gezielte Präventionsmaßnahmen weiterzuentwickeln.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

◆ KLIMAWANDEL · ANTIMIKROBIELLE RESISTENZ UND VERBRAUCH · NOSOKOMIALE INFESTIONEN

1. Einführung

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf die weltweite Krankheitslast, und es gibt ausreichend Anhaltspunkte dafür, dass jetzt gehandelt werden muss, um die Klimakrise abzumildern. Es bleibt jedoch schwierig, die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Krankheiten zu quantifizie-

ren. Die Komplexität der vom Klima abhängigen Faktoren, die wiederum Infektionskrankheiten beeinflussen, stellt eine Herausforderung für die Berechnungen und Modellierungen zu deren Auswirkungen dar.

Seitdem antimikrobielle Substanzen zur Verfügung stehen, sind Infektionen durch Bakterien, Viren, Pilze und Parasiten behandelbar geworden. Durch übermäßigen und nicht

Der Klimawandel und AMR gehören zu den größten und komplexesten Bedrohungen für die Welt. Beide werden durch menschliches Handeln verschärft, können aber durch veränderte Handlungsweisen eingedämmt werden.

sachgerechten Einsatz von antimikrobiellen Arzneimitteln werden diese Erreger jedoch zunehmend resistent. Im Jahr 2019 erklärte die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) antimikrobielle Resistenz (AMR) neben dem Klimawandel zu einer der zehn größten globalen Bedrohungen für die öffentliche Gesundheit der Menschheit [1, 2]. Laut einer aktuellen Studie zur globalen Krankheitslast durch AMR standen im Jahr 2019 schätzungsweise 4,95 Millionen Todesfälle mit bakteriellen AMR-Infektionen in Verbindung (d. h. Todesfälle aufgrund einer Infektion mit resistenten Bakterien, z.T. zurückzuführen auf Antibiotikaresistenz, z. T. auf den Krankheitsverlauf der bakteriellen Infektion). Die Anzahl der Todesfälle aufgrund einer bakteriellen Infektion, bei denen die Antibiotikaresistenz, also die nicht Behandelbarkeit der Infektion allein Ursache des Versterbens war, lag bei 1,27 Millionen [3]. Cassini et al. [4] schätzten die Krankheitslast durch Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien in europäischen Ländern im Jahr 2015 ein und identifizierten vier antibiotikaresistente Bakterien mit der größten Auswirkung auf die menschliche Gesundheit: 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *Escherichia coli* (*E. coli*), Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), Carbapenem-resistente *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) und 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *Klebsiella pneumoniae* (*K. pneumoniae*). Diese Ergebnisse wurden kürzlich von Mestrovic et al. [5] in einer weiteren europäischen systematischen Analyse aus dem Jahr 2019 bestätigt. In dieser Studie wurden die regionalen Unterschiede in der AMR-Krankheitslast in Europa untersucht, wobei sich zeigte, dass die AMR-Krankheitslast in Ländern des Mittelmeerraums, wie Griechenland oder Italien, höher ist als in Ländern des nordeuropäischen

Raums. Dies könnte unter anderem mit klimatischen Unterschieden zusammenhängen [4]. Darüber hinaus schätzt die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD), dass 75% der AMR-Krankheitslast auf nosokomiale Infektionen (healthcare-associated infections, HAIs) zurückzuführen sind [6].

Es ist bekannt, dass die Temperatur, welche aufgrund des Klimawandels steigen könnte [7], Auswirkungen auf das Wachstum und die Vermehrung von Bakterien hat. Die optimale Wachstumstemperatur für viele Bakterien liegt bei über 30 °C [8]. Es gibt Hinweise darauf, dass der Plasmidtransfer und möglicherweise auch der Gentransfer von Resistenzgenen durch eine höhere Temperatur begünstigt werden [9]. Kürzlich wurden auch Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Klimafaktoren wie der Temperatur und AMR gefunden. So stellen MacFadden et al. [10] fest, dass AMR bei verbreiteten Krankheitserregern wie *S. aureus*, *E. coli* und *K. pneumoniae* mit steigender Temperatur zunimmt.

In der vorliegenden Übersichtsarbeit werden die wichtigsten Auswirkungen zusammengefasst, die der Klimawandel auf die Ausbreitung und Belastung durch AMR beim Menschen in Deutschland und Europa haben könnte. Hierfür wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und ein grafisches Modell angepasst.

2. Methode

Die systematische Literatursuche beschränkte sich auf durch Peer Review begutachtete Artikel, die zwischen Januar 2012 und Juli 2022 in englischer, französischer oder deut-

scher Sprache veröffentlicht wurden. Die Literaturdatenbank PubMed wurde mit den englischen Schlüsselbegriffen für Klimawandel, Temperatur, HAIs und AMR durchsucht, einschließlich der MeSH-Begriffe für Klimawandel, globale Erwärmung, klimatische Prozesse und antibakterielle Wirkstoffe sowie Antibiotikaresistenz. Der vollständige englische Suchstring ist im [Annex](#) dokumentiert. Weitere Literatur wurde durch Suche in Literaturverzeichnissen ausgewählter Artikel gefunden. Es wurden nur Studien berücksichtigt, die Länder der Europäischen Union (EU) und/oder des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) einschließen, sowie Primäranalysen oder Reviews (z. B. wurden Editorials ausgeschlossen). Bei dieser systematischen Übersichtsarbeit wurde die PRISMA-Erklärung (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) berücksichtigt [11].

Zwei Autorinnen (A.M. und F.W.) überprüften unabhängig voneinander Titel, Abstracts sowie Volltexte und extrahierten systematisch die folgenden Daten: Zitierung, Studienzeitraum, Studiendesign, demografische Daten, Klimaindikatoren, Definition der Ergebnisse als Erreger und/oder Antibiotikaresistenz und/oder analysierte Infektionen. Unstimmigkeiten wurden durch Diskussion gelöst bis ein Konsens erzielt wurde. Die Daten wurden in Tabellen zusammengefasst und nach Arzneimittelresistenz, Krankheitserreger und Art der Infektion stratifiziert.

