

Übermäßige Sterblichkeit aufgrund von Hitze und Kälte: eine Studie zur Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen in 854 Städten in Europa



Pierre Masselot, Malcolm Mistry, Jacopo Vanoli, Rochelle Schneider, Tamara Jungman, David Garcia-Leon, Juan-Carlos Ciscar, Luc Feyen, Hans Orru, Aleš Urban, Susanne Breitner, Veronika Huber, Alexandra Schneider, Evangelia Samoli, Massimo Stafoggia, Francesca de'Donato, Shilpa Rao, Ben Armstrong, Mark Nieuwenhuijsen, Ana Maria Vicedo-Cabrera, Antonio Gasparrini, im Namen des MCC Collaborative Research Network und des EXHAUSTION-Projekts

Zusammenfassung

Hintergrund Hitze und Kälte sind etablierte umweltbedingte Risikofaktoren für die menschliche Gesundheit. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und der Unterschiede in der Gefährdung und der demografischen Verteilung ist es jedoch eine schwierige Aufgabe, die damit verbundene Gesundheitsbelastung abzubilden. In dieser Studie haben wir eine umfassende Bewertung der Auswirkungen von Hitze und Kälte auf die Sterblichkeit in europäischen Stadtgebieten durchgeführt und dabei geografische Unterschiede und altersspezifische Risiken berücksichtigt.

Methoden Wir haben zwischen dem 1. Januar 2000 und dem 12. Dezember 2019 städtische Gebiete in ganz Europa einbezogen und dabei den Urban-Audit-Datensatz von Eurostat sowie Erwachsene ab 20 Jahren verwendet, die in diesen Gebieten leben. Die Daten wurden von Eurostat, dem Multi-country Multi-city Collaborative Research Network, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer und Copernicus extrahiert. Wir haben eine dreistufige Methode angewendet, um Temperaturrisiken kontinuierlich über die Alters- und Raumdimensionen abzuschätzen und Gefährdungsmuster auf der Grundlage stadtspezifischer Merkmale und demografischer Strukturen zu identifizieren. Diese Risiken wurden verwendet, um Mindeststerblichkeitstemperaturen und zugehörige Perzentile sowie rohe und standardisierte Übersterblichkeitsraten für Hitze und Kälte abzuleiten, die auf verschiedenen geografischen Ebenen aggregiert wurden.

Ergebnisse In den 854 städtischen Gebieten Europas schätzten wir eine jährliche Mehrzahl von 203.620 (empirisches 95 %-KI 180.882–224.613) Todesfällen aufgrund von Kälte und 20.173 (17.261–22.934) Todesfällen aufgrund von Hitze. Dies entsprach altersstandardisierten Raten von 129 (empirisches 95 %-KI 114–142) und 13 (11–14) Todesfällen pro 100.000 Personennjahre. Die Ergebnisse waren je nach Europa und Altersgruppe unterschiedlich, wobei die stärksten Auswirkungen sowohl bei Kälte als auch bei Hitze in osteuropäischen Städten zu verzeichnen waren.

Deutung Karten zu Sterblichkeitsrisiken und übermäßigen Todesfällen weisen auf geografische Unterschiede hin, wie etwa ein Nord-Süd-Gefälle und eine erhöhte Anfälligkeit in Osteuropa, sowie auf lokale Unterschiede aufgrund städtischer Merkmale. Der Modellierungsrahmen und die Ergebnisse sind von entscheidender Bedeutung für die Gestaltung nationaler und lokaler Gesundheits- und Klimapolitiken sowie für die Prognose der Auswirkungen von Kälte und Hitze unter zukünftigen klimatischen und sozioökonomischen Szenarien.

Finanzierung Medical Research Council of UK, Natural Environment Research Council UK, Horizon 2020 der EU und Joint Research Centre der EU.

Urheberrechte ©© 2023 Die Autoren. Veröffentlicht von Elsevier Ltd. Dies ist ein Open Access-Artikel unter der CC BY 4.0-Lizenz.

Einführung

Hitze und Kälte sind mittlerweile etablierte Gesundheitsrisikofaktoren, und mehrere Studien berichten über erhebliche Auswirkungen auf die Sterblichkeit in der Bevölkerung auf der ganzen Welt.^{1–3} Es wird erwartet, dass die damit verbundene Gesundheitsbelastung mit dem Klimawandel zunehmen wird, insbesondere in den extremsten Szenarien der globalen Erwärmung.^{4,5} Allerdings ist es aufgrund der zahlreichen Faktoren, die die Anfälligkeit für Hitze und Kälte beeinflussen, darunter klimatische, umweltbedingte und sozioökonomische Bedingungen, immer noch schwierig, belastbare Schätzungen der Übersterblichkeit in der aktuellen und zukünftigen Zeitspanne zu erhalten.⁶ Diese Faktoren stellen die Hauptursachen für die Variation der Sterblichkeitsrisiken dar, die sich nachweislich geografisch und je nach Altersgruppe unterscheiden.

Städte sind besonders von Umweltbelastungen und möglichen Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Rund 40 % der EU-Bevölkerung leben in Städten mit mindestens 50.000 Einwohnern⁷ und die städtische Bevölkerung ist insgesamt einem höheren Temperaturstress ausgesetzt,

besonders Hitze.^{8,9} Darüber hinaus unterscheiden sich europäische Städte in sozioökonomische, ökologische und klimatische Bedingungen, und es ist vernünftigerweise anzunehmen, dass diese Unterschiede zu großen Unterschieden in der Anfälligkeit für temperaturbedingte Risiken führen. Eine bessere Kenntnis der Auswirkungen klimawandelbedingter Stressfaktoren auf die Sterblichkeit auf Stadtebene ist für die Gestaltung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung.

Wenige europaweite Erhebungen zur Sterblichkeit Temperaturbedingte Belastungen wurden veröffentlicht. der **Atmosphärenphysik, Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik, Prag, Tschechische Republik** (Ein urbaner Dokortitel); **Fakultät für Umweltwissenschaften, Tschechische Lebensuniversität Wissenschaften, Prag, Tschechische Republik** (Ein Urban); **Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Umweltgesundheit, Neuherberg, Deutschland** (S Breitner, V Huber PhD), **Martínez-Solanas und Kollegen** schätzte die Europa-Tschechische Republik, Prag, Tschechische Republik (Ein urbaner Dokortitel); **Fakultät für Umweltwissenschaften, Tschechische Lebensuniversität Wissenschaften, Prag, Tschechische Republik** (Ein Urban); **Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Umweltgesundheit, Neuherberg, Deutschland** (S Breitner, V Huber PhD), **Auf regionaler Ebene besteht ein großes Hitze- und Kälterisiko, wohingegen andere Studien Belege auf lokaler Ebene lieferten und sich dabei auf bestimmte Regionen europäischer Länder**^{10–12} oder konzentrierten.¹³ Andere Bewertungen umfassten die europäische Region in globalen Bewertungen.¹⁴ Obwohl einige konsistenten Ergebnisse hervorgehen, wie beispielsweise ein allgemeines Nord-Süd-Gefälle und ein erhöhtes Hitzेरisiko in stärker urbanisierten Gebieten, gibt es auch Unterschiede in den gemeldeten Schätzungen.

Lancet Planet Health 2023; 7: e271–81

Veröffentlicht Online
16. März 2023
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00023-2)

Ministerium für öffentliche Gesundheit, Umwelt und Gesellschaft (P Masselot PhD, M Mistry PhD, J Vanoli MSc, R Schneider PhD, Prof. A Gasparrini PhD, Prof. B Armstrong PhD), **Zentrum für Klimawandel und Planetengesundheit** (R. Schneider, Prof. A. Gasparrini) und **Zentrum für statistische Methodologie** (Prof. A. Gasparrini), **London School of Hygiene & Tropical Medicine, London, Großbritannien;** **Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Ca' Foscari von Venedig, Venedig, Italien** (M Mistry); **φ-Lab, Europäische Weltraumorganisation, Frascati, Italien** (R. Schneider); **Institut für globale Gesundheit (ISGlobal), Barcelona, Spanien** (T Jungman MSc, (M Nieuwenhuijsen PhD); **Abteilung für Experimentelle und Gesundheitswissenschaften, Universität Pompeu Fabra, Barcelona, Spanien** (T. Jungman, M. Nieuwenhuijsen); **Gemeinsame Forschungsstelle, Europäische Kommission, Sevilla, Spanien** (D Garcia-Leon PhD, J Ciscar PhD); **Gemeinsame Forschungsstelle, Europäische Kommission, Ispra, Italien** (L. Feyen PhD); **Abteilung für Familie Medizin und öffentliche Gesundheit, Universität Tartu, Tartu, Estland** (H Orru PhD); **Institut für**

Ein Schneider-PhD); IBE-Vorsitzender von Epidemiologie, LMU München, München, Deutschland (S Breitner, V Huber); Abteilung für Hygiene, Epidemiologie und Medizin Statistik, Nationale und Kapodistriaische Universität Athen, Athen, Griechenland (E Samoli PhD); Abteilung für Epidemiologie, Region Latium Gesundheitsdienst/ASL Roma 1, Rom, Italien (M Stafoggia PhD, F de Donato PhD); Norwegisches Institut für öffentliche Gesundheit, Oslo, Norwegen (S. Rao PhD); CIBER Epidemiología y Salud Pública, Madrid, Spanien (M Nieuwenhuijsen); Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Bern, Bern, Schweiz (AM Vicedo-Cabrera PhD); Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Bern, Schweiz (AM Vicedo-Cabrera)

Korrespondenz:

Dr. Pierre Masselot, Ministerium für öffentliche Gesundheit, Umwelt und Gesellschaft, London School of Hygiene & Tropenmedizin, London WC1H 9SH, Großbritannien pierre.masselot@lshtm.ac.uk

Sehen Online zum Anhang

Forschung im Kontext

Beweise vor dieser Studie

Die Sterblichkeitsrisiken und Auswirkungen im Zusammenhang mit einer nicht optimalen Temperatur sind umfassend untersuchte Themen, für die in vielen Ländern Europas Belege vorliegen. Wir durchsuchten PubMed, Web of Science und Google Scholar nach Abschätzungen der Auswirkungen auf die Mortalität in Europa, unabhängig davon, ob diese in globale Studien einbezogen oder auf kleinere Teile des Kontinents beschränkt waren, und verwendeten für Artikel die Suchbegriffe „Temperatur“ UND „Mortalität“ UND „Auswirkungen“. veröffentlicht zwischen dem 1. Januar 2010 und dem 31. Dezember 2021 in englischer Sprache. Unsere Suche ergab, dass eine Handvoll globaler Studien eine kleine Anzahl europäischer Städte in ihre Bewertung einbezog, über aggregierte Beweise auf nationaler oder regionaler Ebene verfügte oder sich bei Studien auf kleinräumiger Ebene auf einzelne Länder beschränkte. Insbesondere konzentrierten sich die Studien fast ausschließlich auf westeuropäische Länder im Vergleich zu skandinavischen oder östlichen Standorten. Und was noch wichtiger ist: Keine Studie hat die demografischen Unterschiede in Europa berücksichtigt.

