

## Klima Endspiel: Erkundung katastrophaler Klimawandelszenarien

### Abstrakt

Umsichtiges Risikomanagement erfordert die Berücksichtigung von Worst-Case-Szenarien. Für den Klimawandel sind solche potenziellen Zukünfte jedoch kaum bekannt. Könnte der vom Menschen verursachte Klimawandel zu einem weltweiten gesellschaftlichen Zusammenbruch oder sogar zum Aussterben der Menschheit führen? Derzeit ist dies ein gefährlich wenig erforschtes Thema. Dennoch gibt es genügend Gründe zu vermuten, dass der Klimawandel zu einer globalen Katastrophe führen könnte. Die Analyse der Mechanismen für diese extremen Folgen könnte dazu beitragen, Maßnahmen zu ergreifen, die Widerstandsfähigkeit zu verbessern und die Politik zu informieren, einschließlich Notfallmaßnahmen. Wir skizzieren das aktuelle Wissen über die Wahrscheinlichkeit eines extremen Klimawandels, diskutieren, warum es wichtig ist, schlimmste bis schlimmste Fälle zu verstehen, artikulieren Gründe für die Besorgnis über katastrophale Folgen, definieren Schlüsselbegriffe und stellen eine Forschungsagenda vor. Die vorgeschlagene Agenda umfasst vier Hauptfragen: 1) Welches Potenzial hat der Klimawandel, um Massensterben voranzutreiben? 2) Wie schlimm könnte der Klimawandel werden? Bereits 1988 beschrieb die wegweisende Erklärung der Toronto-Konferenz die endgültigen Folgen des Klimawandels als potenziell „nach einem globalen Atomkrieg“. Trotz solcher Proklamationen vor Jahrzehnten ist die Klimakatastrophe relativ wenig erforscht und kaum verstanden.

Das Potenzial für katastrophale Auswirkungen hängt vom Ausmaß und der Geschwindigkeit des Klimawandels, den der Erde und den menschlichen Systemen zugefügten Schäden sowie der Anfälligkeit und Reaktion dieser betroffenen Systeme ab. Die Extreme dieser Bereiche, wie z. B. hoher Temperaturanstieg und kaskadierende Auswirkungen, werden zu wenig untersucht. Wie vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) festgestellt, gibt es nur wenige quantitative Schätzungen der globalen Gesamtauswirkungen einer Erwärmung um 3 °C oder mehr (1). Das Text-Mining von IPCC-Berichten ergab in ähnlicher Weise, dass die Berichterstattung über Temperaturanstiege

von 3°C oder mehr im Verhältnis zu ihrer Wahrscheinlichkeit unterrepräsentiert ist (2). Text-Mining-Analysen deuten auch darauf hin, dass sich die Berichterstattung in IPCC-Berichten im Laufe der Zeit in Richtung eines Temperaturanstiegs von 2 °C und darunter verschoben hat <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002876>. Die Forschung hat sich auf die Auswirkungen von 1,5°C und 2°C konzentriert, und Studien darüber, wie Klimaauswirkungen kaskadieren oder größere Krisen auslösen könnten, sind spärlich.

Eine gründliche Risikobewertung müsste berücksichtigen, wie sich Risiken ausbreiten, interagieren, verstärken und durch menschliche Reaktionen verschlimmert werden (3), aber selbst einfachere Analysen „zusammengesetzter Gefahren“ von interagierenden Klimagefahren und -treibern werden zu wenig genutzt. Doch so entfaltet sich das Risiko in der realen Welt. Beispielsweise zerstört ein Zyklon die elektrische Infrastruktur und macht eine Bevölkerung anfällig für eine darauf folgende tödliche Hitzewelle (4). Vor kurzem haben wir gesehen, wie sich zwischen dem Klimawandel und der COVID-19-Pandemie zusammengesetzte Gefahren ergeben (5). Wie der IPCC feststellt, werden Klimarisiken immer komplexer und schwieriger zu handhaben und breiten sich über Regionen und Sektoren hinweg aus (6).

Warum der Fokus auf die Erwärmung am unteren Ende und einfache Risikoanalysen? Ein Grund ist der Maßstab der internationalen Ziele: das Ziel des Pariser Abkommens, die Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, wobei 1,5 °C angestrebt werden. Ein weiterer Grund ist die Kultur der Klimawissenschaft, „auf der Seite des geringsten Dramas zu irren“ (7), keine Alarmisten zu sein, was durch die Konsensprozesse des IPCC noch verstärkt werden kann (8). Komplexe Risikobewertungen sind zwar realistischer, aber auch schwieriger durchzuführen.

Diese Vorsicht ist verständlich, steht aber in keinem Verhältnis zu den Risiken und möglichen Schäden durch den Klimawandel. Wir wissen, dass der Temperaturanstieg „fette Schwänze“ hat: extreme Folgen mit geringer Wahrscheinlichkeit und großer Auswirkung (9). Klimaschäden sind wahrscheinlich nichtlinear und führen zu einem noch größeren Schwanz (10). Es steht zu viel auf dem Spiel, um auf die Untersuchung von Szenarien mit hoher Auswirkung und geringer Wahrscheinlichkeit zu verzichten. Die COVID-19-Pandemie hat die Notwendigkeit unterstrichen, selten auftretende, schwerwiegende globale Risiken und die systemischen Gefahren, die sie auslösen können, zu berücksichtigen und sich darauf vorzubereiten. Umsichtiges Risikomanagement verlangt von uns eine gründliche Abwägung von

Worst-Case-Szenarien.

Unsere vorgeschlagene Forschungsagenda „Climate Endgame“ zielt darauf ab, die schlimmsten Risiken im Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel zu untersuchen. Zur Einführung fassen wir vorhandene Beweise für die Wahrscheinlichkeit eines extremen Klimawandels zusammen, skizzieren, warum die Untersuchung von schlimmsten bis schlimmsten Fällen von entscheidender Bedeutung ist, schlagen Gründe für die Besorgnis über Katastrophen vor, definieren Schlüsselbegriffe und erläutern dann die vier Schlüsselaspekte der Forschungsagenda.

Worst-Case-Klimawandel

Trotz 30-jähriger Bemühungen und einiger Fortschritte im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) steigen die Emissionen anthropogener Treibhausgase (THG) weiter an. Selbst ohne Berücksichtigung der Worst-Case-Klimareaktionen bringt der aktuelle Kurs die Welt auf Kurs für einen Temperaturanstieg zwischen 2,1 °C und 3,9 °C bis 2100 (11). Wenn alle bis 2030 national festgelegten Beiträge vollständig umgesetzt werden, wird eine Erwärmung um 2,4 °C (1,9 °C bis 3,0 °C) bis 2100 erwartet. Die Erfüllung aller langfristigen Zusagen und Ziele könnte diese auf 2,1 °C (1,7 °C bis 2,6 °C) reduzieren (12). Selbst diese optimistischen Annahmen führen zu gefährlichen Trajektorien des Erdsystems. Temperaturen von mehr als 2 °C über vorindustriellen Werten wurden auf der Erdoberfläche seit vor dem Pleistozän (oder vor mehr als 2,6 Millionen Jahren) nicht mehr aufrechterhalten (13). Selbst wenn die anthropogenen THG-Emissionen bald zurückgehen, schließt dies hohe zukünftige THG-Konzentrationen oder extreme Klimaänderungen nicht aus, insbesondere über das Jahr 2100 hinaus. Es gibt Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf und potenzielle Kippunkte, die zu hohen THG-Konzentrationen führen könnten (14). fehlen oft bei Modellen. Beispiele hierfür sind das Auftauen des arktischen Permafrosts, das Methan und CO<sub>2</sub> freisetzt (15), der Kohlenstoffverlust aufgrund intensiver Dürren und Brände im Amazonasgebiet (16) und die offensichtliche Verlangsamung dämpfender Rückkopplungen wie der natürlichen Kohlenstoffsinkenkapazität (17, 18). Diese sind wahrscheinlich nicht proportional zur Erwärmung, wie manchmal angenommen wird. Stattdessen können bei einer Temperaturschwelle abrupte und/oder irreversible Änderungen ausgelöst werden. Solche Veränderungen sind in den geologischen Aufzeichnungen der Erde offensichtlich, und ihre

Auswirkungen kaskadierten über das gekoppelte Klima-ökologisch-soziale System (19). Besonders besorgniserregend ist eine „Kippkaskade“, bei der mehrere Kippelemente so zusammenwirken, dass das Kippen einer Schwelle die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass eine andere kippt (20). Der Temperaturanstieg hängt entscheidend von der Gesamtdynamik des Erdsystems ab, nicht nur vom Verlauf der anthropogenen Emissionen.