Darüber hinaus wurde das von Mora et al. [12] bereitgestellte Webtool genutzt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf AMR-Erreger zu veranschaulichen. Auf der Grundlage einer umfassenden Übersichtsarbeit zu verfügbarer Literatur und Daten ermöglicht das Tool die Modellierung der Übertragungswege, durch die sich klimati-

sche Risiken auf bestimmte Krankheiten auswirken. Die Autorinnen und Autoren haben die Erkenntnisse über globale Klimarisiken umfassend bewertet. Wir haben für diese Arbeit das Modell angepasst und den Fokus auf die wichtigsten AMR-Erreger nach Cassini et al. [4] in Europa gelegt.

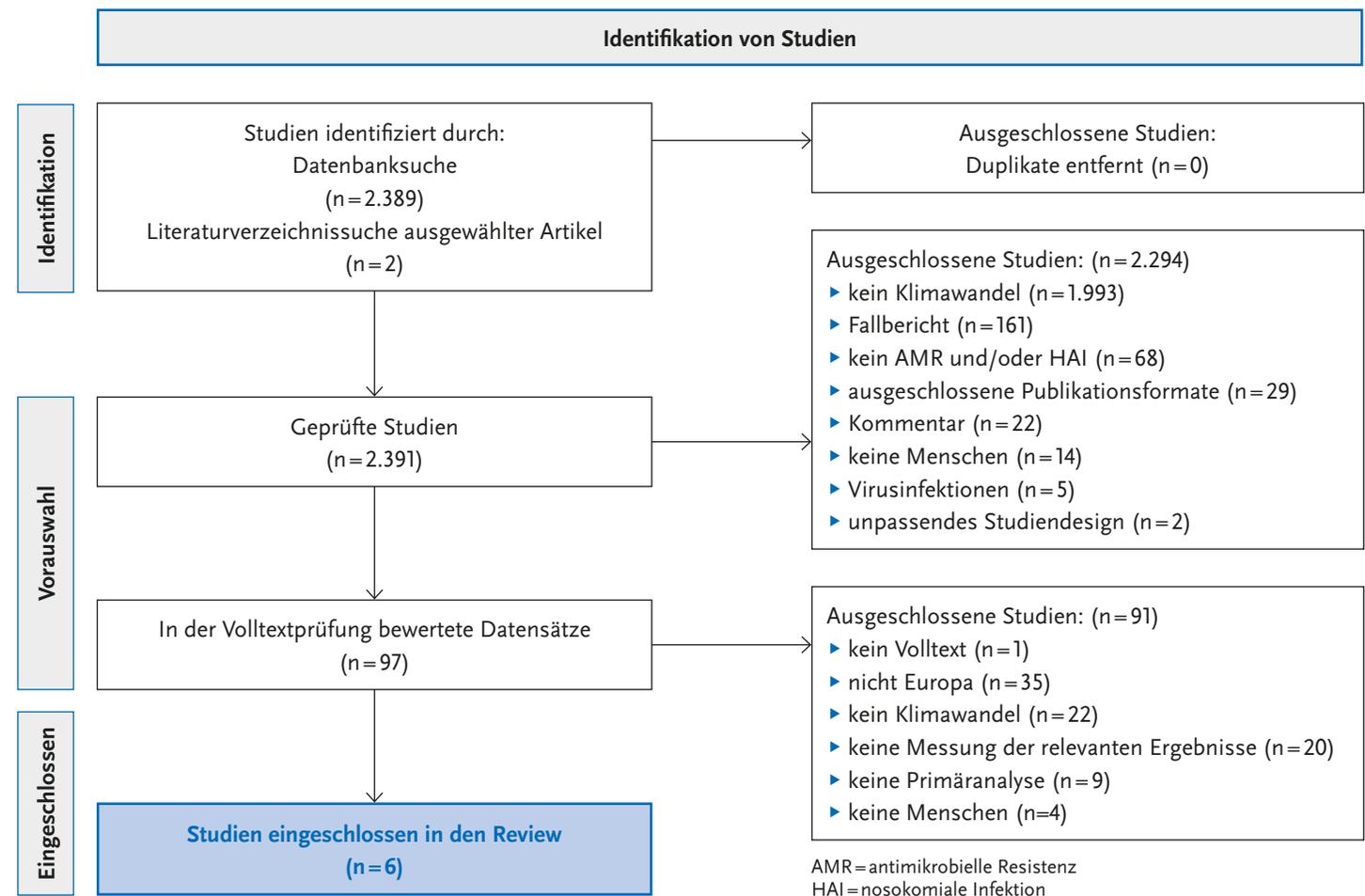
3. Ergebnisse

Auf Basis der systematischen Suche wurden insgesamt 2.389 Titel ermittelt ([Abbildung 1](#)). Nach Ausschluss von Duplikaten und dem Screening der verbleibenden Titel und Abstracts blieben 97 Publikationen für die Volltextauswertung übrig. Von diesen erfüllten nur sechs Studien unsere Einschlusskriterien ([Tabelle 1](#)). Da sich der vorliegende Beitrag auf die Situation in Deutschland und den EU/EWR-Ländern konzentriert, werden die außereuropäischen Studien (n=35) für diese Übersichtsarbeit ausgeschlossen. Die eingeschlossenen Studien waren vorwiegend Beobachtungsstudien.

3.1 Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Auftreten von AMR

Anhand von Daten des European Antimicrobial Resistance Surveillance Network (EARS-Net) zeigten McGough et al. [14], dass AMR bei *E. coli* und *K. pneumoniae* zwischen 2000 und 2016 zunahm, während die Zahl der Methicillinresistenten *S. aureus* (MRSA) im Laufe der Zeit zurückging. Der Rückgang der MRSA-Nachweise wird gemeinhin auf gezielte Maßnahmen zurückgeführt und kann eher nicht durch Klimaindikatoren erklärt werden [19]. Kaba et al. [13]

Abbildung 1
Darstellung der Literatursuche in Anlehnung
an das PRISMA-Flussdiagramm [11]



und McGough et al. [14] zeigten eine Korrelation zwischen wärmeren Temperaturen (ausgedrückt als mittlere Temperatur oder als minimale Umgebungstemperatur) und einer Zunahme der Antibiotikaresistenz. Die mittlere Temperatur der warmen Jahreszeit wurde als Prädiktor für MRSA, multiresistente *E. coli* (MREC) und Carbapenem-resistente *K. pneumoniae* (CRKP) ermittelt.