Mehrwert dieser Studie

Diese europaweite Bewertung liefert Risikoabschätzungen und eine Abschätzung der Auswirkungen auf die Sterblichkeit im Zusammenhang mit Hitze und Kälte

Unterschiede in den Risiken und damit verbundenen Belastungen können teilweise auf den geografischen Umfang der Studien zurückgeführt werden. Frühere Bewertungen konzentrierten sich entweder auf groß angelegte Analysen, die lokale Schwachstellen in städtischen Bevölkerungen nicht vollständig abbilden, oder basierten auf Daten mit höherer Auflösung, aber geringer geografischer Reichweite. Auch die meisten Belege beschränken sich auf westeuropäische Länder, wobei Skandinavien und Osteuropa wenig vertreten sind. Eine weitere wichtige Einschränkung ist die fehlende Berücksichtigung demografischer Unterschiede, wodurch die in der Literatur berichteten unterschiedlichen Risiken zwischen den Altersgruppen zu unterschiedlichen geschätzten Auswirkungen auf die Mortalität führen können. Darüber hinaus wurden in früheren Analysen andere Merkmale nicht berücksichtigt, die die Anfälligkeit für Hitze und Kälte verändern können, wie beispielsweise ortsspezifische sozioökonomische und Umweltvariablen. Diese Mängel stellen erhebliche Einschränkungen für die Gestaltung und Umsetzung wirksamer Strategien für die öffentliche Gesundheit und die Anpassung an den Klimawandel dar.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine umfassende und konsistente Bewertung der zu liefern aktuelle Sterblichkeitslast im Zusammenhang mit nicht optimalen Unfallursachen (Internationale Temperaturklassifikation in den meisten europäischen Städten, charakteristisch) Unterschiede in den Risiken aufgrund lokaler Verteilungen von Gefährdungsfaktoren und demografische Verteilungen. einen großen Datensatz täglicher Zeitreihen von Sterblichkeit und Temperatur, um Expositions-Reaktions-Beziehungen und Übersterblichkeit in 854 Städten in ganz Europa abzuleiten. Die Bewertung basiert auf einem fortschrittlichen Modellierungsrahmen, der eine detaillierte Untersuchung geografischer Unterschiede unter Bereitstellung altersspezifischer Risiken und altersstandardisierter Auswirkungen ermöglicht

in einer repräsentativen Auswahl städtischer Gebiete, nämlich 854 europäische Städte, darunter mehrere Regionen mit wenigen bisherigen Belegen, wie Skandinavien und Osteuropa. Darüber hinaus berücksichtigen die Schätzungen dieser Studie eine umfangreiche Liste sozioökonomischer, klimatischer und ökologischer Merkmale auf Stadtebene, um Unterschiede in der Anfälligkeit zwischen Ländern und Regionen darzustellen. Diese Studie berücksichtigt auch vollständig das Alter als Risikomodifikator und liefert altersstandardisierte Schätzungen der Übersterblichkeit, um demografische Unterschiede zu berücksichtigen.

Implikationen aller verfügbaren Beweise Die in dieser Studie bereitgestellten Ergebnisse und Karten bieten ein umfassendes Bild der Auswirkungen nicht optimaler Temperaturen auf die Sterblichkeit in ganz Europa und charakterisieren geografische Unterschiede in der Anfälligkeit städtischer Bevölkerungen auf dem gesamten Kontinent. Diese Erkenntnisse sind für politische Entscheidungsträger wertvoll, um die am stärksten gefährdeten Bevölkerungsgruppen zu schützen und Strategien zur Gestaltung wirksamer Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln. Der vorgeschlagene Modellierungsrahmen bietet eine Blaupause für die Prognose nicht optimaler temperaturbedingter Mortalität unter verschiedenen Klima- und sozioökonomischen Szenarien.

erleichtern den Vergleich über Standorte und Länder hinweg. Das Modell und die Ergebnisse können für Prognosen zukünftiger klimatischer Bedingungen unter Berücksichtigung von Verschiebungen in der Altersverteilung und verschiedenen sozioökonomischen Szenarien verwendet werden und schließlich zur Gestaltung von Anpassungsrichtlinien verwendet werden.

**Methoden
Auswahl repräsentativer Städte**

Wir haben mithilfe des Urban-Audit-Datensatzes von Eurostat eine umfassende Liste europäischer Städte erstellt.¹⁸ Diese Datenbank umfasst Daten von 870 europäischen Stadtgebieten mit mehr als 50.000 Einwohnern, basierend auf der Methodik zum Grad der Urbanisierung.¹⁹ Aus dieser Liste von Städten haben wir abgelegene Orte im Ausland mit sehr unterschiedlichen Klimazonen wie Frankreich, Spanien, Portugal und Reykjavik (Island) ausgeschlossen – z. B. die Azoren und die Kanarischen Inseln. Die endgültige Stichprobe umfasste 854 Städte aus 30 Ländern (27 Länder in der EU sowie Norwegen, der Schweiz und dem Vereinigten Königreich).

Für eine Auswahl von 232 Städten konnten wir beobachtete tägliche Sterblichkeitszahlen für alle Todesursachen oder andere Ursachen abrufen. Diese Daten wurden mit dem Internationalen Klassifikationscode für Krankheiten (ICD-9-Codes 0–799 und ICD-10-Codes A00–R99) in überlappenden Zeiträumen aus der Datenbank des Multi-Land Multi-City (MCC) Verbundforschung Wir nutzen Netzwerk.^{1,20} Die verfügbaren MCC-Städte decken die verschiedenen ab Regionen und Klimazonen, die im Urban-Audit-Datensatz dargestellt werden. Die täglichen Sterblichkeitsdaten standen sowohl als altersübergreifende als auch als altersspezifische Reihen zur Verfügung, wobei die Altersgruppen von Land zu Land unterschiedlich waren (Anhang S. 3–6).

Zusätzlich haben wir jährliche Vitalstatistiken für alle 854 Städte aus dem Datensatz von Eurostat abgerufen.²⁰ Diese Daten waren

verfügbar auf verschiedenen verschachtelten Ebenen der Nomenklatur der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). Insbesondere haben wir die rohen Sterberaten und die demografische Struktur auf der entsprechenden NUTS3-Ebene sowie die Lebenserwartung auf der NUTS2-Ebene nach 5-Jahres-Altersgruppen erfasst. Diese Informationen wurden verwendet, um die prognostizierten täglichen Sterblichkeitszahlen auf Stadtebene und das durchschnittliche Sterbealter für ausgewählte Altersgruppen im Zeitraum 2000–20 zu rekonstruieren.

Wir haben tägliche Serien der mittleren Lufttemperatur in 2 m Höhe über dem Boden für jede der 854 Städte für den Zeitraum 1990–2019 aus der fünften Generation des European Reanalysis (ERA5)-Land-Datensatzes extrahiert.²¹ ERA5-Land stellt eines der fortschrittlichsten Klima-Reanalyseprodukte dar und bietet Landoberflächendaten in einem globalen Raster mit einer Auflösung von etwa 9 km. Es wurde festgestellt, dass die ERA5-Land-Datenbank einen zufriedenstellenden Ersatz für stationäre Serien darstellt.^{22,23} Temperaturreihen wurden durch Mittelung der gitterzellenspezifischen Reihen mit Schwerpunkten innerhalb der räumlichen Grenzen jeder Stadt erstellt.

Wir haben auch mehrere stadtspezifische Variablen gesammelt, um Gefährdungsmuster zwischen städtischen Bevölkerungen in Europa zu unterscheiden. Diese Variablen wurden aus mehreren Quellen gesammelt und repräsentieren verschiedene sozioökonomische, ökologische, topografische und infrastrukturelle Merkmale. Ähnlich wie bei Mortalitäts- und Bevölkerungsdaten wurden die Variablen durch Mittelung aller verfügbaren Werte im Zeitraum 2000–2020 definiert. Konkret haben wir Informationen zu 22 Merkmalen gesammelt (beschrieben im Anhang S. 7–9). Die Gesamtbevölkerung, der Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre, die Bevölkerungsdichte und der Anteil der Einpersonenhaushalte wurden direkt aus dem Urban-Audit-Datensatz extrahiert. Andere Variablen, die auf Stadtebene nicht verfügbar waren, wurden auf höheren Verwaltungsebenen erfasst. Das Bruttoinlandsprodukt wurde aus der entsprechenden NUTS3 zugeordnet. Weitere Faktoren wie die Lebenserwartung bei der Geburt, die Arbeitslosenquote, das Bildungsniveau, die Benachteiligungsquote und die Krankenhausbettenquoten wurden auf NUTS2 erfasst. Darüber hinaus haben wir einige Variablen aus Fernerkundungssatellitenmessungen und globalen Reanalysedatensätzen abgeleitet, darunter den normalisierten Differenzvegetationsindex aus dem Bildgebungsspektorradiometer mit mittlerer Auflösung an Bord der Satelliten Terra und Aqua der US National Aeronautics and Space Administration.²⁴ und wir haben Variablen für Feinstaub (PM) abgeleitet^{2,5} und Stickstoffdioxid (NO₂) Konzentrationen von der Website der Atmospheric Composition Analysis Group.²⁵ Landbedeckungsmerkmale wurden aus den paneuropäischen hochauflösenden Schichten von Copernicus abgerufen, einschließlich Merkmalen für Undurchlässigkeit, Baumdichte, Grünland, Wasser und Nässe sowie kleine Gehölzmerkmale. Ähnlich wie bei den Temperaturdaten haben wir alle Pixel mit Schwerpunkten innerhalb der Stadtgrenzen extrahiert und gemittelt. Schließlich haben wir die mittlere und schwankende Jahrestemperatur direkt aus der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Temperaturreihe abgeleitet.