Das Potenzial für Kippunkte und höhere Konzentrationen trotz geringerer anthropogener Emissionen zeigt sich in bestehenden Modellen. Variabilität zwischen den neuesten Klimamodellen des Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) führt zu Überschneidungen in verschiedenen Szenarien. Beispielsweise ist das Ergebnis des obersten (75.) Quartils des Szenarios „Mitte auf der Straße“ (gemeinsamer sozioökonomischer Pfad 3-7.0 oder SSP3-7.0) wesentlich heißer als das untere (25.) Quartil der höchsten Emissionen (SSP5-8.5)-Szenario. Regionale Temperaturunterschiede zwischen Modellen können 5 °C bis 6 °C überschreiten, insbesondere in Polargebieten, wo verschiedene Kippunkte auftreten können (SI-Anhang).

Es gibt sogar noch unsicherere Rückkopplungen, die sich im schlimmsten Fall zu einem irreversiblen Übergang in einen „Treibhaus-Erde“-Zustand (21) verstärken könnten (obwohl es negative Rückkopplungen geben kann, die helfen, das Erdsystem zu puffern). Insbesondere schlecht verstandene Wolkenrückkopplungen könnten eine plötzliche und irreversible globale Erwärmung auslösen (22).

Solche Effekte bleiben wenig erforschte und weitgehend spekulative „unbekannte Unbekannte“, die noch entdeckt werden. Beispielsweise deuten neuere Simulationen darauf hin, dass Stratocumulus-Wolkendecks bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die bis zum Ende des Jahrhunderts erreicht werden könnten, abrupt verloren gehen könnten, was eine zusätzliche globale Erwärmung von ~8 °C verursachen würde (23). Große Unsicherheiten über gefährliche Überraschungen sind Gründe, diese zu priorisieren, anstatt sie zu vernachlässigen.

Jüngste Ergebnisse zur Gleichgewichtsklimasensitivität (ECS) (14, 24) unterstreichen, dass das Ausmaß des Klimawandels ungewiss ist, selbst wenn wir zukünftige THG-Konzentrationen kennen. Laut IPCC ist unsere beste Schätzung für ECS ein Temperaturanstieg von 3 °C pro CO<sub>2</sub>-Verdopplung, mit einem „wahrscheinlichen“ Bereich von (66 bis 100 % Wahrscheinlichkeit) von 2,5 °C bis 4 °C. Während ein ECS unter 1,5 °C praktisch ausgeschlossen wurde, bleibt eine Wahrscheinlichkeit von 18 %, dass ECS größer als 4,5 °C sein könnte (14). Die Verteilung von

ECS ist „heavy-tailed“, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von sehr hohen ECS-Werten als von sehr niedrigen Werten.

Auch über zukünftige anthropogene Treibhausgasemissionen besteht erhebliche Unsicherheit. Der repräsentative Konzentrationspfad 8.5 (RCP8.5, jetzt SSP5-8.5), der höchste Emissionspfad, der in IPCC-Szenarien verwendet wird, entspricht am ehesten den bisherigen kumulierten Emissionen (25). Aufgrund sinkender Preise für erneuerbare Energien und politischer Maßnahmen wird dies in Zukunft möglicherweise nicht mehr der Fall sein (26). Dennoch bleiben Gründe zur Vorsicht. Beispielsweise besteht erhebliche Unsicherheit über Schlüsselvariablen wie Energienachfrage und Wirtschaftswachstum. Plausibel höhere Wirtschaftswachstumsraten könnten RCP8.5 um 35 % wahrscheinlicher machen (27).

Warum die Klimakatastrophe erforschen?

Warum müssen wir die plausiblen Worst Cases kennen? Erstens erfordern Risikomanagement und robuste Entscheidungsfindung unter Unsicherheit die Kenntnis von Extremen. Das Minimax-Kriterium beispielsweise stuft Strategien nach ihren schlechtesten Ergebnissen ein (28). Ein solcher Ansatz ist besonders geeignet für Bereiche, die durch hohe Unsicherheiten und Tail-Risiken gekennzeichnet sind. Emissionspfade, zukünftige Konzentrationen, zukünftige Erwärmung und zukünftige Auswirkungen sind alle von Unsicherheit geprägt. Das heißt, wir können Wahrscheinlichkeiten nicht objektiv verschiedenen Ergebnissen vorschreiben (29). Klimaschäden liegen im Bereich „tiefer Unsicherheit“: Wir kennen die Wahrscheinlichkeiten, die mit verschiedenen Ergebnissen verbunden sind, die genaue Kette von Ursache und Wirkung, die zu Ergebnissen führen wird, oder sogar die Reichweite, den Zeitpunkt oder die Erwünschtheit von Ergebnissen nicht (, 30). Ungewissheit, ob tief oder nicht, sollte zu Vorsicht und Wachsamkeit motivieren, nicht zu Selbstgefälligkeit.

Katastrophale Auswirkungen, selbst wenn sie unwahrscheinlich sind, haben erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftsanalyse, die Modellierung und die Reaktionen der Gesellschaft (31, 32). Beispielsweise können eine extreme Erwärmung und die daraus resultierenden Schäden die prognostizierten sozialen Kosten von Kohlenstoff erheblich erhöhen (31). Das Verständnis der Anfälligkeit und der Reaktionen menschlicher Gesellschaften kann die Politikgestaltung und Entscheidungsfindung informieren, um systemische Krisen zu verhindern. Indikatoren für Schlüsselvariablen können Frühwarnsignale

liefern (33).

Die Kenntnis der schlimmsten Fälle kann zum Handeln zwingen, da die Idee des „nuklearen Winters“ im Jahr 1983 die Besorgnis der Öffentlichkeit und die Bemühungen um nukleare Abrüstung wachrief. Die Untersuchung schwerwiegender Risiken und Szenarien mit höheren Temperaturen könnte eine erneute Festlegung auf die Leitplanke von 1,5 °C bis 2 °C als die „am wenigsten unattraktive“ Option festigen (34). Das Verständnis katastrophaler Klimaszenarien kann auch politische Interventionen beeinflussen, einschließlich Notfallmaßnahmen als letztes Mittel wie Solarstrahlungsmanagement (SRM), die Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre, um das Sonnenlicht zu reflektieren (35). Ob auf solche Maßnahmen zurückgegriffen wird, hängt von den Risikoprofilen sowohl des Klimawandels als auch des SRM-Szenarios ab. Eine kürzlich durchgeführte Analyse des potenziellen katastrophalen Risikos einer stratosphärischen Aerosolinjektion (SAI) ergab, dass die direkten und systemischen Auswirkungen zu wenig untersucht sind (36). Die größte Gefahr scheint vom „Beendigungsschock“ auszugehen: abrupte und schnelle Erwärmung, wenn das SAI-System gestört wird. Daher verschiebt SAI die Risikoverteilung: Das mittlere Ergebnis kann besser sein als der Klimawandel, den es ausgleicht, aber das Tail-Risiko könnte schlimmer sein als die Erwärmung (36).