Es zeigte sich, dass mit steigender Durchschnittstemperatur die Raten von MRSA, MREC und CRKP zunehmen [13]. Darüber hinaus wiesen McGough et al. [14] nach, dass AMR bei höheren Temperaturen schneller zunimmt. In wärmeren Ländern, in denen die Durchschnittstemperatur 10°C höher ist als die allgemeine Durchschnittstemperatur in europäischen Ländern, wurde eine erhöhte Änderungsrate

Tabelle 1

Informationen zu den sechs Studien, die die Einschlusskriterien erfüllten. Die Studien sind nach Autor, gemessener Exposition (Klimafaktoren), Ergebnis (AMR und/oder Infektion) sortiert, die Ergebnisse sind zusammengefasst.

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Kaba [13], 2020	2011–2016	30 Länder (alle EU- und EWR-Mitglieder, sowie Island und Norwegen)	EARS-Net-Surveillancedaten (Routine-AST-Ergebnisse werden von klinischen Laboren durch das nationale Netzwerk gesammelt); historische Temperaturdaten	Ökologische Beobachtungsstudie	Historische monatliche Durchschnittstemperatur	Jährliche nationale AMR-Prävalenz (CRPA, CRKP, MREC, MRSA)	Signifikante Korrelation zwischen der mittleren Temperatur der warmen Jahreszeit (Mai–Oktober) und MRSA ($R_s=0,826$), MREC ($R_s=0,718$) und CRKP ($R_s=0,798$); Korrelation zwischen der mittleren Temperatur der kalten Jahreszeit (November–April) und MRSA ($R_s=0,691$); Korrelation mit der Netto-Temperaturänderung in der warmen Jahreszeit und CRPA ($R_s=0,748$) und MREC ($R_s=0,617$); die mittlere Temperatur in der warmen Jahreszeit ist ein signifikanter Prädiktor für MRSA, MREC und CRKP, aber nicht für CRPA.
McCough [14], 2020	2000–2016	28 europäische Länder (alle EU- und EWR-Mitglieder sowie Island, Norwegen und das Vereinigte Königreich)	EARS-Netz-Surveillancedaten (Routine-AST-Ergebnisse werden von klinischen Laboren durch das nationale Netzwerk gesammelt); modellierte und assimilierte meteorologische Daten, verfügbar unter Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)	Ökologische Beobachtungsstudie	Jährliche minimale Umgebungstemperatur	Jährliche nationale AMR-Prävalenz (Aminopenicilline (<i>E. coli</i>), 3.-Generations-Cephalosporine (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>), Fluorchinolone (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>), Aminoglycoside (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>) und Methicillin (<i>S. aureus</i>))	AMR bei <i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i> nahm in den meisten europäischen Ländern im Laufe der Zeit zu, MRSA nahm im Allgemeinen im Laufe der Zeit ab; positiver linearer Zusammenhang zwischen minimaler Umgebungstemperatur und AMR in allen Ländern, Jahren, Krankheitserregern und Antibiotika-Unterklassen; Beziehung zwischen Temperatur und Resistenz nimmt mit der Zeit zu, und AMR nimmt bei höheren Temperaturen schneller zu.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, R_s =Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

Fortsetzung nächste Seite

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Forrester [15], 2022	1990–2020	22 Länder: 15 europäische Länder, 7 Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen	101 Veröffentlichungen	Review	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Jahreszeiten	Infektion oder Besiedlung mit gängigen antibiotikaresistenten oder antibiotikaassoziierten Krankheitserregern (MRSA, <i>C. difficile</i> , CRE)	MRSA: Höhere Temperaturen und höhere Luftfeuchtigkeit erhöhen nachweislich die Besiedlung und Infektion mit MRSA ; <i>C. difficile</i> : Es wurde berichtet, dass sich die Jahreszeit auf die Besiedlung oder Infektion mit <i>C. difficile</i> auswirkt und in der südlichen (Oktober–November) und nördlichen Hemisphäre (März–April) unterschiedlich ist.
Aghdassi [16]*, 2019	2000–2016	Deutschland	Chirurgische Eingriffe und SSIs von KISS; Daten der meteorologischen Messstationen des DWD	Ökologische Beobachtungsstudie	Monatliche Durchschnittstemperatur	SSI-Raten pro 1.000 Operationen	Die Zahl der SSIs pro 1.000 Operationen nahm mit höheren Temperaturen zu; SSIs bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ wahrscheinlicher als bei Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$ (AOR: 1,13 [95%-KI: 1,06–1,20]) ; Auftreten von oberflächlichen SSIs mit gramnegativen Erregern um bis zu 38% wahrscheinlicher bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ (AOR: 1,38 [95%-KI: 1,16–1,64]) als bei Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$; die Zahl der SSIs pro 1.000 Operationen stieg um 1% pro 1°C Anstieg.
Schwab [17], 2020	2001–2015	Deutschland	SSIs von Intensivstationen, die am Modul „ICU-KISS“ von KISS teilnehmen; Daten der meteorologischen Messstationen des DWD	Ökologische Beobachtungsstudie	Tagesmitteltemperatur, Tageshöchsttemperatur, Tagesniederschlag, relative Luftfeuchtigkeit und die tägliche Sonneneindauer	Inzidenz von primären nosokomialen Blutstrominfektionen (ha-BSIs) stratifiziert nach Erregern pro 10.000 Patiententage	Inzidenz von ha-BSIs 17% (IRR: 1,169 [95%-KI: 1,077–1,269]) höher in Monaten $> 20^\circ\text{C}$ im Vergleich zu Monaten $< 5^\circ\text{C}$; dieser Effekt ist um ein Drittel (38%) höher für gramnegative Erreger und 13% höher für grampositive Erreger; <i>S. pneumoniae</i> trat 50% seltener in Monaten $> 20^\circ\text{C}$ als bei $< 5^\circ\text{C}$ auf.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, Rs=Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

* Beide Artikel verwenden denselben Datensatz und sollten als Einheit betrachtet werden.