	Anzahl Städte	Städte in Mehrländer Multistädtisch Kollaborativ Forschung Netzwerk	Bevölkerung	Jährlich Todesfälle	Mitteltemperatur (IQR) in Celsius (°C)
Nordeuropa					
Dänemark	4	0	1 211 882	10 719	9.1 (3.9 bis 14.3)
Estland	3	3 (100 %)	565 429	6100	6.4 (-0.2 bis 13.9)
Finnland	9	1 (11 %)	1 903 948	16 312	5.1 (-1.3 bis 12.8)
Irland	5	1 (20 %)	1 489 041	9 162	10.2 (7.2 bis 13.6)
Lettland	10	0	1 098 034	15 893	7.4 (0.9 bis 14.6)
Litauen	6	0	1 316 515	17 917	7.8 (1.1 bis 15.0)
Norwegen	4	1 (25 %)	1 098 188	7542	5.5 (0.4 bis 11.2)
Schweden	14	3 (21 %)	3 726 071	30 938	7.4 (1.3 bis 13.8)
Vereinigtes Königreich	135	103 (76 %)	35 643 424	301 742	9.9 (6.0 bis 13.9)
Westeuropa					
Österreich	6	0	2 454 346	21 943	8.7 (1.8 bis 15.2)
Belgien	15	0	3 251 039	31 110	10.7 (6.0 bis 15.5)
Frankreich	72	18 (25 %)	24 360 709	194 887	12.1 (7.2 bis 16.8)
Deutschland	127	12 (9%)	28 937 024	310 577	10.0 (4.3 bis 15.5)
Luxemburg	1	0	91 239	647	9.7 (4.3 bis 14.9)
Niederlande	47	5 (11 %)	7 387 464	63 222	10.7 (6.0 bis 15.4)
Schweiz	12	8 (67 %)	2 506 596	20 025	9.1 (2.9 bis 14.8)
Osteuropa					
Bulgarien	18	0	3 232 248	46 878	11.8 (4.5 bis 19.0)
Tschechien	18	3 (17 %)	3 172 388	33 165	9.0 (2.4 bis 15.4)
Ungarn	19	0	3 499 014	45 490	11.5 (4.1 bis 18.6)
Polen	68	0	12 999 552	144 574	9.1 (2.5 bis 15.8)
Rumänien	35	8 (23 %)	7 627 652	100 534	10.8 (3.0 bis 18.3)
Slowakei	8	0	1 122 490	10 912	9.4 (2.0 bis 16.3)
Südeuropa					
Kroatien	7	0	1 390 152	16 410	13.0 (6.8 bis 19.4)
Zypern	3	3 (100 %)	599 105	4085	20.3 (13.9 bis 26.4)
Griechenland	14	1 (7%)	4 296 023	45 581	15.7 (9.5 bis 22.1)
Italien	87	16 (18 %)	21 359 668	221 951	14.6 (8.8 bis 20.4)
Malta	1	0	214 150	1627	19.3 (14.8 bis 23.8)
Portugal	14	2 (14 %)	4 384 586	43 230	15.2 (11.4 bis 19.1)
Slowenien	2	0	388 879	3516	10.4 (3.6 bis 16.8)
Spanien	90	44 (49 %)	23 684 538	211 589	15.3 (10.2 bis 20.3)
Gesamt	854	232 (27 %)	205 011 394	1 988 278	10.8 (5.0 bis 16.8)

Tabelle 1. Beschreibende Statistiken ausgewählter Städte nach Ländern

Stadt- und altersspezifische Risikoabschätzung

Die Mortalitätsfolgenabschätzung basierte auf einem fortschrittlichen dreistufigen Modellierungsrahmen. Vollständige Modellierungs- und Berechnungsdetails finden Sie im Anhang (S. 10). In der ersten Phase haben wir mithilfe eines Quasi-Poisson-Regressionsmodells temperaturbedingte Risiken in der Untergruppe von 232 Städten mit beobachteten täglichen Sterblichkeitsdaten geschätzt. Expositions-Reaktions-Funktionen (ERFs) zwischen Temperatur und Sterblichkeit, die Nichtlinearität und verzögerte Effekte berücksichtigen, wurden mit einem nichtlinearen Modell mit verteilter Verzögerung spezifiziert.²⁶ unter Verwendung einer Parametrisierung, die zuvor in anderen Mehrländeranalysen angewendet wurde.¹ Das Modell umfasste auch Indikatorterme für den Wochentag und einen natürlichen Spline

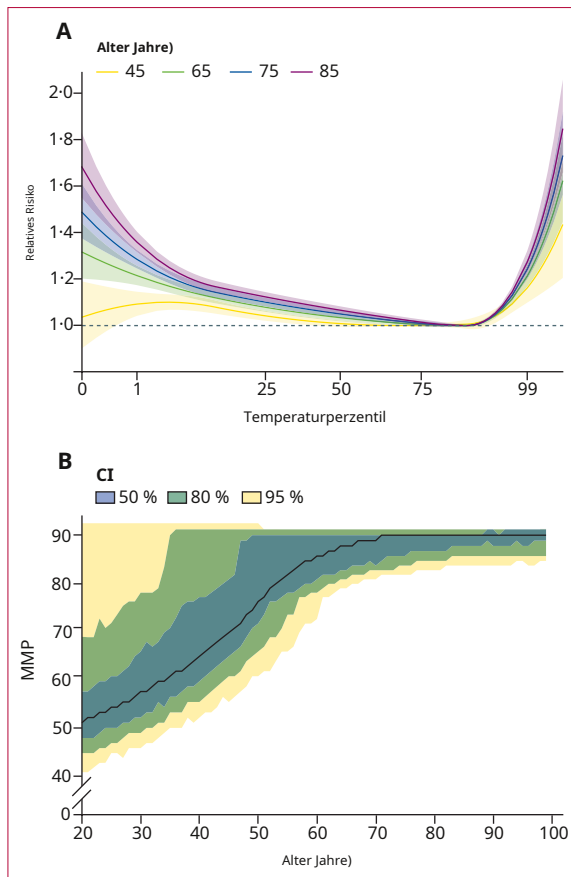


Abbildung 1: Gesamalterseffekt auf das vorhergesagte Risiko
 (A) Gepoolte kumulative Gesamtexpositions-Reaktions-Beziehung, vorhergesagt für verschiedene Altersgruppen. (B) MMP im Vergleich zum Alter. Gefüllte Bänder stellen verschiedene Grade von CI dar. MMP = minimale Mortalitätsperzentile.

Zeit mit 7 Freiheitsgraden pro Jahr zur Kontrolle zeitlich variierender Störfaktoren. Wir haben Daten für August 2003 aus dem Modell ausgeschlossen, da die Ergebnisse empfindlich auf den außergewöhnlichen Mortalitätseffekt im Zusammenhang mit der europäischen Hitzewelle an einigen Standorten reagierten.

In jeder Stadt wird das Modell auf mehrere altersspezifische Serien (sofern verfügbar) oder andernfalls auf die einzelnen Sterblichkeitsdaten für alle Altersgruppen angepasst. Altersgruppen, die von Land zu Land unterschiedlich sind (siehe Anhang S. 5), wurden bei Bedarf zusammengelegt, um eine Gesamt-todeszahl von mindestens 5.000 sicherzustellen und Konvergenzprobleme in der ersten Regressionsstufe zu vermeiden.²⁷ Daher haben wir 577 altersspezifische Schätzungen in den 232 Städten erhalten. Anschließend haben wir die reduzierten Koeffizienten extrahiert, die die kumulativen Gesamt-ERFs für jede Stadt und Altersgruppe darstellen.²⁸

In der zweiten Phase haben wir zunächst alle 577 ERF-Koeffizienten in einem multivariaten Metaregressionsmodell mit wiederholten Messungen zusammengefasst, wobei zufällige Effekte auf Stadtebene mehreren altersspezifischen Beobachtungen zugewiesen wurden.²⁹ Das Modell umfasste glatte Terme zur Darstellung von Alterseffekten und zusammengesetzte Vulnerabilitätssterme zur Erfassung geografischer Unterschiede bei temperaturbedingten Mortalitätsrisiken

Ergänzung zu Indikatoren für die vier Kardinalregionen in Europa.³⁰

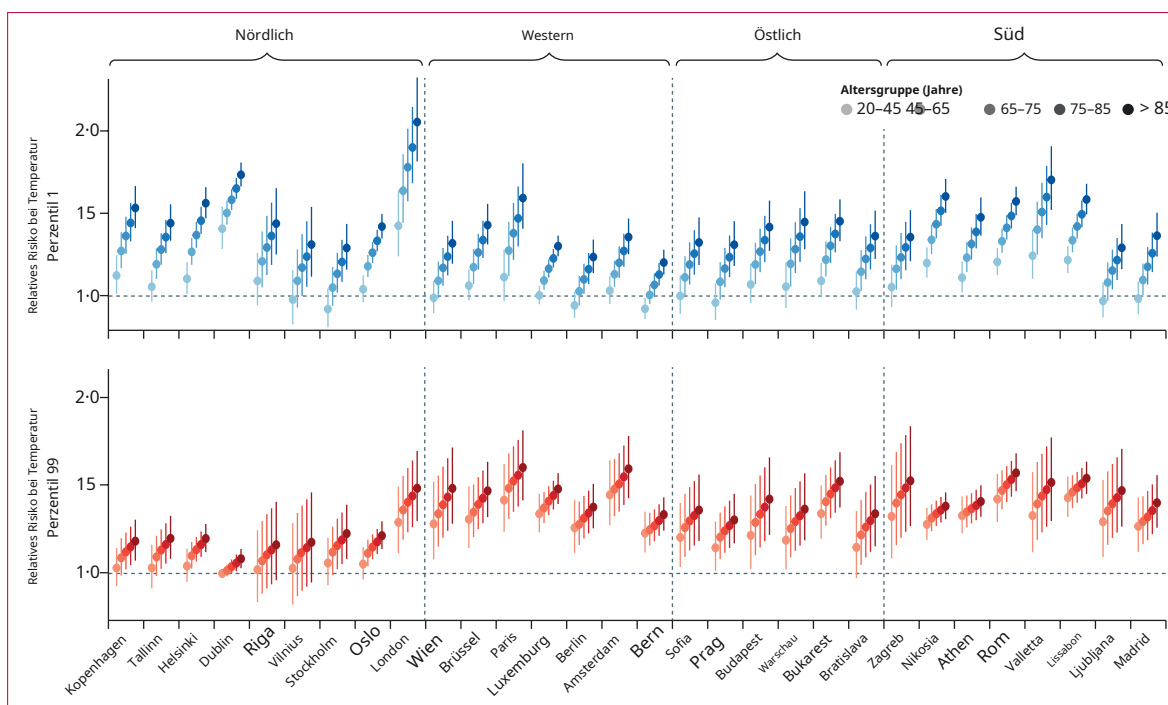
Um Altersunterschiede zu modellieren, haben wir zunächst jeder stadtspezifischen Altersgruppe einen spezifischen Wert zugeordnet. Dieser Wert entsprach dem durchschnittlichen Sterbealter, das anhand altersspezifischer 5-Jahres-Sterberaten berechnet wurde. Wir haben eine kontinuierliche Altersvariable erstellt, die als linearer Term in das Meta-Regressionsmodell einbezogen wurde. Die zusammengesetzten Schwachstellenbegriffe wurden mithilfe der partiellen kleinsten Quadrate (PLS) erstellt.³¹ Reduzierung der 22 stadtspezifischen Merkmale. Das PLS-Verfahren ermöglichte es uns, Informationen aus einer großen Anzahl stark korrelierter Variablen zu kombinieren, um eine geringere Anzahl unkorrelierter Komponenten zu definieren, die leicht in das Metaanalyse-Framework integriert werden können, um geografische Risikounterschiede zu entwirren. Wir haben schließlich die ersten vier PLS-Komponenten nach einer Auswahl basierend auf der Minimierung des Akaike-Informationskriteriums des Meta-Regressionsmodells einbezogen. Darüber hinaus haben wir räumliche Unterschiede in ERFs erfasst, die nicht durch Stadtmerkmale erklärt werden, indem wir Residuen aus der Metaregression mithilfe von gewöhnlichem Kriging interpoliert haben.³² Durch dieses Verfahren entstand ein kontinuierliches räumliches Feld lokaler Unterschiede in der Vulnerabilität (Anhang, S. 20–23).