Es gibt andere Interventionen, die ein besseres Verständnis des katastrophalen Klimawandels erleichtern könnten. Beispielsweise besteht auf internationaler Ebene das Potenzial für ein „Tail-Risk-Abkommen“: ein Abkommen oder Protokoll, das stärkere Verpflichtungen und Mechanismen aktiviert, wenn Frühwarnindikatoren für einen möglichen abrupten Wandel ausgelöst werden. Das Potenzial für eine Klimakatastrophe

Es gibt vier Hauptgründe, sich Sorgen über das Potenzial einer globalen Klimakatastrophe zu machen. Erstens gibt es Warnungen aus der Geschichte. Der Klimawandel (entweder regional oder global) hat beim Zusammenbruch oder der Transformation zahlreicher früherer Gesellschaften (37) und bei jedem der fünf Massensterben in der Erdgeschichte des Phanerozoikums (38) eine Rolle gespielt. Der aktuelle Kohlenstoffpuls tritt mit einer beispiellosen geologischen Geschwindigkeit auf und könnte bis zum Ende des Jahrhunderts die Schwellen überschreiten, die frühere Massensterben ausgelöst haben (39, 40). Die Worst-Case-Szenarien im IPCC-Bericht projizieren Temperaturen bis zum 22. Jahrhundert, die zuletzt im frühen Eozän vorherrschen und 50 Millionen Jahre kühleres Klima im Zeitraum von

zwei Jahrhunderten umkehren (41).

Dies ist besonders alarmierend, da menschliche Gesellschaften lokal an eine bestimmte klimatische Nische angepasst sind. Der Aufstieg großräumiger, urbanisierter Agrargesellschaften begann mit dem Übergang zum stabilen Klima des Holozäns vor etwa 12.000 Jahren (42). Seitdem erreichte die Bevölkerungsdichte innerhalb einer engen Klimahülle mit einer mittleren Jahresdurchschnittstemperatur von  $\sim 13^{\circ}\text{C}$  ihren Höhepunkt. Noch heute konzentrieren sich in diesen Gebieten die wirtschaftlich produktivsten Zentren menschlicher Aktivität (43). Die kumulativen Auswirkungen der Erwärmung können die Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft überfordern.

Zweitens könnte der Klimawandel direkt andere katastrophale Risiken auslösen, wie z. B. internationale Konflikte, oder die Ausbreitung von Infektionskrankheiten und das Spillover-Risiko verschärfen. Dies könnten starke Multiplikatoren für extreme Bedrohungen sein.

Drittens könnte der Klimawandel die Schwachstellen verschärfen und mehrere indirekte Belastungen (wie wirtschaftliche Schäden, Landverlust sowie Wasser- und Ernährungsunsicherheit) verursachen, die zu systemweiten synchronen Ausfällen verschmelzen. Dies ist der Pfad des systemischen Risikos. Globale Krisen treten in der Regel durch solche verstärkenden „synchronen Ausfälle“ auf, die sich über Länder und Systeme ausbreiten, wie bei der globalen Finanzkrise 2007–2008 (44). Es ist plausibel, dass ein plötzlicher Klimawandel Systemausfälle auslösen könnte, die Gesellschaften auf der ganzen Welt zerstören.

Das Potenzial systemischer Klimarisiken ist deutlich: Die am stärksten gefährdeten Staaten und Gemeinschaften werden in einer sich erwärmenden Welt weiterhin am stärksten betroffen sein, was die Ungleichheiten verschärfen wird. Abb. 1 zeigt, wie sich die prognostizierte Bevölkerungsdichte mit der extremen mittleren Jahrestemperatur (MAT) von  $>29^{\circ}\text{C}$  schneidet (solche Temperaturen sind derzeit auf nur 0,8 % der Landoberfläche der Erde beschränkt). Unter Verwendung des mittelhohen Szenarios von Emissionen und Bevölkerungswachstum (SSP3-7.0-Emissionen und SSP3-Bevölkerungswachstum) wird erwartet, dass bis 2070 rund 2 Milliarden Menschen in diesen extrem heißen Gebieten leben werden. Derzeit leben nur 30 Millionen Menschen an heißen Orten, hauptsächlich in der Sahara und an der Golfküste (43).

Extreme Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit können die Produktivität der Außenarbeiter und die Erträge wichtiger Getreidekulturen negativ beeinflussen. Diese tödlichen

Hitzebedingungen könnten besiedelte Gebiete in Süd- und Südwestasien erheblich beeinträchtigen(47).

Abb. 2 nimmt eine politische Linse auf extreme Hitze und überlappt SSP3-7.0- oder SSP5-8.5-Projektionen von  $>29\text{ °C}$  MAT um 2070 mit dem Fragile States Index (ein Maß für die Instabilität von Staaten). Es gibt eine auffällige Überschneidung zwischen derzeit gefährdeten Staaten und zukünftigen Gebieten extremer Erwärmung. Wenn sich die derzeitige politische Fragilität in den kommenden Jahrzehnten nicht wesentlich verbessert, könnte ein Gürtel der Instabilität mit potenziell schwerwiegenden Auswirkungen entstehen.

Abb. 2.

Zerbrechliche Hitze: die Überschneidung zwischen staatlicher Zerbrechlichkeit, extremer Hitze und nuklearen und biologischen Katastrophengefahren. GCM-Modelldaten [aus der WorldClim-Datenbank (45)] wurden verwendet, um die mittleren jährlichen Erwärmungsraten unter SSP3-7.0 und SSP5-8.5 zu berechnen. Dies führt zu einem Temperaturanstieg von  $2,8\text{ °C}$  im Jahr 2070 (48) für SSP3-7.0 und  $3,2\text{ °C}$  für SSP5-8.5. Die schattierten Bereiche stellen Regionen dar, in denen MAT  $29\text{ °C}$  übersteigt. Diese Projektionen überschneiden sich mit dem 2021 Fragile State Index (FSI) (49). Dies ist notwendigerweise ein grober Näherungswert, da der FSI nur die aktuellen Fragilitätsniveaus schätzt. Während solche Messungen der Fragilität und Stabilität umstritten sind und Einschränkungen aufweisen, bietet der FSI einen der robusteren Indizes. Diese Abbildung identifiziert auch die Hauptstädte von Staaten mit Atomwaffen und die Standorte von Laboratorien mit maximaler Eindämmung der Biosicherheitsstufe 4 (BS4), die mit den gefährlichsten Krankheitserregern der Welt umgehen. Diese werden als ein grober Anhaltspunkt für nukleare und biologische Katastrophengefahren bereitgestellt.

IM VIEWER ÖFFNEN

IM VIEWER ÖFFNEN

Schließlich könnte der Klimawandel die Fähigkeit der Menschheit, sich von einer weiteren Katastrophe wie einem Atomkrieg zu erholen, unwiderruflich untergraben. Das heißt, es könnten erhebliche latente Risiken entstehen (Tabelle 1): Auswirkungen, die in stabilen Zeiten beherrschbar sind, werden bei der Reaktion auf und der Erholung von einer Katastrophe schlimm. Diese unterschiedlichen Ursachen für Katastrophenbesorgnis hängen zusammen und müssen gemeinsam untersucht werden.

Tabelle 1.



## Definieren von Schlüsselbegriffen in der Climate Endgame-Agenda

Tabelle erweitern

Begriffsdefinition

**Latentes Risiko** Risiko, das unter bestimmten Bedingungen ruht, aber unter anderen Bedingungen aktiv wird.

**Risikokaskade** Risikoketten, die entstehen, wenn eine nachteilige Auswirkung eine Reihe miteinander verbundener Risiken auslöst (3).

**Systemrisiko** Die Möglichkeit, dass einzelne Unterbrechungen oder Ausfälle zu einem systemweiten Ausfall führen.

**Extremer Klimawandel** Mittlerer globaler Temperaturanstieg von 3 °C oder mehr über dem vorindustriellen Niveau bis 2100.

**Aussterberisiko** Die Wahrscheinlichkeit des menschlichen Aussterbens innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens.

**Bedrohung durch Aussterben** Ein plausibler und signifikanter Beitrag zum Gesamtaussterberisiko.

**Gesellschaftliche Fragilität** Das Potenzial für kleinere Schäden, die sich aufgrund gesellschaftlicher Schwachstellen, Risikokaskaden und maladaptiver Reaktionen zu einem globalen Katastrophen- oder Aussterberisiko entwickeln können.