Fortsetzung nächste Seite

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Aghdassi [18]*, 2021	2000–2016	Deutschland	Chirurgische Eingriffe und SSIs aus dem Modul „OP-KISS“ von KISS, DWD-Daten	Ökologische Beobachtungsstudie	Monatliche Durchschnittstemperatur	Raten der SSIs pro 1.000 Operationen, stratifiziert nach Erregern (<i>S. aureus</i> , <i>Enterococcus</i> spp., Koagulase-negative Staphylokokken, <i>Streptococcus</i> spp., <i>Corynebacterium</i> spp., <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Enterobacter</i> spp., <i>Klebsiella</i> spp., <i>Proteus</i> spp., <i>Bacteroides</i> spp., <i>Citrobacter</i> spp., andere Enterobacterales, <i>Serratia</i> spp., <i>Acinetobacter</i> spp., <i>C. albicans</i>)	Korrelation zwischen höheren Temperaturen und dem Auftreten von SSIs; Anstieg der SSI-Rate pro zusätzlicher 1 °C für fast alle Erreger mit Ausnahme von <i>Streptococcus</i> spp. und <i>C. albicans</i>; stärkste Assoziation für das Risiko für SSIs mit <i>Acinetobacter</i> spp. (6% Anstieg pro zusätzlicher 1 °C) und <i>Enterobacter</i> spp. (4% Anstieg pro zusätzlicher 1 °C); das Risiko für SSIs durch <i>Acinetobacter</i> spp. und <i>Enterobacter</i> spp. stieg in Monaten mit ≥ 20 °C im Vergleich zu < 5 °C um mehr als das Zweifache.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, Rs=Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

*Beide Artikel verwenden denselben Datensatz und sollten als Einheit betrachtet werden.

von AMR um 0,33 % pro Jahr für Aminoglykosid-resistente *E. coli* und 0,55 % pro Jahr für 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *E. coli* beobachtet. Bei Fluorchinolon-resistenten *E. coli* wurde ein Anstieg von 0,57 % pro Jahr festgestellt, nachdem andere bekannte Einflussfaktoren, wie Antibiotikaverbrauch und Bevölkerungsdichte, berücksichtigt wurden. Bei *K. pneumoniae* wurde ein noch höherer Anstieg festgestellt: 0,9 % pro Jahr für 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *K. pneumoniae* und 1,2 % für Fluorchinolon-resistente *K. pneumoniae*. McGough et al. [14] kamen zu dem Schluss, dass die Umgebungstemperatur die Zunahme von Antibiotikaresistenz erheblich beeinflussen

kann. In einem weiteren Review schlussfolgern Forrester et al. [15], dass der Temperaturanstieg aufgrund des Klimawandels eine Zunahme der Resistenz bei pathogenen Bakterien bewirken kann.

3.2 Zusammenhang zwischen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsanstieg und dem Wachstum und der Verbreitung von bakteriellen Krankheitserregern

Die optimale Wachstumstemperatur für viele relevante Bakterien liegt bei mehr als 30 °C [8], so dass eine verstärkte Bakterienvermehrung mit steigenden Temperaturen

Temperaturerhöhungen und Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und des Niederschlags können zu einer verstärkten Ausbreitung von AMR und nosokomialen Infektionen führen.

wahrscheinlich ist. In ihrer Übersichtsarbeit stellen Forrester et al. [15] fest, dass höhere Temperaturen und höhere Luftfeuchtigkeit das Besiedlungs- sowie Infektionsrisiko für MRSA erhöhen. Es wurde auch berichtet, dass sich die Jahreszeit auf die Besiedlung oder Infektion mit *Clostridioides difficile* auswirkt, wobei es Unterschiede zwischen der südlichen und nördlichen Hemisphäre gibt. Obwohl sie keine Studien fanden, die einen Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Saisonalität und Carbapenem-resistenten Enterobacterales (CRE) belegen, folgerten sie aus der indirekten Evidenz, dass ein solcher Zusammenhang ebenfalls plausibel sein könnte [15]. Surveillancestudien von Aghdassi et al. [16, 18] und Schwab et al. [17] deuten darauf hin, dass Veränderungen in der Zusammensetzung des Mikrobioms möglicherweise durch Temperaturanstiege modifiziert werden könnten. Das Wachstum und die Ausbreitung von bakteriellen Krankheitserregern könnte also durch höhere Temperaturen begünstigt werden. Die Mechanismen, die der Hypothese zugrunde liegen, dass höhere Temperaturen zu einer stärkeren bakteriellen Vermehrung führen, sind noch nicht vollständig geklärt.

3.3 Zusammenhang zwischen erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit und nosokomialen Infektionen

Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Zahl der HAIs mit steigender Temperatur zunimmt. Dies ist von Bedeutung, da 75% der AMR-Krankheitslast auf HAIs zurückzuführen sind, diese wiederum führen zu einem höheren Antibiotikaeinsatz [6]. Postoperative Wundinfektionen (surgical site infections, SSIs) gehören mit schätzungsweise 800.000 Fällen pro Jahr in der EU zu den häufigsten HAIs. Die am

häufigsten gefundenen Erreger bei SSIs sind *S. aureus*, *Enterococcus* spp. und *E. coli* [18]. Aghdassi et al. [16] zeigten insbesondere, dass SSIs nach Operationen in wärmeren Monaten ($\geq 20^\circ\text{C}$) häufiger auftreten als in Monaten mit kälteren Temperaturen ($< 5^\circ\text{C}$) (Adjustierte Odds Ratio (AOR): 1,13; 95%-Konfidenzintervall (KI): 1,06–1,20). SSIs nahmen zu, wenn die Temperatur im Monat der Operation über 20°C stieg, und zwar sowohl bei gramnegativen als auch bei grampositiven Erregern. Bei Betrachtung der Temperatur als kontinuierliche Variable zeigten die Daten, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von SSIs um 1% pro 1°C Temperaturanstieg zunimmt. Stärkere Assoziationen zwischen wärmeren Temperaturen und einem Anstieg der SSIs finden sich bei gramnegativen Erregern. Darüber hinaus schienen oberflächliche SSIs einen stärkeren Zusammenhang mit der Temperatur zu haben als tiefe SSIs. Oberflächliche SSIs mit gramnegativen Erregern traten bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ um 38% häufiger auf als in Monaten mit Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$ [16]. In einer zweiten Studie fanden Aghdassi et al. [18] ein um 6% erhöhtes Risiko für SSIs mit *Acinetobacter baumannii* pro 1°C Anstieg und ein 4% erhöhtes Risiko für SSIs mit *Enterobacter* spp. in Deutschland. Es wurde kein Zusammenhang zwischen dem Risiko von SSIs mit *Streptococcus* spp. oder *Candida albicans* und einem Temperaturanstieg festgestellt.