Wir verwendeten diese Modelle als Vorhersageinstrumente, um alters- und stadtspezifische ERFs für die gesamte Gruppe von 854 Städten zu extrapolieren. Die Punktschätzungen und die zugehörige Varianz- oder Kovarianzmatrix der ERF-Koeffizienten wurden als Summe der Vorhersagen aus dem Meta-Regressionsmodell unter Berücksichtigung spezifischer Alterswerte und beobachteter Merkmale, reduziert auf PLS-Komponenten, sowie der durch das Kriging-Feld definierten Abweichungen berechnet. Aus ERFs haben wir relative Risiken beim ersten und 99. Perzentil sowie beim minimalen Mortalitätsperzentil (MMP) und der minimalen Mortalitätstemperatur (MMT) gemeldet. Die Unsicherheit bei MMT und MMP wurde nach einer zuvor verwendeten Methode bewertet.

33

Folgenabschätzung für die Mortalität

In dieser letzten Phase verwendeten wir den beschriebenen Rahmen, um ERFs für fünf Altersgruppen (20–44, 45–64, 65–74, 75–84 und ≥85 Jahre) für jede der 854 Städte vorherzusagen. Daten für Personen unter 20 Jahren wurden aufgrund der geringen Verfügbarkeit und der hohen Unsicherheit der Daten in den jüngsten Altersgruppen von der Folgenabschätzung ausgeschlossen. Wir haben auch das stadtspezifische durchschnittliche Sterbealter innerhalb jeder Altersgruppe vorhergesagt, das aus rohen Sterberaten und der Lebenserwartung von 85 Jahren für die älteste Altersgruppe berechnet wurde. Anschließend haben wir für jede Stadt und Altersgruppe die zusätzliche Zahl an Todesfällen aufgrund von Hitze und Kälte separat anhand einer Standardmethode berechnet.³⁴ Diese Zahlen wurden dann durch die Gesamtbevölkerung dividiert, um den Beitrag jeder Altersgruppe zu den übermäßigen Todesfällen zu berechnen. Um die Auswirkungen an Standorten mit potenziell unterschiedlichen demografischen Verteilungen zu vergleichen, haben wir dann standardisierte Sterberaten wie folgt berechnet: Die überschüssige Zahl an Todesfällen wurde zunächst durch die Bevölkerung dividiert, um das Ergebnis zu erhalten



Figur 2 Kälte (erstes Temperaturperzentil, in Blau) und Hitze (99. Temperaturperzentil, in Rot) relative Risiken in Hauptstädten für fünf Altersgruppen Die relativen Risiken werden anhand des durchschnittlichen Sterbealters für jede Gruppe vorhergesagt. Die Trennungen entsprechen der M49-Regionsklassifizierung.

altersspezifische Übersterblichkeitsraten, die dann in standardisierten Sterberaten zusammengefasst wurden, die für jede Stadt berechnet wurden (unter Verwendung der europäischen Standardbevölkerung von 2013 als Referenz).

Die Unsicherheit hinsichtlich übermäßiger Todesfälle und Raten wurde mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen als empirische KIs quantifiziert, wobei eine zuvor vorgeschlagene Methode angepasst wurde, um die Abhängigkeiten im Zusammenhang mit der Bündelung stadtspezifischer Risiken zu berücksichtigen. Konkret führten wir 1000 Monte-Carlo-Iterationen durch, indem wir direkt Stichproben aus den geschätzten Koeffizienten und der zugehörigen Varianz- und Kovarianzmatrix des Meta-Regressionsmodells und dann aus den Residuen des Kriging-Verfahrens machten. Einzelheiten finden Sie im Anhang (S. 24).

Rolle der Finanzierungsquelle

Der Geldgeber der Studie spielte keine Rolle beim Studiendesign, der Datenerfassung, Datenanalyse, Dateninterpretation oder dem Verfassen des Berichts.

Ergebnisse

Auf Länderebene aggregierte deskriptive Statistiken sind in Tabelle 1 aufgeführt, einschließlich der Teilmenge von 232 MCC-Städten mit beobachteten Mortalitätsreihen, die zur Schätzung der Risikoassoziationen verwendet wurden (Anhang S. 6). Die Bewertung umfasste eine Bevölkerung von über 200 Millionen Einwohnern der Städte in den 30 Ländern. Luxemburg ist das kleinste Land mit einer einzigen Stadt, die 91.239 Einwohner vertritt, während das Vereinigte Königreich mit 135 Städten und mehr als 35 Millionen Einwohnern die größte Vertretung hatte. Die Auswirkungen auf die Sterblichkeit

Die Schätzung umfasste fast 2 Millionen Todesfälle pro Jahr in den 854 Städten. Die Länder repräsentieren unterschiedliche Klimazonen innerhalb Europas, mit Durchschnittstemperaturen zwischen 5,1 °C (IQR -1,3 bis 12,8) in Finnland und 20,3 °C (13,9 bis 26,4) in Zypern.

Die gepoolten Expositions-Reaktions-Zusammenhänge für verschiedene Altersgruppen, die die durchschnittlichen temperaturbedingten relativen Mortalitätsrisiken (RR) in ganz Europa darstellen und als Temperaturperzentile unter Verwendung der europäischen Durchschnittstemperaturverteilung dargestellt werden, sind in Abbildung 1A dargestellt. Die Kurven zeigen die übliche umgekehrte J-Form mit einem mäßig hohen MMP und einem steigenden Sterblichkeitsrisiko sowohl bei kälteren als auch bei heißeren Temperaturen. Die Kurvenformen waren für die Altersgruppe ab 65 Jahren sehr ähnlich, wobei die Kurven mit zunehmendem Alter steiler wurden. Insbesondere variierten die kältebedingten RRs, die im ersten Perzentil im Vergleich zum MMP geschätzt wurden, zwischen 1,21 (95 %-KI 1,17-1,26) für Personen im Alter von 65 Jahren und 1,36 (1,31-1,40). für Personen ab 85 Jahren. Der hitzebedingte RR am 99. Perzentil stieg von 1,21 (1,17-1,26) für Personen im Alter von 65 Jahren auf 1,27 (1,23-1,32) für Personen im Alter von 85 Jahren. Die für Menschen im Alter von 45 Jahren vorhergesagte Kurve war viel flacher als für Menschen im Alter von 65 Jahren und älter, mit einem niedrigeren MMP und einem leicht geringeren Risiko, extremer Kälte ausgesetzt zu sein, aber immer noch ein mit Hitze verbundenes Risiko. Die Veränderung des MMP mit dem Alter ist in Abbildung 1b dargestellt, was auf einen zunehmenden Trend des MMP hindeutet, bis er im Alter von 70 Jahren das 90. Temperaturperzentil erreicht. Die Unsicherheit des MMP im jüngeren Alter spiegelt die geringere statistische Aussagekraft in diesen Altersgruppen wider.