**Gesellschaftlicher Zusammenbruch** Erhebliche soziopolitische Fragmentierung und/oder Staatsversagen zusammen mit dem relativ schnellen, dauerhaften und erheblichen Verlust von Kapital und Systemidentität; dies kann zu einem massiven Anstieg der Mortalität und Morbidität führen.

**Globales Katastrophenrisiko** Die Wahrscheinlichkeit des Verlusts von 25 % der Weltbevölkerung und der schwerwiegenden Störung globaler kritischer Systeme (z. B. Lebensmittel) innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Jahre oder Jahrzehnte).

**Globale katastrophale Bedrohung** Ein plausibler und signifikanter Beitrag zum globalen Katastrophenrisiko; Das Potenzial des Klimawandels zu einer globalen katastrophalen Bedrohung kann als „katastrophaler Klimawandel“ bezeichnet werden.

**Globales Dezimierungsrisiko** Die Wahrscheinlichkeit eines Verlusts von 10 % (oder mehr) der Weltbevölkerung und der schwerwiegenden Störung globaler kritischer Systeme (z. B. Lebensmittel) innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens (Jahre oder Jahrzehnte).

**Globale Dezimierungsgefahr** Ein plausibler und signifikanter Beitrag zum globalen Dezimierungsrisiko.

**Endgame-Territorium** Ausmaße der globalen Erwärmung und gesellschaftlichen Fragilität, die als hinreichend wahrscheinlich eingeschätzt werden, um den Klimawandel als eine Bedrohung des

Aussterbens darzustellen.

Worst-Case-Erwärmung Die höchste empirisch und theoretisch plausible Stufe der globalen Erwärmung.

FÜR MEHR ERWEITERN

IM VIEWER ÖFFNEN

Definieren der Schlüsselbegriffe

Obwohl Szenarien vom schlimmsten bis zum schlimmsten Fall in der wissenschaftlichen Literatur noch zu wenig erforscht sind, sind Aussagen, die den Klimawandel als katastrophal bezeichnen, nicht ungewöhnlich. UN-Generalsekretär António Guterres nannte den Klimawandel eine „existenzielle Bedrohung“. Akademische Studien haben davor gewarnt, dass eine Erwärmung über 5 °C wahrscheinlich „mehr als katastrophal“ ist (50) und über 6 °C „eine unbestreitbare globale Katastrophe“ darstellt (9).

Aktuelle Diskussionen über die Klimakatastrophe werden durch unklare Terminologie unterminiert. Der Begriff „katastrophaler Klimawandel“ ist nicht abschließend definiert. Ein existenzielles Risiko wird üblicherweise als ein Risiko definiert, das zu einem dauerhaften und erheblichen Verlust des langfristigen menschlichen Potenzials führt (51, 52).

Diese bestehende Definition ist zutiefst mehrdeutig und erfordert eine gesellschaftliche Diskussion und Spezifikation langfristiger menschlicher Werte (52). Während eine demokratische Erforschung von Werten willkommen ist, ist es nicht erforderlich, Wege zu menschlichen Katastrophen oder Aussterben zu verstehen (52). Derzeit ist die bestehende Definition keine solide Grundlage für eine wissenschaftliche Untersuchung.

Wir bieten verdeutlichte Arbeitsdefinitionen solcher Begriffe in Tabelle 1. Dies ist ein erster Schritt zur Erstellung eines Lexikons für globale Katastrophen. Einige der Begriffe, wie z. B. was ein „plausibles“ Risiko oder ein „erheblicher Beitrag“ darstellt, sind zwangsläufig mehrdeutig. Andere, wie die Festlegung auf 10 % oder 25 % der Weltbevölkerung, sind teilweise willkürlich (10 % sind als Marker für einen vorangegangenen Verlust gedacht, und 25 % sind als beispielloser Rückgang gedacht; weitere Erläuterungen finden Sie im SI-Anhang). Weitere Forschung ist notwendig, um diese Definitionen zu schärfen. Die Schwellenwerte für globale Katastrophen- und Dezimierungsrisiken sind als allgemeine Heuristik und nicht als konkrete numerische Grenzen gedacht. Andere Faktoren wie Morbidität und kultureller und wirtschaftlicher Verlust müssen berücksichtigt werden.

Wir definieren Risiko als die Wahrscheinlichkeit, dass die Exposition gegenüber den Auswirkungen und Reaktionen des Klimawandels zu nachteiligen Folgen für menschliche oder ökologische Systeme führt. Für die Climate Endgame-Agenda interessieren uns besonders die katastrophalen Folgen. Jedes Risiko setzt sich aus vier Determinanten zusammen: Hazard, Exposure, Vulnerability und Response (3).

Wir haben eine globale Erwärmung von 3 °C oder mehr bis zum Ende des Jahrhunderts als Marker für extreme Klimaveränderungen festgelegt. Diese Schwelle wird aus vier Gründen gewählt: Ein solcher Temperaturanstieg geht weit über international vereinbarte Ziele hinaus, alle IPCC-„Gründe zur Besorgnis“ in Bezug auf Klimaauswirkungen sind entweder „hohes“ oder „sehr hohes“ Risiko zwischen 2 °C und 3 °C sind erheblich erhöhte Risiken sich selbst verstärkender Veränderungen, die es unmöglich machen würden, die Erwärmung auf 3 °C zu begrenzen, und diese Werte beziehen sich auf eine weitaus größere Ungewissheit in Bezug auf die Auswirkungen.

Bisherige Schlüsselforschung

Die nächsten Versuche, direkt zu untersuchen oder umfassend anzugehen, wie der Klimawandel zum Aussterben der Menschheit oder zu einer globalen Katastrophe führen könnte, stammen aus populärwissenschaftlichen Büchern wie *The Uninhabitable Earth* (53) und *Our Final Warning* (10). Letztere, eine Überprüfung der Klimaauswirkungen in unterschiedlichem Ausmaß, kommt zu dem Schluss, dass ein globaler Temperaturanstieg von 6 °C „sogar das Überleben der Menschen als Spezies gefährdet“ (10).

Wir wissen, dass sich die Gesundheitsrisiken mit steigenden Temperaturen verschlimmern (54). So besteht bereits bei höheren Temperaturen eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für mehrfache „Brotkorbausfälle“ (die einen Lebensmittelpreisschock verursachen) (55). Für die vier wichtigsten Maisanbauregionen (auf die 87 % der Maisproduktion entfallen) steigt die Wahrscheinlichkeit von Produktionsverlusten von mehr als 10 % von 7 % jährlich unter einem Temperaturanstieg von 2 °C auf 86 % unter 4 °C (56). Der IPCC stellt in seinem Sechsten Sachstandsbericht fest, dass bis zum Ende des Jahrhunderts 50 bis 75 % der Weltbevölkerung aufgrund extremer Hitze und Feuchtigkeit lebensbedrohlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein könnten (6). Der SI-Anhang enthält weitere Einzelheiten zu mehreren Schlüsselstudien zum extremen Klimawandel.

Die IPCC-Berichte fassen begutachtete Literatur zu Klimawandel, Auswirkungen und Schwachstellen sowie Minderung zusammen.