Eine weitere Studie von Schwab et al. [17] berichtete über nosokomiale Blutstrominfektionen (healthcare-associated blood stream infections, ha-BSIs) auf Intensivstationen und stellte einen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der mittleren Tagestemperatur und ha-BSIs fest. In Monaten mit Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ war die Inzidenzrate von ha-BSIs um 17% höher als in Monaten mit Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$. Der

Temperatureffekt ist bei ha-BSIs mit gramnegativen Erregern am stärksten ausgeprägt (38% Anstieg der Inzidenzrate), gefolgt von ha-BSIs mit grampositiven Erregern (13% Anstieg der Inzidenzrate). Die einzige Ausnahme bildete *Streptococcus pneumoniae* mit einem reduzierten Inzidenzratenverhältnis (incidence rate ratio, IRR) von 0,498 (95%-KI: 0,174–1,429) für Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ im Vergleich zu Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$. Dies lässt sich möglicherweise durch den Übertragungsweg über Tröpfchen erklären, der relevanter ist, wenn sich die Bevölkerung während der kälteren Jahreszeiten überwiegend in geschlossenen Räumen aufhält. Neben der Temperatur korrelierte auch die relative Luftfeuchtigkeit umgekehrt mit einem Anstieg der ha-BSIs [17].

3.4 Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Antibiotikaverbrauch

In der europäischen Surveillancestudie präsentierten McGough et al. [14] Daten, die darauf hinweisen, dass in Ländern mit höheren Durchschnittstemperaturen ein höherer Antibiotikaverbrauch zu verzeichnen ist. Für Deutschland vermuten Aghdassi et al. [18], dass bei steigenden Temperaturen mit einer Zunahme von HAIs zu rechnen ist und dass diese steigenden Infektionsraten dann möglicherweise zu einem erhöhten Antibiotikaeinsatz führen.

3.5 Zusammenfassung der klimatischen Risiken, die die AMR-Krankheitslast in Europa beeinflussen könnten

In einer kürzlich durchgeführten Studie über die Auswirkungen des Klimawandels auf Krankheiten sammelten

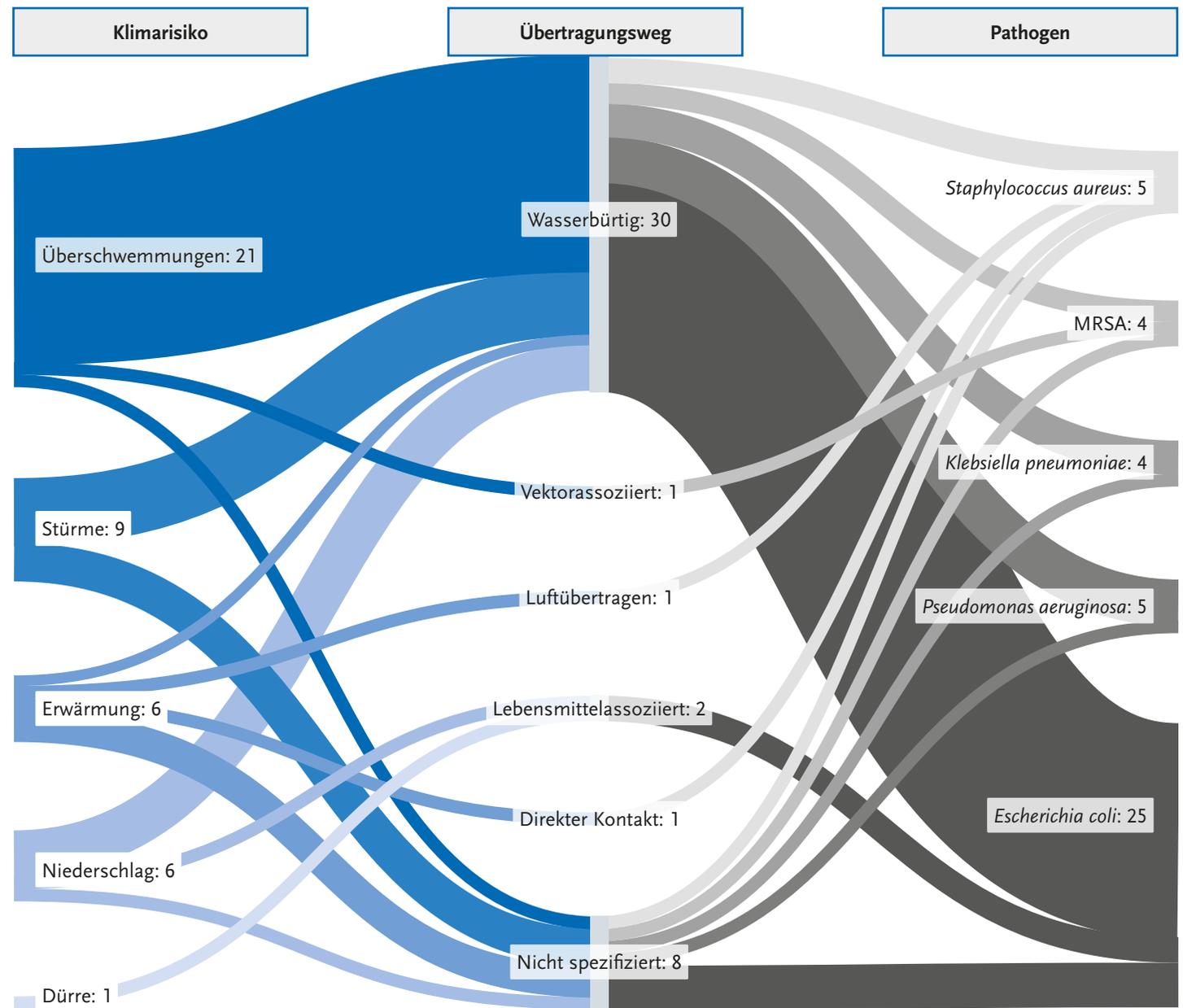
Mora et al. [12] Daten über die Übertragungswege, durch die klimatische Risiken zu einer Verschärfung bestimmter Krankheiten führen. Sie identifizierten weltweit 43 Artikel, in denen der Klimawandel mit Daten zu Krankheitserregern, die laut Cassini et al. [4] die höchste AMR-Belastung in Europa verursachen, in Verbindung gebracht werden. Die Ergebnisse dieser Studien lassen sich in einem Sankey-Diagramm potenzieller Pfade veranschaulichen, über die klimatische Risiken diese Erreger verschlimmern könnten (Abbildung 2). Zu den häufigsten Erregern, bei denen ein Zusammenhang mit klimatischen Risiken festgestellt wurde, gehörten *E. coli* (25 Veröffentlichungen), gefolgt von *S. aureus* (neun Veröffentlichungen, vier Veröffentlichungen speziell für MRSA), *P. aeruginosa* (fünf Veröffentlichungen) und *K. pneumoniae* (vier Veröffentlichungen). Die mit diesen Erregern verbundenen klimatischen Risiken waren Überschwemmungen, Stürme, Erwärmung, Niederschlag und Dürren. Die Hauptübertragungswege waren die Übertragung durch Wasser sowie nicht näher spezifizierte Übertragungswege.