	Übermäßige Todesfälle (kalt)	Übermäßige Todesfälle (Hitze)	Zuordenbarer Bruchteil (%; kalt)	Zurechenbar Bruchteil (%; Wärme)	Übermäßiger Tod Tarife (pro 100 000 Personen-Jahre; kalt)	Übermäßiger Tod Tarife (pro 100 000 Person-Jahre; Hitze)	Standardisiert übermäßiger Tod Tarife (pro 100 000 Personen-Jahre; kalt)	Standardisiert übermäßiger Tod Tarife (pro 100 000 Personenjahre; Hitze)
Nordeuropa								
Dänemark	1319 (1080 bis 1537)	44 (24 bis 61)	8,64 (7,08 bis 10,08)	0,29 (0,16 bis 0,40)	144 (118 bis 168)	5 (3 bis 7)	165 (134 bis 193)	6 (3 bis 8)
Estland	727 (495 bis 954)	29 (11 bis 46)	8,49 (5,78 bis 11,14)	0,34 (0,12 bis 0,53)	165 (112 bis 217)	7 (2 bis 10)	177 (120 bis 232)	7 (3 bis 11)
Finnland	2231 (1548 bis 2821)	69 (26 bis 108)	9,28 (6,44 bis 11,74)	0,29 (0,11 bis 0,45)	153 (106 bis 193)	5 (2 bis 7)	165 (115 bis 209)	5 (2 bis 8)
Irland	1664 (1442 bis 1866)	10 (1 bis 18)	12,71 (11,00 bis 14,24)	0,08 (0,01 bis 0,14)	153 (132 bis 171)	1 (0 bis 2)	227 (196 bis 255)	1 (0 bis 3)
Lettland	2095 (1322 bis 2855)	126 (-17 bis 251)	9,72 (6,14 bis 13,25)	0,59 (-0,08 bis 1,16)	240 (151 bis 327)	14 (-2 bis 29)	243 (154 bis 331)	15 (-2 bis 29)
Litauen	2301 (1431 bis 3178)	141 (-33 bis 289)	9,39 (5,84 bis 12,96)	0,58 (-0,13 bis 1,18)	223 (138 bis 307)	14 (-3 bis 28)	233 (145 bis 322)	14 (-3 bis 29)
Norwegen	1085 (794 bis 1356)	28 (10 bis 42)	9,89 (7,24 bis 12,36)	0,25 (0,09 bis 0,38)	131 (96 bis 163)	3 (1 bis 5)	167 (123 bis 209)	4 (2 bis 6)
Schweden	4168 (3297 bis 4909)	134 (83 bis 181)	8,92 (7,06 bis 10,51)	0,29 (0,18 bis 0,39)	148 (117 bis 175)	5 (3 bis 6)	153 (121 bis 181)	5 (3 bis 7)
Großbritannien	42 915 (37 396 bis 47 920)	762 (530 bis 975)	9,87 (8,60 bis 11,03)	0,18 (0,12 bis 0,22)	162 (141 bis 181)	3 (2 bis 4)	183 (159 bis 204)	3 (2 bis 4)
Gesamt	58 505 (51 237 bis 65 142)	1343 (880 bis 1763)	9,76 (8,55 bis 10,87)	0,22 (0,15 bis 0,29)	163 (142 bis 181)	4 (2 bis 5)	183 (160 bis 204)	4 (3 bis 6)
Westeuropa								
Osterreich	1586 (845 bis 2228)	215 (158 bis 273)	4,97 (2,65 bis 6,98)	0,67 (0,49 bis 0,86)	81 (43 bis 114)	11 (8 bis 14)	90 (48 bis 127)	12 (9 bis 15)
Belgien	2093 (1422 bis 2763)	247 (196 bis 298)	4,48 (3,04 bis 5,92)	0,53 (0,42 bis 0,64)	85 (58 bis 113)	10 (8 bis 12)	82 (56 bis 108)	10 (8 bis 12)
Frankreich	17 730 (12 790 bis 21 886)	1388 (1 107 bis 1 653)	5,96 (4,30 bis 7,35)	0,47 (0,37 bis 0,56)	99 (71 bis 122)	8 (6 bis 9)	89 (63 bis 110)	7 (6 bis 8)
Deutschland	19 728 (13 778 bis 25 405)	2886 (2380 bis 3410)	4,37 (3,05 bis 5,63)	0,64 (0,53 bis 0,76)	84 (59 bis 109)	12 (10 bis 15)	81 (57 bis 105)	12 (10 bis 14)
Luxemburg	46 (27 bis 64)	6 (4 bis 7)	4,76 (2,80 bis 6,63)	0,59 (0,44 bis 0,73)	66 (39 bis 91)	8 (6 bis 10)	84 (50 bis 117)	10 (8 bis 13)
Niederlande	3419 (1463 bis 5258)	479 (346 bis 601)	3,68 (1,58 bis 5,67)	0,52 (0,37 bis 0,65)	61 (26 bis 93)	8 (6 bis 11)	70 (30 bis 107)	9 (7 bis 12)
Schweiz	1538 (889 bis 2108)	213 (172 bis 250)	4,91 (2,84 bis 6,73)	0,68 (0,55 bis 0,80)	78 (45 bis 107)	11 (9 bis 13)	78 (45 bis 108)	11 (9 bis 13)
Gesamt	46 141 (35 034 bis 56 752)	5433 (4511 bis 6329)	4,84 (3,68 bis 5,96)	0,57 (0,47 bis 0,66)	86 (66 bis 106)	10 (8 bis 12)	83 (63 bis 102)	10 (8 bis 12)
Osteuropa								
Bulgarien	5745 (4458 bis 7031)	522 (261 bis 744)	9,25 (7,18 bis 11,32)	0,84 (0,42 bis 1,20)	221 (172 bis 271)	20 (10 bis 29)	266 (206 bis 324)	24 (12 bis 34)
Tschechien	3716 (2391 bis 4932)	235 (139 bis 324)	8,00 (5,15 bis 10,62)	0,51 (0,30 bis 0,70)	147 (95 bis 196)	9 (6 bis 13)	180 (117 bis 238)	11 (7 bis 15)
Ungarn	5295 (4036 bis 6543)	402 (230 bis 563)	8,78 (6,69 bis 10,85)	0,67 (0,38 bis 0,93)	189 (144 bis 233)	14 (8 bis 20)	211 (162 bis 261)	16 (9 bis 22)
Polen	16 510 (12 280 bis 20 579)	1 263 (754 bis 1737)	8,44 (6,28 bis 10,52)	0,65 (0,39 bis 0,89)	159 (118 bis 198)	12 (7 bis 17)	182 (136 bis 227)	14 (8 bis 19)
Rumänien	12 939 (10 280 bis 15 493)	1 137 (633 bis 1598)	10,01 (7,95 bis 11,99)	0,88 (0,49 bis 1,24)	215 (171 bis 258)	19 (11 bis 27)	262 (209 bis 313)	23 (13 bis 32)
Slowakei	1 203 (890 bis 1507)	99 (57 bis 138)	8,51 (6,30 bis 10,67)	0,70 (0,40 bis 0,97)	137 (101 bis 172)	11 (6 bis 16)	202 (152 bis 252)	16 (10 bis 23)
Gesamt	45 408 (34 920 bis 55 579)	3659 (2203 bis 4970)	8,94 (6,88 bis 10,94)	0,72 (0,43 bis 0,98)	180 (139 bis 220)	15 (9 bis 20)	213 (165 bis 259)	17 (10 bis 23)
Südeuropa								
Kroatien	1714 (1177 bis 2240)	412 (277 bis 535)	7,52 (5,17 bis 9,83)	1,81 (1,21 bis 2,35)	156 (107 bis 203)	37 (25 bis 49)	178 (123 bis 232)	42 (28 bis 55)
Zypern	507 (404 bis 611)	74 (52 bis 92)	8,29 (6,60 bis 9,99)	1,20 (0,86 bis 1,51)	111 (88 bis 134)	16 (11 bis 20)	166 (132 bis 199)	23 (17 bis 29)
Griechenland	4693 (3442 bis 5899)	738 (459 bis 994)	6,98 (5,12 bis 8,78)	1,10 (0,68 bis 1,48)	138 (101 bis 173)	22 (14 bis 29)	127 (93 bis 160)	20 (13 bis 27)
Italien	23 283 (17 955 bis 28 269)	5034 (3942 bis 6112)	6,75 (5,21 bis 8,20)	1,46 (1,14 bis 1,77)	135 (104 bis 164)	29 (23 bis 36)	112 (86 bis 136)	25 (19 bis 30)
Malta	178 (129 bis 226)	35 (22 bis 47)	7,73 (5,62 bis 9,82)	1,51 (0,95 bis 2,06)	104 (76 bis 133)	20 (13 bis 28)	138 (100 bis 175)	27 (16 bis 36)
Portugal	4573 (3539 bis 5587)	529 (385 bis 658)	6,96 (5,38 bis 8,50)	0,80 (0,59 bis 1,00)	132 (102 bis 162)	15 (11 bis 19)	129 (100 bis 158)	15 (11 bis 19)
Slowenien	278 (163 bis 381)	70 (44 bis 93)	5,41 (3,17 bis 7,41)	1,37 (0,86 bis 1,81)	90 (53 bis 124)	23 (14 bis 30)	98 (58 bis 134)	25 (16 bis 33)
Spanien	18.342 (12.300 bis 23.265)	2848 (2053 bis 3589)	5,55 (3,72 bis 7,04)	0,86 (0,62 bis 1,09)	98 (66 bis 124)	15 (11 bis 19)	88 (59 bis 111)	14 (10 bis 18)
Gesamt	53 566 (40 211 bis 65 368)	9738 (7455 bis 11879)	6,34 (4,76 bis 7,74)	1,15 (0,88 bis 1,41)	120 (90 bis 146)	22 (17 bis 27)	106 (79 bis 129)	19 (15 bis 24)
Gesamt	203 620 (180 882 bis 224 613)	20 173 (17 261 bis 22 934)	7,01 (6,23 bis 7,73)	0,69 (0,59 bis 0,79)	128 (113 bis 141)	13 (11 bis 14)	129 (114 bis 142)	13 (11 bis 14)

Tabelle 2 Jährliche Überschusszahl an Todesfällen auf Länderebene, zurechenbare Anteile sowie rohe und altersstandardisierte Raten für Kälte und Hitze für die Bevölkerung im Alter von 20 Jahren und älter

Ein Vergleich der altersspezifischen Risiken, die mit Kälte und Hitze in den Hauptstädten jedes Landes verbunden sind, ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie zeigt die RRs beim ersten und 99. Perzentil im Vergleich zur MMT, die für fünf verschiedene Altersgruppen berechnet wurde. Die kältebedingte RR nimmt mit zunehmendem Alter zu und ist im Norden und Süden etwas höher

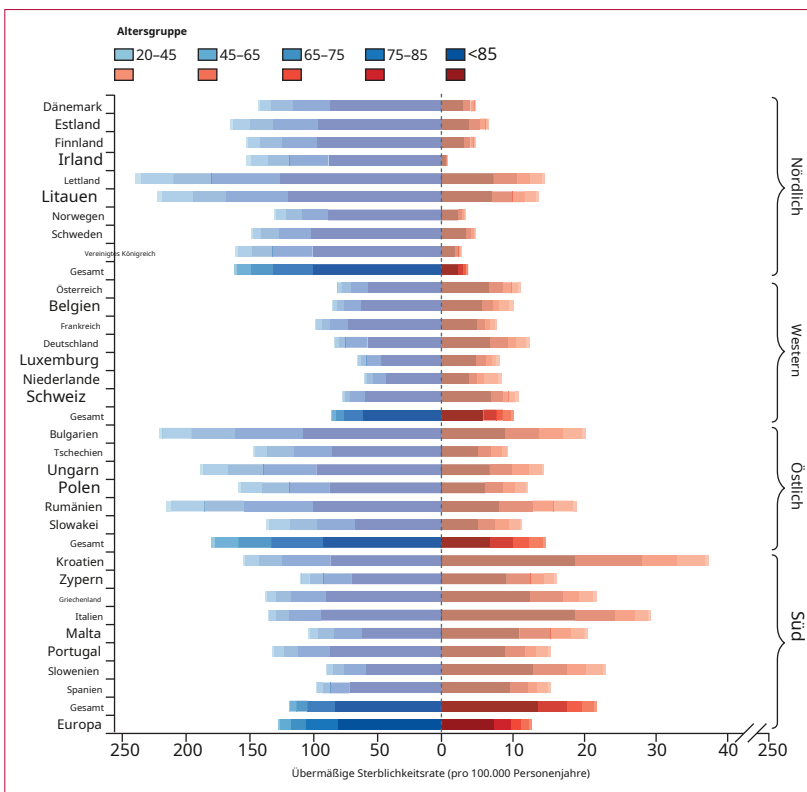
Ländern als in westlichen und östlichen Ländern. Hohe Risiken für die Altersgruppe 85 Jahre und älter wurden in London (Großbritannien; RR von 2,05 [95 %-KI 1,82–2,32]), Dublin (Irland; 1,73 [1,66–1,79] geschätzt. 81]) und Valletta (Malta; 1,70 [1,52–1,91]). Hitzebedingte RRs zeigten ebenfalls einen altersabhängigen Trend und waren im Norden im Allgemeinen niedriger

Region. Die Stadt mit den höchsten hitzebedingten RRs über alle Altersgruppen hinweg war Paris (Frankreich) mit einem RR von 1,60 (1,42–1,81) für die Altersgruppe ab 85 Jahren.

Die Auswirkungen auf die Sterblichkeit, quantifiziert als zusätzliche Anzahl an Todesfällen und Anteilen sowie standardisierte Raten für 100.000 Personenjahre, sind in Tabelle 2 aufgeführt. In den 30 Ländern haben wir eine jährliche durchschnittliche Überschreitung von 203.620 geschätzt (empirische 95 %). KI 180.882 bis 224.613) Todesfälle durch Kälte und 20.173 (17.261 bis 22.934) durch Hitze, was einem Anteil von 7,01 % (6,23 bis 7,73) bzw. 0,69 % (0,59 bis 0,79). Bei der Angabe standardisierter Überschreitungsraten entsprechen diese Zahlen 129 (114 bis 142) bzw. 13 (11 bis 14) Übersterblichkeitsraten pro 100.000 Personenjahre. Abbildung 3 zeigt die rohen Übersterblichkeitsraten, aufgeschlüsselt nach Altersgruppen auf Länderebene. Sowohl bei Kälte als auch bei Hitze war der Effekt in der ältesten Altersgruppe deutlich größer, mit 82 (72 bis 91) und sieben (sechs bis acht) zusätzlichen Todesfällen pro 100.000 Personenjahre. Dieser Überschuss machte etwa 60 % der gesamten Kälte- und Wärmebelastung aus. Im Gegensatz dazu gab es in der jüngsten Altersgruppe etwa einen Todesfall pro 100.000 Personenjahre durch Kälte und weniger als einen pro 100.000 Personenjahre durch Hitze. Die Auswirkungen der Kälte sind überall groß, in der westlichen Region jedoch im Allgemeinen geringer und in den nördlichen und östlichen Regionen größer, wobei in Lettland pro 100.000 Personenjahre maximal 240 (151 bis 327) zusätzliche Todesfälle aufgrund von Kälte zu verzeichnen sind. Es besteht eine größere Heterogenität bei den Auswirkungen der Hitze, die in der nördlichen Region mit Ausnahme von Lettland und Litauen gering ist und in der südlichen Region viel höher ist, mit maximal 37 (25 bis 49) zusätzlichen Todesfällen pro 100.000 Einwohner -jahre in Kroatien.