Obwohl im Beitrag der Arbeitsgruppe 1 zum Sechsten Sachstandsbericht 15 Kippelemente in Biosphäre, Ozeanen und Kryosphäre identifiziert wurden, viele davon mit irreversiblen Schwellenwerten, gab es nur sehr wenige Veröffentlichungen zu Katastrophenszenarien, die bewertet werden konnten. Die bemerkenswerteste Berichterstattung sind die Synthesen der Arbeitsgruppe II „Gründe zur Besorgnis“, über die seit 2001 berichtet wurde. Diese Synthesen wurden entwickelt, um die Bestimmung darüber zu informieren, was eine „gefährliche anthropogene Störung“ des Klimasystems ist, die das UNFCCC verhindern will. Die fünf Bedenken sind einzigartige und bedrohte Ökosysteme, Häufigkeit und Schwere extremer Wetterereignisse, globale Verteilung und Ausgewogenheit der Auswirkungen, wirtschaftliche und ökologische Gesamtauswirkungen und irreversible, großräumige, abrupte Übergänge. Jede IPCC-Bewertung ergab größere Risiken, die bei einem geringeren Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen auftreten. Im Sechsten Sachstandsbericht wurden alle fünf Bedenken bei Temperaturen von 1,2 °C bis 4,5 °C als sehr hoch eingestuft. Demgegenüber wurden im vorangegangenen Assessment Report (6) nur zwei in diesem Temperaturintervall als sehr hoch bewertet. Alle fünf Bedenken sind jetzt bei „hoch“ oder „sehr hoch“ bei einer Erwärmung von 2 °C bis 3 °C (57). Eine beispielhafte Forschungsagenda: Extreme Erdsystemzustände, Massensterblichkeit, gesellschaftliche Fragilität und integrierte Klimakatastrophenbewertungen

Wir schlagen eine Forschungsagenda für den katastrophalen Klimawandel vor, die sich auf vier Hauptstränge konzentriert:

- 

Langfristige Dynamik und Auswirkungen des extremen Klimawandels verstehen

- 

Erforschung klimabedingter Wege zu Massenmorbidity und -sterblichkeit

- 

Untersuchung sozialer Fragilität: Schwachstellen, Risikokaskaden und Risikoreaktionen

- 

Die Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zu einer „integrierten Katastrophenbewertung“? Es ist an der Zeit, dass sich die Wissenschaftsgemeinschaft mit der Herausforderung auseinandersetzt, den katastrophalen Klimawandel besser zu verstehen.

Wie schlimm könnte der Klimawandel werden? Bereits 1988 beschrieb die wegweisende Erklärung der Toronto-Konferenz die endgültigen Folgen des Klimawandels als potenziell „nach einem globalen Atomkrieg“. Trotz solcher Proklamationen vor Jahrzehnten ist die Klimakatastrophe relativ wenig erforscht und kaum verstanden. Das Potenzial für katastrophale Auswirkungen hängt vom Ausmaß und der Geschwindigkeit des Klimawandels, den der Erde und den menschlichen Systemen zugefügten Schäden sowie der Anfälligkeit und Reaktion dieser betroffenen Systeme ab. Die Extreme dieser Bereiche, wie z. B. hoher Temperaturanstieg und kaskadierende Auswirkungen, werden zu wenig untersucht. Wie vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) festgestellt, gibt es nur wenige quantitative Schätzungen der globalen Gesamtauswirkungen einer Erwärmung um 3 °C oder mehr (1). Das Text-Mining von IPCC-Berichten ergab in ähnlicher Weise, dass die Berichterstattung über Temperaturanstiege von 3°C oder mehr im Verhältnis zu ihrer Wahrscheinlichkeit unterrepräsentiert ist (2). Text-Mining-Analysen deuten auch darauf hin, dass sich die Berichterstattung in IPCC-Berichten im Laufe der Zeit in Richtung eines Temperaturanstiegs von 2 °C und darunter verschoben hat <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002876>. Die Forschung hat sich auf die Auswirkungen von 1,5°C und 2 °C konzentriert, und Studien darüber, wie Klimaauswirkungen kaskadieren oder größere Krisen auslösen könnten, sind spärlich.

Eine gründliche Risikobewertung müsste berücksichtigen, wie sich Risiken ausbreiten, interagieren, verstärken und durch menschliche Reaktionen verschlimmert werden (3), aber selbst einfachere Analysen „zusammengesetzter Gefahren“ von interagierenden Klimagefahren und -treibern werden zu wenig genutzt. Doch so entfaltet sich das Risiko in der realen Welt. Beispielsweise zerstört ein Zyklon die elektrische Infrastruktur und macht eine Bevölkerung anfällig für eine darauf folgende tödliche Hitzewelle (4). Vor kurzem haben wir gesehen, wie sich zwischen dem Klimawandel und der COVID-19-Pandemie zusammengesetzte Gefahren ergeben (5). Wie der IPCC feststellt, werden Klimarisiken immer komplexer und schwieriger zu handhaben und breiten sich über Regionen und Sektoren hinweg aus (6).

Warum der Fokus auf die Erwärmung am unteren Ende und einfache Risikoanalysen? Ein Grund ist der Maßstab der internationalen Ziele: das Ziel des Pariser Abkommens, die Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, wobei 1,5 °C angestrebt werden. Ein weiterer Grund ist

die Kultur der Klimawissenschaft, „auf der Seite des geringsten Dramas zu irren“ (7), keine Alarmisten zu sein, was durch die Konsensprozesse des IPCC noch verstärkt werden kann (8). Komplexe Risikobewertungen sind zwar realistischer, aber auch schwieriger durchzuführen.

Diese Vorsicht ist verständlich, steht aber in keinem Verhältnis zu den Risiken und möglichen Schäden durch den Klimawandel. Wir wissen, dass der Temperaturanstieg „fette Schwänze“ hat: extreme Folgen mit geringer Wahrscheinlichkeit und großer Auswirkung (9). Klimaschäden sind wahrscheinlich nichtlinear und führen zu einem noch größeren Schwanz (10). Es steht zu viel auf dem Spiel, um auf die Untersuchung von Szenarien mit hoher Auswirkung und geringer Wahrscheinlichkeit zu verzichten. Die COVID-19-Pandemie hat die Notwendigkeit unterstrichen, selten auftretende, schwerwiegende globale Risiken und die systemischen Gefahren, die sie auslösen können, zu berücksichtigen und sich darauf vorzubereiten. Umsichtiges Risikomanagement verlangt von uns eine gründliche Abwägung von Worst-Case-Szenarien.

Unsere vorgeschlagene Forschungsagenda „Climate Endgame“ zielt darauf ab, die schlimmsten Risiken im Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel zu untersuchen. Zur Einführung fassen wir vorhandene Beweise für die Wahrscheinlichkeit eines extremen Klimawandels zusammen, skizzieren, warum die Untersuchung von schlimmsten bis schlimmsten Fällen von entscheidender Bedeutung ist, schlagen Gründe für die Besorgnis über Katastrophen vor, definieren Schlüsselbegriffe und erläutern dann die vier Schlüsselaspekte der Forschungsagenda.

## Worst-Case-Klimawandel

Trotz 30-jähriger Bemühungen und einiger Fortschritte im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) steigen die Emissionen anthropogener Treibhausgase (THG) weiter an. Selbst ohne Berücksichtigung der Worst-Case-Klimareaktionen bringt der aktuelle Kurs die Welt auf Kurs für einen Temperaturanstieg zwischen 2,1 °C und 3,9 °C bis 2100 (11). Wenn alle bis 2030 national festgelegten Beiträge vollständig umgesetzt werden, wird eine Erwärmung um 2,4 °C (1,9 °C bis 3,0 °C) bis 2100 erwartet. Die Erfüllung aller langfristigen Zusagen und Ziele könnte diese auf 2,1 °C (1,7 °C bis 2,6 °C) reduzieren (12). Selbst diese optimistischen Annahmen führen zu gefährlichen Trajektorien des Erdsystems. Temperaturen von mehr als 2 °C über vorindustriellen

Werten wurden auf der Erdoberfläche seit vor dem Pleistozän (oder vor mehr als 2,6 Millionen Jahren) nicht mehr aufrechterhalten (13). Selbst wenn die anthropogenen THG-Emissionen bald zurückgehen, schließt dies hohe zukünftige THG-Konzentrationen oder extreme Klimaänderungen nicht aus, insbesondere über das Jahr 2100 hinaus. Es gibt Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf und potenzielle Kippunkte, die zu hohen THG-Konzentrationen führen könnten (14). fehlen oft bei Modellen. Beispiele hierfür sind das Auftauen des arktischen Permafrosts, das Methan und CO<sub>2</sub> freisetzt (15), der Kohlenstoffverlust aufgrund intensiver Dürren und Brände im Amazonasgebiet (16) und die offensichtliche Verlangsamung dämpfender Rückkopplungen wie der natürlichen Kohlenstoffsinkenkapazität (17, 18). Diese sind wahrscheinlich nicht proportional zur Erwärmung, wie manchmal angenommen wird. Stattdessen können bei einer Temperaturschwelle abrupte und/oder irreversible Änderungen ausgelöst werden. Solche Veränderungen sind in den geologischen Aufzeichnungen der Erde offensichtlich, und ihre Auswirkungen kaskadierten über das gekoppelte Klima-ökologisch-soziale System (19). Besonders besorgniserregend ist eine „Kippkaskade“, bei der mehrere Kippelemente so zusammenwirken, dass das Kippen einer Schwelle die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass eine andere kippt (20). Der Temperaturanstieg hängt entscheidend von der Gesamtdynamik des Erdsystems ab, nicht nur vom Verlauf der anthropogenen Emissionen.