4. Diskussion

4.1 Klimawandel und AMR

Der Klimawandel wird durch Temperaturerhöhungen, Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und des Niederschlags wahrscheinlich zu einer Ausbreitung bakterieller Krankheitserreger, einem verstärkten Einsatz von Antibiotika und einer Zunahme von AMR in Europa führen. Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen und der Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren ist die vorliegende Übersichtsarbeit jedoch nicht in der Lage, die gesamte Dimension

Abbildung 2
Zusammenfassung der klimatischen Risiken, die die Ausbreitung und Krankheitslastentwicklung von resistenten Krankheitserregern beeinflussen können. Eine vollständige interaktive Darstellung aller Pfade und die zugrunde liegenden Daten sind verfügbar [20].
Quelle: Webtool von Mora et al. [12, 20]



MRSA=Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus*

Der Klimawandel, der zu häufigeren und extremen Wetterereignissen beiträgt, wird wahrscheinlich zu einem verstärkten Einsatz antimikrobieller Arzneimittel bei Menschen und Tieren führen.

dieser Zusammenhänge abzubilden. Für Europa liegen nur wenige Daten vor, und es konnten nur sechs Studien identifiziert werden, welche die Einschlusskriterien erfüllten. Alle diese sechs Studien deuten jedoch darauf hin, dass die allgemein zunehmende Krankheitslast durch AMR aufgrund des Klimawandels weiter beschleunigt werden könnte.

Es gibt einige Belege für die Zunahme von AMR bei steigenden Temperaturen in Europa [13, 14]. Studien außerhalb Europas bestätigen diese Ergebnisse. Eine US-amerikanische Studie von MacFadden et al. [10] ergab, dass ein Anstieg der lokalen Mindesttemperatur mit einem Anstieg der Antibiotikaresistenzraten verbunden ist. Dies gilt jedoch nicht für alle Erreger im selben Maße und weitere Einflussfaktoren wie Hygienemaßnahmen sind zu berücksichtigen. EARS-Net Daten zeigen beispielsweise einen seit Jahren anhaltende Rückgang der MRSA-Inzidenz in Europa [14]. Hansen et al. [21] stellten fest, dass Länder mit sinkenden MRSA-Anteilen eine besonders strikte Umsetzung verschiedenster Präventionsmaßnahmen aufweisen. In diesem Review berücksichtigte Studien beobachteten ebenfalls einen Anstieg der HAIs mit einem Anstieg der Temperatur. SSIs und ha-BSIs in Deutschland, meist durch gramnegative Bakterien verursacht, traten häufiger bei wärmeren Temperaturen ($\geq 20^\circ\text{C}$) auf. In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen kam eine japanische Studie von Kobayashi et al. [22] zu dem Schluss, dass SSIs mit den Sommermonaten assoziiert sind (Juli – September, Hazard Ratio: 1,53; 95 %-KI: 1,06–3,83). Außerdem waren die SSI-Raten in den Sommermonaten höher als in den Nicht-Sommermonaten (3,9 % vs. 1,9 %; $p < 0,05$). Eine andere Studie aus Japan kam wiederum zu gegensätzlichen Ergebnissen: Sagara et al. [23] stellten fest, dass Au-

geninfektionen in den Wintermonaten am häufigsten und in den Sommer- und Herbstmonaten seltener vorkamen. Als sie die Ergebnisse jedoch nach Erregern stratifizierten, beobachteten sie, dass durch *S. aureus* verursachte Infektionen im Sommer und Herbst häufiger auftraten als in den kälteren Jahreszeiten. Infektionen mit *Streptococcus* spp. traten häufiger in den Frühlings- und Sommermonaten auf. In einer anderen Surveillancestudie, die sich auf AMR-Gene und deren Verteilung auf globaler Ebene unter Berücksichtigung klimatischer Faktoren konzentrierte, wurde eine ungleichmäßige Verteilung von AMR-Genen in Bakterien in mehreren Städten weltweit festgestellt, was auf einen Zusammenhang mit höheren Temperaturen in verschiedenen Regionen schließen lässt [24]. Um die Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und Antibiotikaresistenzen vollständig zu verstehen, sind weitere Forschungserkenntnisse erforderlich, aber die vorhandenen Daten reichen aus, um zu zeigen, dass der Klimawandel einen Einfluss auf Antibiotikaresistenzen hat und beide ohne geeignete Präventionsmaßnahmen weiter zunehmen werden.

Klimarisiken können Menschen und pathogene Erreger näher zusammenbringen, was zu einem Anstieg der Übertragung von Krankheitserregern und Infektionen führt, wie im illustrierten Modell (Abbildung 2) mit Daten von Mora et al. gezeigt wird [12]. Eine Zunahme von extremen Wetterereignissen und Naturkatastrophen kann Beeinträchtigungen und Verhältnisse verursachen, die zu einer Zunahme von AMR und der Ausbreitung von Krankheitserregern sowie zu einem Anstieg des damit verbundenen Antibiotikaverbrauchs führen. Solche Ereignisse können auch zu Flucht und Vertreibung und damit zu einer erhöhten Be-

Der übermäßige Einsatz von antimikrobiellen Arzneimitteln bei Menschen, Tieren und in der Umwelt verschärft die Herausforderungen durch AMR.

lastung der Gesundheitssysteme führen, was die Ausbreitung von AMR und HAIs weiter verschärfen kann [25].