Die vollständige geografische Verteilung der Temperatureffekte über die 854 Städte ist in Abbildung 4 dargestellt. MMP und MMT zeigen insgesamt einen Nord-Süd-Gradienten, jedoch in entgegengesetzte Richtungen, wobei der MMP gleichmäßig abnimmt und der MMT zunimmt, wenn die Temperaturverteilung heißer wird, allerdings mit lokale Ausnahmen. Der MMP reicht vom 68. Perzentil in Ferrol und San Sebastian (Spanien) mit insgesamt niedrigen Werten im Mittelmeerraum Europa bis zum 96. Perzentil in mehreren Städten im Vereinigten Königreich und Irland. Die MMTs reichen von 14,5 °C (empirisches 95 %-KI 14,1–15,0) in Aberdeen (Großbritannien) bis 27,2 °C (27,0–27,8) in Nikosia (Zypern).

Kälte- und hitzebedingte standardisierte Übersterblichkeitsraten sind in Abbildung 4 auf Stadtebene und in Tabelle 2 auf Länderebene dargestellt. Diese standardisierten Risikozusammenfassungen berücksichtigen demografische Unterschiede und bieten einen faireren geografischen Vergleich als reine Übersterblichkeitsraten. Erkältungsbedingte standardisierte Überschreitungen sind in den östlichsten Ländern sowie im Vereinigten Königreich und Irland wichtig, mit einem Maximum von 353 (empirisches 95 %-KI 272–429) Todesfällen pro 100.000 Personenjahre in Vidin (Bulgarien). Hinsichtlich der hitzebedingten Auswirkungen gab es ein klares Nordwest-Südost-Gefälle mit relativ geringen standardisierten Überschreitungsraten in Irland und dem Vereinigten Königreich, aber großen standardisierten Überschreitungsraten im Südosten

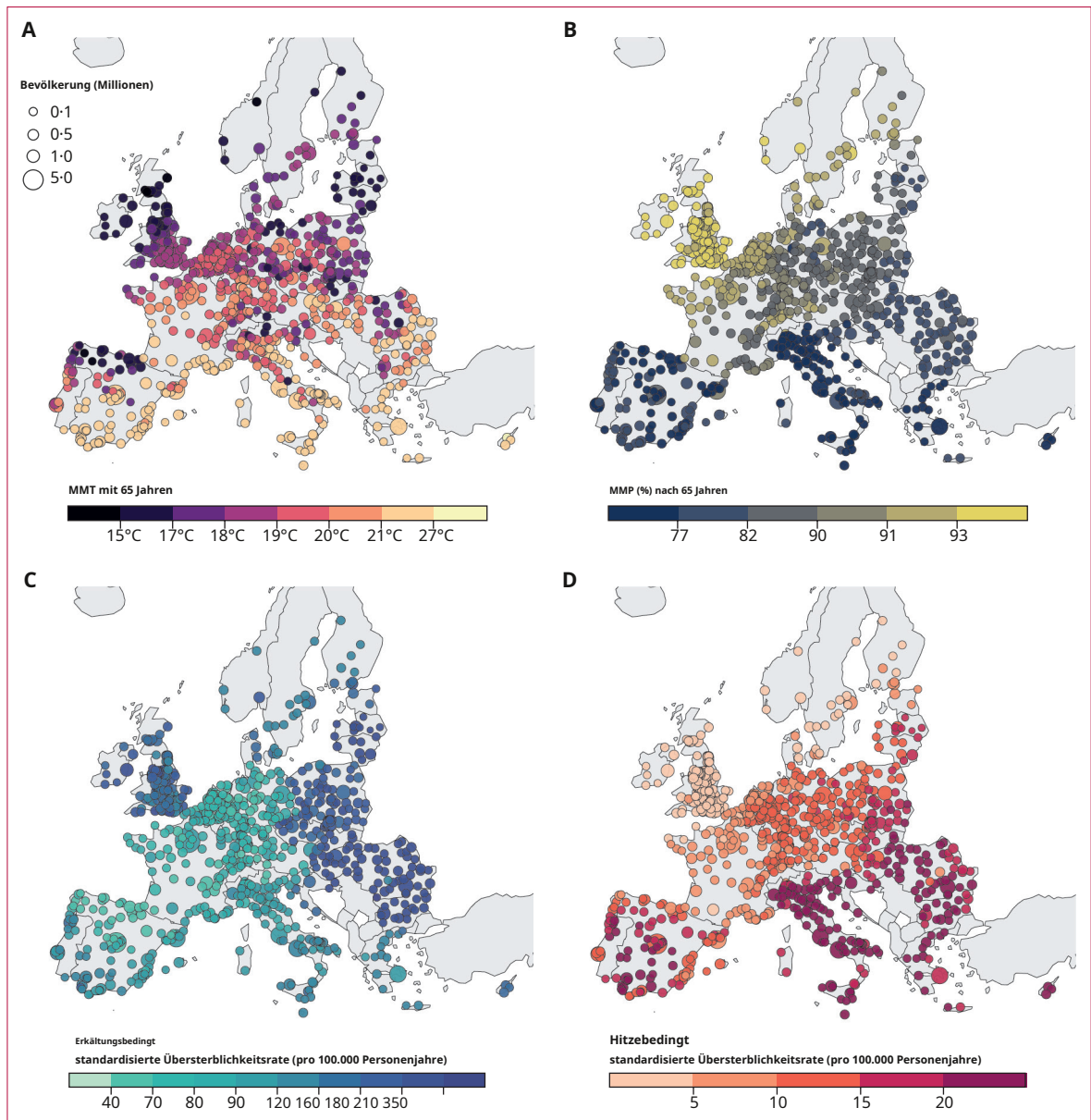


Figur 3 Jährliche Rohsterblichkeitsraten auf Länderebene durch Kälte (in Blau) und Hitze (in Rot), aufgeschlüsselt nach Altersgruppe

Länder. Die höchste hitzebedingte standardisierte Übersterblichkeitsrate betrug 58 (37–76) pro 100.000 Personenjahre in Osijek (Kroatien). Die hitzebedingten standardisierten Raten waren in der östlichen Region ähnlich wie in der südlichen Region (siehe Tabelle 2), wohingegen die übermäßigen Todesfälle in Abbildung 3 in südlichen Ländern höher waren (da die Bevölkerung im Allgemeinen älter war). Es gab einige Hinweise auf leichte Küsteneffekte, wobei die kältebedingten und die hitzebedingten Auswirkungen an Standorten in der Nähe des Meeres im Vergleich zu ihren Nachbarn im Binnenland stärker und schwächer durch Hitze verursacht wurden. Alle diese Muster spiegeln Beiträge von Merkmalen auf Stadtebene wider, kombiniert in zusammengesetzten Vulnerabilitätsindizes, die im Meta-Regressionsmodell der zweiten Stufe enthalten sind (Anhang, S. 16–19).

Diskussion

Diese Studie bietet eine umfassende Abschätzung der Auswirkungen auf die Sterblichkeit im Zusammenhang mit nicht optimalen Temperaturen in der städtischen Bevölkerung Europas, indem Risiken und Auswirkungen in 854 Städten auf dem gesamten Kontinent bewertet werden. Die Ergebnisse zeigten große Unterschiede in der Anfälligkeit zwischen den Altersgruppen und eine geringe Anfälligkeit für Kälte bei jüngeren Altersgruppen, was durch niedrigere MMPs und eine flachere Expositions-Reaktions-Funktion bei niedrigeren Perzentilen angezeigt wird. Auch die Anfälligkeit gegenüber Hitze nahm mit zunehmendem Alter zu, allerdings war der Unterschied weniger groß als bei Kälte, was darauf hindeutet, dass die Wirkung von Hitze alle Altersgruppen gleichmäßiger betraf. Insgesamt trug die Bevölkerung im Alter von über 85 Jahren etwa 60 % zur Gesamtsterblichkeitslast bei.



Figur 4: Karten der jährlichen Auswirkungen von Kälte und Hitze auf die Sterblichkeit in europäischen Städten. MMTs (A) und MMPs (B) im Alter von 65 Jahren vorhergesagt und standardisierte Übersterblichkeitsraten für Hitze (C) und Kälte (D). MMP = minimale Mortalitätsperzentile. MMT = minimale Sterblichkeitstemperatur.

Bei der Standardisierung der Altersunterschiede stellten wir erhebliche Unterschiede in der Anfälligkeit zwischen den Regionen fest. Insbesondere in Osteuropa kam es zu verstärkten Auswirkungen von Kälte und Hitze, wobei Länder wie Kroatien, Bulgarien und Rumänien eine höhere Anfälligkeit aufwiesen als Länder in Westeuropa. Die Übersterblichkeit war in Westeuropa im Allgemeinen niedriger als in den anderen Regionen, einschließlich Nord- und Südeuropa, mit Ausnahme einiger sehr großer Städte wie London (Großbritannien) und Paris (Frankreich). Die nördlichen Länder wiesen die geringsten Hitzrisiken auf, waren aber angesichts der viel höheren Temperaturen auch vergleichsweise wenig anfällig für Kälte

Exposition gegenüber niedrigen Temperaturen, was auf eine Anpassungsfähigkeit an streng kalte Klimazonen hindeutet, insbesondere im Vergleich zu Ländern in der östlichen Region. Wir fanden auch Auswirkungen im Zusammenhang mit Hitze an mediterranen Standorten, allerdings waren diese Auswirkungen geringer, wenn Altersunterschiede berücksichtigt wurden. Es lassen sich auch einige Unterschiede innerhalb der Länder feststellen, insbesondere bei der MMT, die mit Schwankungen des lokalen Klimas und städtischen Wärmeinseleffekten zusammenhängen.

Die beobachteten Unterschiede in der Anfälligkeit gegenüber Hitze und Kälte könnten mit einer Reihe von Faktoren zusammenhängen, darunter dem lokalen Klima, städtischen Wärmeinseleffekten,

Zugang zur Gesundheitsversorgung oder Landbedeckung (z. B. die Zugänglichkeit von Wasser oder Bäumen). Frühere Studien haben Zusammenhänge zwischen der Anfälligkeit für Hitze und Grünflächen, der PM-Bevölkerungsdichte oder wirtschaftlichen Ungleichheiten festgestellt. Die in dieser Studie erstellten zusammengesetzten Vulnerabilitätsindizes deuten auch auf Auswirkungen aufgrund der Stadtgröße, der Nähe zu Wasser und Grünflächen sowie sozioökonomischen Ungleichheiten hin (Anhang S. 18). Allerdings gibt es noch wenig Belege für Wirkungsmodifikatoren und dies erfordert zusätzliche Forschung.³Das hochkomplexe Zusammenspiel verschiedener Faktoren wird in der Regel nicht berücksichtigt und eine Methode wie PLS lässt keine Rückschlüsse auf einzelne Faktoren zu.