Das Potenzial für Kippunkte und höhere Konzentrationen trotz geringerer anthropogener Emissionen zeigt sich in bestehenden Modellen. Variabilität zwischen den neuesten Klimamodellen des Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) führt zu Überschneidungen in verschiedenen Szenarien. Beispielsweise ist das Ergebnis des obersten (75.) Quartils des Szenarios „Mitte auf der Straße“ (gemeinsamer sozioökonomischer Pfad 3-7.0 oder SSP3-7.0) wesentlich heißer als das untere (25.) Quartil der höchsten Emissionen ( SSP5-8.5)-Szenario. Regionale Temperaturunterschiede zwischen Modellen können 5 °C bis 6 °C überschreiten, insbesondere in Polargebieten, wo verschiedene Kippunkte auftreten können (SI-Anhang).

Es gibt sogar noch unsicherere Rückkopplungen, die sich im schlimmsten Fall zu einem irreversiblen Übergang in einen „Treibhaus-Erde“-Zustand (21) verstärken könnten (obwohl es negative Rückkopplungen geben kann, die helfen, das Erdsystem zu puffern). Insbesondere schlecht verstandene Wolkenrückkopplungen könnten

eine plötzliche und irreversible globale Erwärmung auslösen (22). Solche Effekte bleiben wenig erforschte und weitgehend spekulative „unbekannte Unbekannte“, die noch entdeckt werden. Beispielsweise deuten neuere Simulationen darauf hin, dass Stratocumulus-Wolkendecks bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die bis zum Ende des Jahrhunderts erreicht werden könnten, abrupt verloren gehen könnten, was eine zusätzliche globale Erwärmung von ~8 °C verursachen würde (23). Große Unsicherheiten über gefährliche Überraschungen sind Gründe, diese zu priorisieren, anstatt sie zu vernachlässigen. Jüngste Ergebnisse zur Gleichgewichtsklimasensitivität (ECS) (14, 24) unterstreichen, dass das Ausmaß des Klimawandels ungewiss ist, selbst wenn wir zukünftige THG-Konzentrationen kennen. Laut IPCC ist unsere beste Schätzung für ECS ein Temperaturanstieg von 3 °C pro CO<sub>2</sub>-Verdopplung, mit einem „wahrscheinlichen“ Bereich von (66 bis 100 % Wahrscheinlichkeit) von 2,5 °C bis 4 °C. Während ein ECS unter 1,5 °C praktisch ausgeschlossen wurde, bleibt eine Wahrscheinlichkeit von 18 %, dass ECS größer als 4,5 °C sein könnte (14). Die Verteilung von ECS ist „heavy-tailed“, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von sehr hohen ECS-Werten als von sehr niedrigen Werten. Auch über zukünftige anthropogene Treibhausgasemissionen besteht erhebliche Unsicherheit. Der repräsentative Konzentrationspfad 8.5 (RCP8.5, jetzt SSP5-8.5), der höchste Emissionspfad, der in IPCC-Szenarien verwendet wird, entspricht am ehesten den bisherigen kumulierten Emissionen (25). Aufgrund sinkender Preise für erneuerbare Energien und politischer Maßnahmen wird dies in Zukunft möglicherweise nicht mehr der Fall sein (26). Dennoch bleiben Gründe zur Vorsicht. Beispielsweise besteht erhebliche Unsicherheit über Schlüsselvariablen wie Energienachfrage und Wirtschaftswachstum. Plausibel höhere Wirtschaftswachstumsraten könnten RCP8.5 um 35 % wahrscheinlicher machen (27).

### Why Explore Climate Catastrophe?

Why do we need to know about the plausible worst cases? First, risk management and robust decision-making under uncertainty requires knowledge of extremes. For example, the minimax criterion ranks policies by their worst outcomes (28). Such an approach is particularly appropriate for areas characterized by high uncertainties and tail risks. Emissions trajectories, future concentrations, future warming, and future impacts are all characterized by uncertainty. That is, we can't objectively prescribe probabilities to different outcomes (29). Climate damages lie within the realm of “deep uncertainty”: We don't know the probabilities



attached to different outcomes, the exact chain of cause and effect that will lead to outcomes, or even the range, timing, or desirability of outcomes (, 30). Uncertainty, deep or not, should motivate precaution and vigilance, not complacency.

Catastrophic impacts, even if unlikely, have major implications for economic analysis, modeling, and society's responses (31, 32). For example, extreme warming and the consequent damages can significantly increase the projected social cost of carbon (31).

Understanding the vulnerability and responses of human societies can inform policy making and decision-making to prevent systemic crises.

Indicators of key variables can provide early warning signals (33).

Knowing the worst cases can compel action, as the idea of "nuclear winter" in 1983 galvanized public concern and nuclear disarmament efforts. Exploring severe risks and higher-temperature scenarios could cement a recommitment to the 1.5 °C to 2 °C guardrail as the "least unattractive" option (34).

Understanding catastrophic climate scenarios can also inform policy interventions, including last-resort emergency measures like solar radiation management (SRM), the injection of aerosols into the stratosphere to reflect sunlight (35). Whether to resort to such measures depends on the risk profiles of both climate change and SRM scenarios. One recent analysis of the potential catastrophic risk of stratospheric aerosol injection (SAI) found that the direct and systemic impacts are under-studied (36). The largest danger appears to come from "termination shock": abrupt and rapid warming if the SAI system is disrupted. Hence, SAI shifts the risk distribution: The median outcome may be better than the climate change it is offsetting, but the tail risk could be worse than warming (36).

There are other interventions that a better understanding of catastrophic climate change could facilitate. For example, at the international level, there is the potential for a "tail risk treaty": an agreement or protocol that activates stronger commitments and mechanisms when early-warning indicators of potential abrupt change are triggered.

#### The Potential for Climate Catastrophe

There are four key reasons to be concerned over the potential of a global climate catastrophe. First, there are warnings from history. Climate change (either regional or global) has played a role in the collapse or transformation of numerous previous societies (37) and in each of the five mass extinction events in Phanerozoic Earth history (38). The current carbon pulse is occurring at an unprecedented geological speed and, by the end of the century, may surpass thresholds

that triggered previous mass extinctions (39, 40). The worst-case scenarios in the IPCC report project temperatures by the 22nd century that last prevailed in the Early Eocene, reversing 50 million years of cooler climates in the space of two centuries (41).

This is particularly alarming, as human societies are locally adapted to a specific climatic niche. The rise of large-scale, urbanized agrarian societies began with the shift to the stable climate of the Holocene ~12,000 y ago (42). Since then, human population density peaked within a narrow climatic envelope with a mean annual average temperature of ~13°C. Even today, the most economically productive centers of human activity are concentrated in those areas (43). The cumulative impacts of warming may overwhelm societal adaptive capacity.

Second, climate change could directly trigger other catastrophic risks, such as international conflict, or exacerbate infectious disease spread, and spillover risk. These could be potent extreme threat multipliers.