Die vorliegende Literaturübersicht hat sich auf die bakteriellen AMR-Erreger konzentriert, die derzeit die größte Belastung in Europa verursachen. Neben der Belastung durch Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien kann der Klimawandel jedoch auch die Ausbreitung anderer resistenter Erreger begünstigen, wie z. B. die Resistenz gegen Malariamedikamente oder antiretrovirale Therapien [26]. Darüber hinaus könnte die Klimakrise das Auftreten und die Ausbreitung neuer und wiederkehrender Erreger ermöglichen. So wurde beispielsweise vermutet, dass *Candida auris*, ein in der Umwelt vorkommender, häufig multiresistenter Pilz, durch den Klimawandel zunehmend pathogener werden könnte [27]. Darüber hinaus weisen neuere Studien auf eine potenzielle Bedrohung der Gesundheit durch die Freisetzung von Bakterien und Viren aus dem auftauenden Permafrostboden infolge des Klimawandels hin [28, 29].

4.2 One Health und AMR

Die Besiedlung und die Infektion des Menschen mit Krankheitserregern können durch Expositionen in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft und des Gesundheitssystems entstehen. Ferner können diese durch sozioökonomische und umweltbedingte Gesundheitsdeterminanten beeinflusst werden. Da sich dieser Beitrag auf die menschliche Gesundheit konzentriert, wurden Veränderungen bei der Antibiotikaresistenz nicht umfassend aus einer One-Health-Perspektive bewertet. Gleichwohl wird dieser Aspekt teils durch die Berücksichtigung des Reviews von Forrester et al. [15] hervorgehoben, welches die One-Health-Perspek-

tive einschließt. AMR nimmt bei Menschen, Tieren, Pflanzen und in der Umwelt zu [30], und dieser Anstieg kann durch den globalen und lokalen Temperaturanstieg infolge des Klimawandels beeinflusst werden. One-Health-Faktoren, also menschliche und tierische Populationen sowie die Umwelt, und die Wechselwirkungen zwischen ihnen stehen im Zusammenhang mit Infektionskrankheiten und Antibiotikaresistenzen (Abbildung 3). Solche Wechselwirkungen können oft nur retrospektiv analysiert werden, und ihr Ausmaß wird in einigen Studien wahrscheinlich unterschätzt. Da die derzeitigen Anzeichen darauf hindeuten, dass sich die bestehende AMR-Pandemie aufgrund des Klimawandels verschlimmert, sind bessere Daten sowie Maßnahmen des öffentlichen Gesundheitswesens im Bereich der Gesundheit von Mensch-Tier-Umwelt erforderlich.

4.3 Limitationen dieses Reviews

Mögliche Limitationen der vorliegenden Analyse hängen mit der begrenzten Anzahl von Studien zusammen, die in diesen Review einbezogen wurden. Unter den ausgeschlossenen 35 außereuropäischen Studien gibt es möglicherweise zusätzliche relevante Belege für ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und AMR.

Bei den eingeschlossenen Studien handelte es sich überwiegend um Beobachtungsstudien, bei denen Surveillance-daten zu Krankheitserregern oder Infektionen mit Klimadaten in Form eines ökologischen Studiendesigns kombiniert wurden. Messfehler bei Exposition, Ergebnis und Assoziation können zu einer Verzerrung und Ungenauigkeit der berichteten Schätzungen führt. Auch wenn in den einzelnen Studien diverse Störfaktoren berücksichtigt wurden,

Es sind mehr Finanzmittel, politisches Engagement und koordinierte globale Maßnahmen erforderlich, um besser auf die Bedrohungen durch AMR und die Klimakrise reagieren zu können

Trotz der Komplexität der Prozesse des Klimawandels und der Antibiotikaresistenz wird es wichtig sein, die Veränderungen der Antibiotikaresistenz im Laufe der Zeit genau zu beobachten, um die Prioritäten für Maßnahmen im Bereich der öffentlichen Gesundheit festzulegen. Es werden verstärkte Ansätze zur One-Health-Surveillance erforderlich sein. Globale Surveillance-Systeme, wie das europäische EARS-Net und das weltweite Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS), sind besonders wichtig für Ländervergleiche und könnten ökologische Studien ermöglichen, die Zusammenhänge mit regionalen Klimaveränderungen analysieren. Auf globaler Ebene müssen die Verfügbarkeit und Standardisierung antimikrobieller Empfindlichkeitstests (antimicrobial susceptibility testing, AST) weiter verbessert werden, insbesondere im globalen Süden, um repräsentativere AMR-Surveillance-Daten zu erhalten. Darüber hinaus müssen Studien zur Krankheitslast durch AMR entwickelt und routinemäßig aktualisiert werden, um rechtzeitige Entscheidungen im Bereich der öffentlichen Gesundheit zu ermöglichen.

Neben einer verbesserten One-Health-AMR-Surveillance sind eine flächendeckende Gesundheitsversorgung und wirksame Maßnahmen zur Infektionsprävention und -kontrolle, einschließlich eines verlässlichen Zugangs zu Wasser, sanitären Einrichtungen und Hygiene, sowie ein sachgerechter und verantwortungsvoller Einsatz von antimikrobiellen Substanzen (Antimicrobial Stewardship) im One-Health-Bereich erforderlich, um die AMR-Pandemie weltweit einzudämmen. Es sind Investitionen in die Forschung und Entwicklung neuer antimikrobieller Arzneimittel sowie in die Entwicklung entsprechender Impfstoffe nötig.

Korrespondenzadresse

Dr. med. Sebastian Haller
Robert Koch-Institut
Abteilung für Infektionsepidemiologie
Seestr. 10
13353 Berlin
E-Mail: HallerS@rki.de

Zitierweise

Meinen A, Tomczyk S, Wiegand FN, Abu Sin M, Eckmanns T et al. (2023) Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel. *J Health Monit* 8(S3):102–119. DOI 10.25646/11395