Eine wichtige Stärke unserer Studie war die Bereitstellung detaillierter Folgenabschätzungen mit beispielloser Stadtabdeckung. Im Gegensatz zu früheren Einschätzungen, die sich ausschließlich auf extreme Hitze konzentrierten,^{36,37} unsere Analyse quantifizierte Risiken im gesamten Spektrum nicht optimaler Temperaturen. Wir haben lokale Schätzungen der Übersterblichkeit in einer repräsentativen Stichprobe von mehr als 800 Städten in ganz Europa bereitgestellt und sie mit früheren Analysen auf regionaler oder Länderebene verglichen.^{5,38} Außerdem wird die Bewertung auf Skandinavien und Osteuropa ausgeweitet. Die Charakterisierung von ERFs basierte auf der Anwendung modernster statistischer Modelle auf tatsächliche tägliche Sterblichkeits- und Temperaturreihen und wurde nicht aus externen Daten abgeleitet.³⁸

Im Vergleich zu anderen veröffentlichten Folgenabschätzungen zur Mortalität,^{2,5,37,38} einer der wichtigsten Vorteile dieser Studie ist die Bereitstellung mehrerer Risikomaße, einschließlich standardisierter Übersterblichkeitsraten. Die Standardisierung beseitigt demografische Unterschiede zwischen Standorten und Ländern und ermöglicht so einen homogenen geografischen Vergleich der Auswirkungen auf die Sterblichkeit. Tatsächlich bestätigt die Analyse, dass das Alter ein wichtiger Risikofaktor ist, wie der Vergleich altersspezifischer gepoolter ERFs zeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede in der Bevölkerungsstruktur zwischen den Standorten das Bild der Gefährdung deutlich verändern. Dieser Befund wurde beispielsweise durch die höheren relativen Auswirkungen der Hitze in Osteuropa belegt, wenn standardisierte Überschreitungsraten als Risikomaß verwendet wurden.

Generell profitierte diese Studie von anderen wichtigen methodischen Erweiterungen standardmäßiger Multilocation-Analysen. Der statistische Rahmen basierte auf flexiblen Techniken zur Definition und Zusammenfassung komplexer Temperatur-Mortalitäts-ERFs,^{26,29} in früheren Analysen angewendet.^{1,2} Mit diesen Methoden können feine Aspekte der Zusammenhänge dargestellt werden, beispielsweise nichtlineare und verzögerte Auswirkungen von Hitze und Kälte, und optimale Temperaturen ermittelt werden. Allerdings wird der Modellierungsrahmen hier erweitert, um Vulnerabilitätsunterschiede zwischen Städten durch verschiedene sozioökonomische, infrastrukturelle und ökologische Merkmale städtischer Gebiete zu charakterisieren. Frühere Studien präsentierten einfache gepoolte Beziehungen,⁵ analysierte Wirkungsmodifikation durch einzelne Merkmale,⁶ oder enthielt eine kleine Reihe ortsspezifischer Faktoren.^{2,38} Dies kann jedoch nicht ausreichen, um Unterschiede in der Kälteanfälligkeit zu erfassen

oder Hitze. Im Gegensatz dazu haben wir eine neuartige Methodik angewendet, die auf der PLS-Reduktion einer langen Liste stadtspezifischer Merkmale basiert und es uns ermöglicht, latente Vulnerabilitätsmuster zu identifizieren. Zu den identifizierten latenten Vulnerabilitätsmustern gehörten das erhöhte hitzebedingte Risiko in großen Ballungsräumen oder Unterschiede in den Kälteeffekten zwischen Mittelmeer- und Atlantikküstengebieten. Schließlich haben wir durch ein Kriging-Verfahren eine zusätzliche räumliche Komponente einbezogen, um verbleibende räumliche Muster zu erfassen, die durch die zusammengesetzten Schwachstellenindikatoren nicht gut dargestellt wurden.

Neben der Quantifizierung aktueller Risiken und Auswirkungen liefert diese Studie eine Blaupause für die Prognose kürziger temperaturbedingter Gesundheitsauswirkungen unter Klimawandelszenarien. Da der Klimawandel voraussichtlich die Belastung durch heiße Tage erhöhen und zu beispiellosen Kälte- und Hitzeereignissen mit hohem Todesrisiko führen wird, ermöglichen diese Ergebnisse eine genaue Darstellung der durch Temperaturänderungen verursachten Risiken.³⁹ Die Integration von Alters- und Vulnerabilitätsmerkmalen direkt in den Modellierungsrahmen ermöglicht die Extrapolation von ERFs, die auf potenziell komplexe Szenarien zugeschnitten sind. Diese können eine Kombination aus klimatischen, demografischen und sozioökonomischen Pfaden umfassen, und ihr Vergleich kann quantitative Belege für den potenziellen Nutzen alternativer Anpassungsstrategien liefern.

Eine Reihe von Einschränkungen unserer Studie müssen anerkannt werden. Diese Bewertung basierte auf der geografischen Extrapolation der ERFs auf europäische Städte. Obwohl ihre Charakterisierung auf einer großen Teilmenge von Städten mit tatsächlichen täglichen Temperatur- und Sterblichkeitsreihen basiert, können wir verzerrte Vorhersagen nicht ausschließen, insbesondere in weniger abgedeckten Gebieten wie Osteuropa. Die Ergebnisse in diesen Bereichen können abhängig von einigen Modellierungsoptionen, beispielsweise der Anzahl der PLS-Komponenten, recht unterschiedlich ausfallen. Darüber hinaus deuten die durch das Kriging-Verfahren identifizierten verbleibenden räumlichen Muster, obwohl sie im Vergleich zum Bereich der von den PLS-Komponenten in der Meta-Regression der zweiten Stufe erfassten Unterschiede gering sind, darauf hin, dass das Vorhersagemodell die Unterschiede in der Anfälligkeit für nicht vollständig charakterisierte Hitze und Kälte in den Städten. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die in dieser Studie verwendete Methodik zu bewerten, die Risikoextrapolation der zweiten Stufe zu verbessern und die Effektmodifikation durch individuelle Merkmale zu entschlüsseln.

Es gibt weitere Einschränkungen hinsichtlich des Modellierungsansatzes. Schätzungen der ersten Stufe können ungenau sein, wenn die Zahl der Todesfälle insgesamt niedrig ist.²⁷ Daher konnten wir die ERFs für Menschen unter 20 Jahren nicht zuverlässig schätzen und mussten die Auswirkungen der Temperatur über große Altersgruppen für diese Gruppen quantifizieren. Darüber hinaus liefert der Modellierungsrahmen gemittelte Schätzungen temperaturbedingter Risiken und Auswirkungen über den Untersuchungszeitraum, ohne zuvor gemeldete zeitliche Änderungen zu berücksichtigen⁴⁰ oder Saisonabhängigkeit der Sterblichkeit innerhalb eines Jahres. Schließlich gibt es einige Einschränkungen bei den Daten. Die Informationen wurden aus verschiedenen Quellen mit unterschiedlichen geografischen Auflösungen und teilweise gesammelt

stadtspezifische Variablen wurden aus regionalen (NUTS2) Datenbanken abgeleitet, die in der Regel mehrere Städte umfassen. Die Temperaturdaten wurden aus dem ERA5-Land-Datensatz extrahiert und mit stadtspezifischen Sterblichkeitszahlen verknüpft; Allerdings konnten wir die innerstädtischen Unterschiede in Bezug auf Gefährdung und Gefährdung nicht untersuchen.

Zusammenfassend liefert diese Studie ein detailliertes und umfassendes Bild der kälte- und hitzebedingten Übersterblichkeit in 854 Städten in ganz Europa unter Berücksichtigung demografischer und Gefährdungsunterschiede. Diese Ergebnisse liefern wertvolle Informationen für politische Entscheidungsträger bei der Gestaltung nationaler, regionaler und lokaler Klima- und Gesundheitspolitiken und stellen einen ersten wichtigen Schritt hin zu einer genauen Bewertung der temperaturbedingten gesundheitlichen Auswirkungen unter zukünftigen Klimaszenarien und gemeinsamen sozioökonomischen Pfaden für Europa dar.

MCC-Verbundforschungsnetzwerk

Souzana Achilleos (Abteilung für Grundversorgung und Bevölkerungsgesundheit, Medizinische Fakultät der Universität Nikosia, Nikosia, Zypern), Jan Kyselý (Institut für Atmosphärenphysik, Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik, Prag, Tschechische Republik), Ene Indermitte (Abteilung für Familie, Medizin und öffentliche Gesundheit, Universität Tartu, Tartu, Estland), Jouni JK Jaakkola und Niilo Ryti (Zentrum für Umwelt- und Atemwegsgesundheitsforschung und Medizinisches Forschungszentrum Oulu, Universitätskrankenhaus Oulu, Universität Oulu, Oulu, Finnland), Mathilde Pascal (Santé Publique France, Abteilung für Umweltgesundheit, Französische Nationale Gesundheitsbehörde, Saint Maurice, Frankreich), Antonis Analitis (Abteilung für Hygiene, Epidemiologie und medizinische Statistik, Nationale und Kapodistriche Universität Athen, Athen, Griechenland), Klea Katsouyanni (Schule of Population Health and Environmental Sciences, King's College, London, UK), Patrick Goodman (Technological University Dublin, Dublin, Irland), Ariana Zeka (Institute for the Environment, Brunel University London, London, UK), Paola Michelozzi (Abteilung für Epidemiologie), Regionaler Gesundheitsdienst Latium, Rom, Italien),

Danny Houthuijs und Caroline Ameling (Nationales Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt, Zentrum für Nachhaltigkeit und Umweltgesundheit, Bilthoven, Niederlande), Shilpa Rao (Norwegisches Institut für öffentliche Gesundheit, Oslo, Norwegen), Susana das Neves Pereira da Silva und Joana Madureira (Abteilung für Epidemiologie, Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge, Lissabon, Portugal), Iulian-Horia Holobaca (Fakultät für Geographie, Babes-Bolyai-Universität, Cluj-Napoca, Rumänien), Aurelio Tobias (Institut für Umweltverträglichkeitsprüfung und Wasserforschung, Spanischer Rat für wissenschaftliche Forschung, Barcelona, Spanien), Carmen Íñiguez (Abteilung für Statistik und Computerforschung, Universität de València, Valencia, Spanien), Bertil Forsberg (Abteilung für öffentliche Gesundheit und klinische Forschung), Medizin, Universität Umeå, Umeå, Schweden) und Martina S Ragettli (Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, Basel, Schweiz).

EXHAUSTION-Projekt

Sofia Zafeiratou (Abteilung für Hygiene und Epidemiologie, Medizinische Fakultät der Universität Athen, Athen, Griechenland), Liliana Vazquez Fernandez (Norwegisches Institut für öffentliche Gesundheit, Oslo, Norwegen), Ana Monteiro (Universität Porto, Porto, Portugal), Masna Rai und Siqi Zhang (Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Neuherberg, Deutschland) und Kristin Aunan (CICERO Senter für Klimaforschung, Oslo, Norwegen).