Third, climate change could exacerbate vulnerabilities and cause multiple, indirect stresses (such as economic damage, loss of land, and water and food insecurity) that coalesce into system-wide synchronous failures. This is the path of systemic risk. Global crises tend to occur through such reinforcing “synchronous failures” that spread across countries and systems, as with the 2007–2008 global financial crisis (44). It is plausible that a sudden shift in climate could trigger systems failures that unravel societies across the globe.

The potential of systemic climate risk is marked: The most vulnerable states and communities will continue to be the hardest hit in a warming world, exacerbating inequities. Fig. 1 shows how projected population density intersects with extreme >29°C mean annual temperature (MAT) (such temperatures are currently restricted to only 0.8% of Earth’s land surface area). Using the medium-high scenario of emissions and population growth (SSP3-7.0 emissions, and SSP3 population growth), by 2070, around 2 billion people are expected to live in these extremely hot areas. Currently, only 30 million people live in hot places, primarily in the Sahara Desert and Gulf Coast (43).

Extreme Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit können die Produktivität der Außenarbeiter und die Erträge wichtiger Getreidekulturen negativ beeinflussen. Diese tödlichen Hitzebedingungen könnten besiedelte Gebiete in Süd- und Südwestasien erheblich beeinträchtigen(47).

Abb. 2 nimmt eine politische Linse auf extreme Hitze und überlappt SSP3-7.0- oder SSP5-8.5-Projektionen von >29 °C MAT um 2070 mit

dem Fragile States Index (ein Maß für die Instabilität von Staaten). Es gibt eine auffällige Überschneidung zwischen derzeit gefährdeten Staaten und zukünftigen Gebieten extremer Erwärmung. Wenn sich die derzeitige politische Fragilität in den kommenden Jahrzehnten nicht wesentlich verbessert, könnte ein Gürtel der Instabilität mit potenziell schwerwiegenden Auswirkungen entstehen.

Schließlich könnte der Klimawandel die Fähigkeit der Menschheit, sich von einer weiteren Katastrophe wie einem Atomkrieg zu erholen, unwiderruflich untergraben. Das heißt, es könnten erhebliche latente Risiken entstehen (Tabelle 1): Auswirkungen, die in stabilen Zeiten beherrschbar sind, werden bei der Reaktion auf und der Erholung von einer Katastrophe schlimm. Diese unterschiedlichen Ursachen für Katastrophenbesorgnis hängen zusammen und müssen gemeinsam untersucht werden.

### Definieren der Schlüsselbegriffe

Obwohl Szenarien vom schlimmsten bis zum schlimmsten Fall in der wissenschaftlichen Literatur noch zu wenig erforscht sind, sind Aussagen, die den Klimawandel als katastrophal bezeichnen, nicht ungewöhnlich. UN-Generalsekretär António Guterres nannte den Klimawandel eine „existenzielle Bedrohung“. Akademische Studien haben davor gewarnt, dass eine Erwärmung über 5 °C wahrscheinlich „mehr als katastrophal“ ist (50) und über 6 °C „eine unbestreitbare globale Katastrophe“ darstellt (9).

Aktuelle Diskussionen über die Klimakatastrophe werden durch unklare Terminologie unterminiert. Der Begriff „katastrophaler Klimawandel“ ist nicht abschließend definiert. Ein existenzielles Risiko wird üblicherweise als ein Risiko definiert, das zu einem dauerhaften und erheblichen Verlust des langfristigen menschlichen Potenzials führt (51, 52). Diese bestehende Definition ist zutiefst mehrdeutig und erfordert eine gesellschaftliche Diskussion und Spezifikation langfristiger menschlicher Werte (52). Während eine demokratische Erforschung von Werten willkommen ist, ist es nicht erforderlich, Wege zu menschlichen Katastrophen oder Aussterben zu verstehen (52). Derzeit ist die bestehende Definition keine solide Grundlage für eine wissenschaftliche Untersuchung.

Wir bieten verdeutlichte Arbeitsdefinitionen solcher Begriffe in Tabelle 1. Dies ist ein erster Schritt zur Erstellung eines Lexikons für globale Katastrophen. Einige der Begriffe, wie z. B. was ein „plausibles“ Risiko

oder ein „erheblicher Beitrag“ darstellt, sind zwangsläufig mehrdeutig. Andere, wie die Festlegung auf 10 % oder 25 % der Weltbevölkerung, sind teilweise willkürlich (10 % sind als Marker für einen vorangegangenen Verlust gedacht, und 25 % sind als beispielloser Rückgang gedacht; weitere Erläuterungen finden Sie im SI-Anhang). Weitere Forschung ist notwendig, um diese Definitionen zu schärfen. Die Schwellenwerte für globale Katastrophen- und Dezimierungsrisiken sind als allgemeine Heuristik und nicht als konkrete numerische Grenzen gedacht. Andere Faktoren wie Morbidität und kultureller und wirtschaftlicher Verlust müssen berücksichtigt werden.

Wir definieren Risiko als die Wahrscheinlichkeit, dass die Exposition gegenüber den Auswirkungen und Reaktionen des Klimawandels zu nachteiligen Folgen für menschliche oder ökologische Systeme führt. Für die Climate Endgame-Agenda interessieren uns besonders die katastrophalen Folgen. Jedes Risiko setzt sich aus vier Determinanten zusammen: Hazard, Exposure, Vulnerability und Response (3).

Wir haben eine globale Erwärmung von 3 °C oder mehr bis zum Ende des Jahrhunderts als Marker für extreme Klimaveränderungen festgelegt. Diese Schwelle wird aus vier Gründen gewählt: Ein solcher Temperaturanstieg geht weit über international vereinbarte Ziele hinaus, alle IPCC-„Gründe zur Besorgnis“ in Bezug auf Klimaauswirkungen sind entweder „hohes“ oder „sehr hohes“ Risiko zwischen 2 °C und 3 °C sind erheblich erhöhte Risiken sich selbst verstärkender Veränderungen, die es unmöglich machen würden, die Erwärmung auf 3 °C zu begrenzen, und diese Werte beziehen sich auf eine weitaus größere Ungewissheit in Bezug auf die Auswirkungen.

Bisherige Schlüsselforschung

Die nächsten Versuche, direkt zu untersuchen oder umfassend anzugehen, wie der Klimawandel zum Aussterben der Menschheit oder zu einer globalen Katastrophe führen könnte, stammen aus populärwissenschaftlichen Büchern wie *The Uninhabitable Earth* (53) und *Our Final Warning* (10). Letztere, eine Überprüfung der Klimaauswirkungen in unterschiedlichem Ausmaß, kommt zu dem Schluss, dass ein globaler Temperaturanstieg von 6 °C „sogar das Überleben der Menschen als Spezies gefährdet“ (10).

Wir wissen, dass sich die Gesundheitsrisiken mit steigenden Temperaturen verschlimmern (54). So besteht bereits bei höheren Temperaturen eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für mehrfache „Brotkorbausfälle“ (die einen Lebensmittelpreisschock verursachen) (55). Für die vier wichtigsten Maisanbauregionen (auf die 87 % der