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021 – 06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Das RKI-Koordinationssteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maïke Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. EclinicalMedicine (2021) Antimicrobial resistance: A top ten global public health threat. *EclinicalMedicine* 41:101221
2. World Health Organization (2019) Ten threats to global health in 2019. <https://www.who.int/news-room/spotlight/ten-threats-to-global-health-in-2019> (Stand: 18.01.2023)
3. Murray CJL, Ikuta KS, Sharara F et al. (2022) Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *Lancet* 399(10325):629–655
4. Cassini A, Högberg LD, Plachouras D et al. (2019) Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: A population-level modelling analysis. *Lancet Infect Dis* 19(1):56–66
5. European Antimicrobial Resistance Collaborators (2022) The burden of bacterial antimicrobial resistance in the WHO European region in 2019: A cross-country systematic analysis. *Lancet Public Health* 7(11):e897–e913
6. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2019) Antimicrobial resistance – Tackling the burden in the European Union. ECDC, OECD. <https://www.oecd.org/health/health-systems/AMR-Tackling-the-Burden-in-the-EU-OECD-ECDC-Briefing-Note-2019.pdf> (Stand: 18.01.2023)
7. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Centers for Environmental Information (2022) Monthly global climate report for annual 2021. NOAA. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113> (Stand: 18.01.2023)
8. Ratkowsky DA, Olley J, McMeekin TA et al. (1982) Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *J Bacteriol* 149(1):1–5
9. Hashimoto M, Hasegawa H, Maeda S (2019) High temperatures promote cell-to-cell plasmid transformation in *Escherichia coli*. *Biochem Biophys Res Commun* 515(1):196–200
10. MacFadden D, McGough S, Fisman D et al. (2018) Antibiotic resistance increases with local temperature. *Nat Clim Chang* 8:510–514
11. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372:n71
12. Mora C, McKenzie T, Gaw IM et al. (2022) Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nat Clim Chang* 12(9):869–875
13. Kaba HEJ, Kuhlmann E, Scheithauer S (2020) Thinking outside the box: Association of antimicrobial resistance with climate warming in Europe – A 30 country observational study. *Int J Hyg Environ Health* 223(1):151–158
14. McGough SF, MacFadden DR, Hattab MW et al. (2020) Rates of increase of antibiotic resistance and ambient temperature in Europe: A cross-national analysis of 28 countries between 2000 and 2016. *Euro Surveill* 25(45):1900414
15. Forrester JD, Cao S, Schaps D et al. (2022) Influence of socio-economic and environmental determinants of health on human infection and colonization with antibiotic-resistant and antibiotic-associated pathogens: A scoping review. *Surg Infect (Larchmt)* 23(3):209–225
16. Aghdassi SJS, Schwab F, Hoffmann P et al. (2019) The association of climatic factors with rates of surgical site infections: 17 years' data from hospital infection surveillance. *Dtsch Arztebl Int* 116(31–32):529–536
17. Schwab F, Gastmeier P, Hoffmann P et al. (2020) Summer, sun and sepsis – The influence of outside temperature on nosocomial bloodstream infections: A cohort study and review of the literature. *PLoS One* 15(6):e0234656
18. Aghdassi SJS, Gastmeier P, Hoffmann P et al. (2021) Increase in surgical site infections caused by gram-negative bacteria in warmer temperatures: Results from a retrospective observational study. *Infect Control Hosp Epidemiol* 42(4):417–424
19. Kramer TS, Schröder C, Behnke M et al. (2019) Decrease of methicillin resistance in *Staphylococcus aureus* in nosocomial infections in Germany – A prospective analysis over 10 years. *J Infect* 78(3):215–219
20. Camilo Mora (2022) Traceable evidence of the impacts of climate change on pathogenic human diseases <https://camilo-mora.github.io/Diseases/> (Stand: 18.01.2023)
21. Hansen S, Schwab F, Asensio A et al. (2010) Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in Europe: Which infection control measures are taken? *Infection* 38(3):159–164

22. Kobayashi K, Ando K, Kato F et al. (2021) Seasonal variation in incidence and causal organism of surgical site infection after PLIF/TLIF surgery: A multicenter study. *J Orthop Sci* 26(4):555–559
23. Sagara H, Yamamoto T, Sekiryu T et al. (2016) Seasonal variation in the incidence of late-onset bleb-related infection after filtering surgery in Japan: The Japan Glaucoma Society survey of bleb-related infection report 3. *J Glaucoma* 25(1):8–13
24. Danko D, Bezdán D, Afshin EE et al. (2021) A global metagenomic map of urban microbiomes and antimicrobial resistance. *Cell* 184(13):3376–3393.e17
25. Global Leaders Group on Antimicrobial Resistance (2021) Antimicrobial resistance and the climate crisis. <https://www.amrleaders.org/resources/m/item/antimicrobial-resistance-and-the-climate-crisis> (Stand: 18.01.2023)
26. Fernando SD (2020) Climate change and malaria – A complex relationship. *United Nations Chronicle*. <https://www.un.org/en/chronicle/article/climate-change-and-malaria-complex-relationship> (Stand: 06.02.2023)
27. Casadevall A, Kontoyiannis DP, Robert V (2021) Environmental *Candida auris* and the global warming emergence hypothesis. *mBio* 12(2):e00360–00321
28. Kim H, Kim M, Kim S et al. (2022) Characterization of antimicrobial resistance genes and virulence factor genes in an Arctic permafrost region revealed by metagenomics. *Environ Pollut* 294:118634
29. Alempic JM, Lartigue A, Goncharov AE et al. (2023) An update on eukaryotic viruses revived from ancient permafrost. *Viruses* 15(2):564
30. OECD, ECDC, European Food Safety Authority (EFSA), European Medicines Agency (EMA) (2022) Antimicrobial resistance in the EU/EEA: A One Health response. OECD, ECDC, EFSA, EMA. <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/antimicrobial-resistance-policy-brief-2022.pdf> (Stand: 18.01.2023)

Annex Tabelle 1
Angewandter Suchstring

Datenbank	Suchstrategie
PubMed	("climate change"[MeSH Terms] OR "global warming"[MeSH terms] OR "climatic processes"[MeSH terms] OR ("climate*" [Title/Abstract] AND "change*" [Title/Abstract]) OR "climate*" [Title/Abstract] OR "temperature*" [Title/Abstract]) AND ("Anti-Bacterial Agents"[MeSH Terms] OR "Drug Resistance, Bacterial*" [MeSH Terms] OR "health care associated infection" [Title/Abstract] OR "nosocomial" [Title/Abstract] OR "AMR" [Title/Abstract] OR "antimicrobial resistance*" [Title/Abstract] OR "antimicrobial resistanc*" [Title/Abstract] OR "antibiotic*" [Title/Abstract]) AND ((y_10[Filter]) AND (humans[Filter]))

Impressum

Journal of Health Monitoring

www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber

Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**