Mitwirkende

PM, AG und AM-VC entwickelten die Analyse, umgesetzt von PM und AG. PM und AG haben erste Versionen des Manuskripts geschrieben. PM und MM extrahierten Daten von Eurostat und MM extrahierten Fernerkundungsdaten von Copernicus und Google Earth Engine. HO, AU, SB, VH, AS, ES, MS, FdD, SR und der Rest des MCC Collaborative Research Network lieferten Mortalitätsdaten. Alle Autoren trugen durch die frühzeitige Verbretung der Analyseergebnisse und vorläufigen grafischen Ergebnisse zur Interpretation der Ergebnisse sowie zur Überarbeitung und Genehmigung des Manuskripts bei. PM, MM und AG haben auf den vollständigen Inhalt zugegriffen und ihn überprüft

Datensatz. PM und AG waren nach Rücksprache mit allen aufgeführten Autoren für die Entscheidung verantwortlich, das Manuskript einzureichen. Alle Autoren haben die endgültige Veröffentlichung gesehen und genehmigt.

Interessenerklärung

Wir erklären keine konkurrierenden Interessen.

Datenübertragung

Die in dieser Analyse abgeleiteten Expositions-Reaktionsfunktionen, vollständigen Ergebnisse und Zwischendaten sind in einem Zenodo-Repository öffentlich verfügbar (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7672108>). Der zugehörige R-Code zur Reproduktion der Analyse ist auf der GitHub-Seite des entsprechenden Autors verfügbar (<https://github.com/pierremasselot>). Die Mortalitätsdaten wurden im Rahmen einer eingeschränkten Datennutzungsvereinbarung mit jedem nationalen Institut erhalten und sind daher nicht verfügbar öffentliche Verbreitung.

Danksagungen

Die Studie wurde vom Medical Research Council of the UK (MR/V034162/1 und MR/R013349/1), dem Natural Environment Research Council UK (NE/R009384/1), dem EU-Programm Horizon 2020 (820655) und der EU finanziert Gemeinsame Forschungsstelle (JRC/SVQ/2020/MVP/1654). AU und JK wurden von der Tschechischen Wissenschaftsstiftung (22-24920S) unterstützt. VH hat im Rahmen der Marie-Sklodowska-Curie-Fördervereinbarung (101032087) Fördermittel aus dem EU-Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 erhalten.

Verweise

- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, et al. Sterblichkeitsrisiko aufgrund hoher und niedriger Umgebungstemperatur: eine länderübergreifende Beobachtungsstudie. *Lancette*2015;**386**:369–75.
- Zhao Q, Guo Y, Ye T, et al. Globale, regionale und nationale Sterblichkeitsbelastung im Zusammenhang mit nicht optimalen Umgebungstemperaturen von 2000 bis 2019: eine dreistufige Modellstudie. *Lancet Planet Health* 2021;**5**:e415–25.
- Sohn JY, Liu JC, Bell ML. Temperaturbedingte Mortalität: eine systematische Überprüfung und Untersuchung von Effektmotifikatoren. *Environ Res Lett*2019;**14**:073004.
- Gasparrini A, Guo Y, Sera F, et al. Prognosen zur temperaturbedingten Übersterblichkeit unter Klimawandelszenarien. *Lancet Planet Health*2017;**1**:e360–67.
- Martínez-Solanas È, Quijal-Zamorano M, Achebak H, et al. Projektionen der temperaturbedingten Mortalität in Europa: eine Zeitreihenanalyse von 147 zusammenhängenden Regionen in 16 Ländern. *Lancet Planet Health*2021;**5**:e446–54.
- Sera F, Armstrong B, Tobias A, et al. Wie städtische Merkmale die Anfälligkeit für Hitze und Kälte beeinflussen: eine länderübergreifende Analyse. *Int J Epidemiol*2019;**48**:1101–12.
- Nieuwenhuijsen MJ. Stadt- und Verkehrsplanung, Umweltbelastungen und Gesundheit – neue Konzepte, Methoden und Instrumente zur Verbesserung der Gesundheit in Städten. *Umweltgesundheit*2016;**15**(Zusatz 1):38.
- Dijkstra L, Poelman H. Städte in Europa – die neue OECD-EG-Definition. Europäische Kommission. Januar 2012. <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/oecd-definition-of-functional-urban-area-fua> (abgerufen am 20. Februar 2023).
- Oleson KW, Monaghan A, Wilhelmi O, et al. Wechselwirkungen zwischen Urbanisierung, Hitzestress und Klimawandel. *Klimawandel*2015; **129**:525–41.
- Tong S, Prior J, McGregor G, Shi X, Kinney P. Städtische Hitze: eine zunehmende Bedrohung für die globale Gesundheit. *BMJ*2021;**375**:n2467.
- Bennett JE, Blangiardo M, Fecht D, Elliott P, Ezzati M. Anfälligkeit für die Mortalitätseffekte warmer Temperaturen in den Bezirken England und Wales. *Nat Clim Chang*2014;**4**:269–73.
- Ragettli MS, Vicedo-Cabrera AM, Schindler C, Rössli M. Erforschung des Zusammenhangs zwischen Hitze und Sterblichkeit in der Schweiz zwischen 1995 und 2013. *Umwelt Res*2017;**158**:703–09.
- Martínez-Solanas È, Basagaña X. Zeitliche Veränderungen der temperaturbedingten Sterblichkeit in Spanien und Auswirkungen der Umsetzung eines Gesundheitspräventionsplans bei Hitze. *Umwelt Res*2019;**169**:102–13.
- Huber V, Krummenauer L, Peña-Ortiz C, et al. Temperaturbedingte Übersterblichkeit in deutschen Städten bei 2°C und höheren Graden der globalen Erwärmung. *Umwelt Res*2020;**186**:109447.
- Zafeiratou S, Analitis A, Founda D, et al. Räumliche Variabilität der Auswirkung hoher Umgebungstemperaturen auf die Sterblichkeit: eine Analyse auf Gemeindeebene im Großraum Athen. *Int J Environ Res Public Health*2019;**16**:3689.

- 16 Orru H, Åström DO. Erhöhte Sterblichkeit aufgrund externer Ursachen aufgrund hoher und niedriger Temperaturen: Belege aus Nordosteuropa. *Int J Biometeorol*2017;**61**:963–66.
- 17 Oudin Åström D, Ebi KL, Vicedo-Cabrera AM, Gasparrini A. Untersuchung von Veränderungen der Sterblichkeit aufgrund von Hitze und Kälte in Stockholm, Schweden. *Int J Biometeorol*2018;**62**:1777–80.
- 18 Eurostat. Städte (Urban Audit). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/background> (abgerufen am 13. Dezember 2021).
- 19 Eurostat. Anwendung des Urbanisierungsgrads – ein methodisches Handbuch zur Definition von Städten und ländlichen Gebieten für internationale Vergleiche. Ausgabe 2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-02-20-499> (abgerufen 11. November 2022).
- 20 Eurostat. Regionen. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/regions/background> (abgerufen am 14. Dezember 2021).
- 21 Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: ein hochmoderner globaler Reanalysedatensatz für Landanwendungen. *Erdsystem-Science-Daten*2021;**13**:4349–83.
- 22 Mistry MN, Schneider R, Masselot P, et al. Vergleich von Wetterstations- und Klima-Reanalysedaten zur Modellierung der temperaturbedingten Mortalität. *Sci-Repräsentant*2022;**12**:5178.
- 23 van Buuren S. Mehrfache Imputation diskreter und kontinuierlicher Daten durch vollständig bedingte Spezifikation. *Statistische Methoden Med Res*2007; **16**:219–42.
- 24 Didan K. MOD13Q1. MODIS/Terra-Vegetationsindizes 16-Tage-L3-globales 250-m-SIN-Gitter V006. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/> (abgerufen am 16. Dezember 2021).
- 25 van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, et al. Globale Schätzungen von Feinstaub mithilfe einer kombinierten geophysikalisch-statistischen Methode mit Informationen von Satelliten, Modellen und Monitoren. *Umwelt-Sci-Technol*2016;**50**:3762–72.
- 26 Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Nichtlineare Modelle mit verteilter Verzögerung. *Stat Med*2010;**29**:2224–34.
- 27 Armstrong BG, Gasparrini A, Tobias A, Sera F. Probleme mit der Stichprobengröße in Zeitreihenregressionen von Zählungen zu Umweltexpositionen. *BMC Med Res Methodol*2020;**20**:15.
- 28 Gasparrini A, Armstrong B. Reduzierung und Metaanalyse von Schätzungen aus nichtlinearen Modellen mit verteilter Verzögerung. *BMC Med Res Methodol*2013;**13**:1.
- 29 Sera F, Armstrong B, Blangiardo M, Gasparrini A. Ein erweitertes Mixed-Effects-Framework für die Metaanalyse. *Stat Med*2019; **38**: 5429–44.
- 30 Statistische Kommission der Vereinten Nationen. Standard-Länder- oder Gebietscodes für statistische Zwecke (M49). <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/#fn1> (abgerufen am 24. November 2021).
- 31 Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-Regression: ein grundlegendes Werkzeug der Chemometrie. *Chemom Intell Lab Syst*2001;**58**:109–30.
- 32 Cressie NAC. Räumliche Vorhersage und Kriging. In: Statistik für Geodaten. New York, NY: John Wiley & Sons, 1993: 105–209.
- 33 Tobias A, Hashizume M, Honda Y, et al. Geografische Schwankungen der minimalen Sterblichkeitstemperatur im globalen Maßstab: eine Mehrländerstudie. *Environ Epidemiol*2021;**5**:e169.
- 34 Gasparrini A, Leone M. Zurechenbares Risiko durch verteilte Verzögerungsmodelle. *BMC Med Res Methodol*2014;**14**:55.
- 35 Bakhtsiyarava M, Schinasi LH, Sánchez BN, et al. Veränderung der temperaturbedingten menschlichen Sterblichkeit durch sozioökonomische und demografische Merkmale auf Gebietsebene in lateinamerikanischen Städten. *Soc Sci Med*2023;**317**:115526.
- 36 Gasparrini A, Masselot P, Scortichini M, et al. Kleinflächige Bewertung temperaturbedingter Mortalitätsrisiken in England und Wales: eine Fall-Zeitreihenanalyse. *Lancet Planet Health*2022; **6**:e557–64.
- 37 Forzieri G, Cescatti A, E Silva FB, Feyen L. Mit der Zeit zunehmendes Risiko wetterbedingter Gefahren für die europäische Bevölkerung: eine datengesteuerte Prognosestudie. *Lancet Planet Health*2017; **1**:e200–08.
- 38 Burkart KG, Brauer M, Aravkin AY, et al. Abschätzung der ursachenspezifischen relativen Risiken einer nicht optimalen Temperatur für die tägliche Sterblichkeit: ein zweiteiliger Modellierungsansatz, der auf die Global Burden of Disease Study angewendet wird. *Lanzette*2021;**398**:685–97.
- 39 Vicedo-Cabrera AM, Sera F, Gasparrini A. Praktisches Tutorial zu einem Modellierungsrahmen für Prognosen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit. *Epidemiologie*2019;**30**:321–29.
- 40 Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, et al. Zeitliche Variation der Hitze-Mortalitäts-Assoziationen: eine länderübergreifende Studie. *Umweltgesundheitsperspektive*2015;**123**:1200–07.