Maisproduktion entfallen) steigt die Wahrscheinlichkeit von Produktionsverlusten von mehr als 10 % von 7 % jährlich unter einem Temperaturanstieg von 2 °C auf 86 % unter 4 °C (56). Der IPCC stellt in seinem Sechsten Sachstandsbericht fest, dass bis zum Ende des Jahrhunderts 50 bis 75 % der Weltbevölkerung aufgrund extremer Hitze und Feuchtigkeit lebensbedrohlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein könnten (6). Der SI-Anhang enthält weitere Einzelheiten zu mehreren Schlüsselstudien zum extremen Klimawandel. Die IPCC-Berichte fassen begutachtete Literatur zu Klimawandel, Auswirkungen und Schwachstellen sowie Minderung zusammen. Obwohl im Beitrag der Arbeitsgruppe 1 zum Sechsten Sachstandsbericht 15 Kippelemente in Biosphäre, Ozeanen und Kryosphäre identifiziert wurden, viele davon mit irreversiblen Schwellenwerten, gab es nur sehr wenige Veröffentlichungen zu Katastrophenszenarien, die bewertet werden konnten. Die bemerkenswerteste Berichterstattung sind die Synthesen der Arbeitsgruppe II „Gründe zur Besorgnis“, über die seit 2001 berichtet wurde. Diese Synthesen wurden entwickelt, um die Bestimmung darüber zu informieren, was eine „gefährliche anthropogene Störung“ des Klimasystems ist, die das UNFCCC verhindern will. Die fünf Bedenken sind einzigartige und bedrohte Ökosysteme, Häufigkeit und Schwere extremer Wetterereignisse, globale Verteilung und Ausgewogenheit der Auswirkungen, wirtschaftliche und ökologische Gesamtauswirkungen und irreversible, großräumige, abrupte Übergänge. Jede IPCC-Bewertung ergab größere Risiken, die bei einem geringeren Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen auftreten. Im Sechsten Sachstandsbericht wurden alle fünf Bedenken bei Temperaturen von 1,2 °C bis 4,5 °C als sehr hoch eingestuft. Demgegenüber wurden im vorangegangenen Assessment Report (6) nur zwei in diesem Temperaturintervall als sehr hoch bewertet. Alle fünf Bedenken sind jetzt bei „hoch“ oder „sehr hoch“ bei einer Erwärmung von 2 °C bis 3 °C (57). Eine beispielhafte Forschungsagenda: Extreme Erdsystemzustände, Massensterblichkeit, gesellschaftliche Fragilität und integrierte Klimakatastrophenbewertungen

Wir schlagen eine Forschungsagenda für den katastrophalen Klimawandel vor, die sich auf vier Hauptstränge konzentriert:

- 

Langfristige Dynamik und Auswirkungen des extremen Klimawandels verstehen

-

Erforschung klimabedingter Wege zu Massenmorbidity und -sterblichkeit

•

Untersuchung sozialer Fragilität: Schwachstellen, Risikokaskaden und Risikoreaktionen

•

Synthese der Forschungsergebnisse zu „Integrierten Katastrophenbewertungen“

Unsere vorgeschlagene Agenda lernt aus und baut auf integrierten Bewertungsmodellen auf, die angepasst werden, um Schäden großen Ausmaßes besser bewerten zu können. Eine Reihe von Wendepunkten wurde bewertet (58–60), wobei die Auswirkungen von einer 10-prozentigen Wahrscheinlichkeit einer Verdoppelung der sozialen Kosten von Kohlenstoff (61) bis zu einer Verachtfachung des optimalen Kohlenstoffpreises (60) reichen. Dies spiegelt frühere Erkenntnisse wider, dass Wohlfahrtsschätzungen von Fat-Tail-Risiken abhängen (31). Modellannahmen wie Abzinsungssätze, exogene Wachstumsraten, Risikopräferenzen und Schadensfunktionen beeinflussen die Ergebnisse ebenfalls stark.

In diesen Modellen fehlen große, wichtige Aspekte, die in der Forschungsagenda hervorgehoben werden: längerfristige Auswirkungen unter extremem Klimawandel, Pfade zu Massenmorbidity und -sterblichkeit sowie die Risikokaskaden und systemischen Risiken, die extreme Klimafolgen auslösen könnten. Fortschritte in diesen Bereichen würden realistischere Modelle und Schadensfunktionen ermöglichen und dazu beitragen, direkte Schätzungen von Opfern (62) zu liefern, ein notwendiges moralisches nichtökonomisches Maß für das Klimarisiko. Wir fordern die Forschungsgemeinschaft auf, integrierte konzeptionelle und halbquantitative Modelle von Klimakatastrophen zu entwickeln. Schließlich laden wir andere Gelehrte ein, diese vorgeschlagene Agenda zu überarbeiten und zu verbessern.

Extreme Erdsystemzustände.

Wir müssen potenzielle langfristige Zustände des Erdsystems unter extremen Klimaänderungen verstehen. Das bedeutet, verschiedene „Treibhauserde“-Szenarien (21) oder andere Extremszenarien abzubilden, wie beispielsweise alternative Zirkulationsregime oder große, irreversible Änderungen der Eisbedeckung und des Meeresspiegels. Diese Forschung erfordert die Berücksichtigung der langfristigen Klimadynamik und ihrer Auswirkungen auf andere Prozesse auf planetarer Ebene. Untersuchungen deuten darauf hin, dass frühere

Massensterben aufgrund von Schwelleneffekten im Kohlenstoffkreislauf aufgetreten sind, die wir in diesem Jahrhundert überschreiten könnten (40, 63). Die wichtigsten Auswirkungen früherer Massenaussterben, wie z. B. Hypoxie und Anoxie im Ozean, könnten auch längerfristig eskalieren (40, 64).

Die Untersuchung potenzieller Kippunkte und irreversibler „festgeschriebener“ Veränderungen von Umwelt- und Klimasystemen ist von wesentlicher Bedeutung. Zum Beispiel deutet die Modellierung des antarktischen Eisschildes darauf hin, dass es mehrere Kippunkte gibt, die eine Hysterese aufweisen (65). Es wurde festgestellt, dass ein irreversibler Verlust des westantarktischen Eisschildes bei einer globalen Erwärmung von  $\sim 2$  °C ausgelöst wird, und die aktuelle Eisschildkonfiguration kann nicht wiederhergestellt werden, selbst wenn die Temperaturen auf das heutige Niveau zurückkehren. Bei einem Anstieg der globalen Temperatur um 6 °C bis 9 °C könnte ein langsamer, irreversibler Verlust der ostantarktischen Eisdecke und ein Anstieg des Meeresspiegels um über 40 m ausgelöst werden (65). Ähnliche Studien von Gebieten wie dem grönländischen Eisschild, dem Permafrost und der Landvegetation wären hilfreich. Die Identifizierung aller potenziellen Kippelemente des Erdsystems ist von entscheidender Bedeutung. Dies sollte eine Berücksichtigung breiterer planetarer Grenzen wie Biodiversität beinhalten, die Kippunkte beeinflussen werden (66), Rückkopplungen über das Klimasystem hinaus und wie Kippelemente zusammenfallen könnten (67).  
Massenmorbidity und Mortalität.

Es gibt viele potenzielle Ursachen für klimabedingte Morbidity und Mortalität, aber die „vier Reiter“ des Klimawandels sind wahrscheinlich Hungersnöte und Unterernährung, extreme Wetterereignisse, Konflikte und durch Vektoren übertragene Krankheiten. Diese werden durch zusätzliche Risiken und Auswirkungen wie die Sterblichkeit durch Luftverschmutzung und den Anstieg des Meeresspiegels verschlimmert. Diese Wege müssen weiter untersucht werden. Bisherige empirische Schätzungen sogar direkter Todesfälle durch Hitzestress in den Vereinigten Staaten werden systematisch unterschätzt (68). Eine Überprüfung der Literatur zu Gesundheit und Klimawandel von 1985 bis 2013 (mit einer Proxy-Überprüfung bis 2017) ergab, dass von 2.143 Artikeln nur 189 (9 %) eine spezielle Diskussion über extremere gesundheitliche Auswirkungen oder systemische Risiken (im Zusammenhang mit durch Migration, Hunger oder Konflikte) (69). Modelle beinhalten auch selten adaptive Reaktionen. Daher sind die

Gesamtsterblichkeitsschätzungen unsicher.

Wie kann einer möglichen Massenmorbidity und -mortality besser Rechnung getragen werden? 1) Verfolgen Sie zusammengesetzte Gefahren durch Bottom-up-Modellierung von Systemen und Schwachstellen (70) und rigorose Vorbereitung auf Stresstests (71). 2) Wenden Sie Modelle auf Szenarien mit höheren Temperaturen und längeren Zeitplänen an. 3) Risikokaskaden und systemische Risiken integrieren (siehe fol3) Integrieren Sie Risikokaskaden und systemische Risiken (siehe folgenden Abschnitt) in Gesundheitsrisikobewertungen, z. B. durch die Einbeziehung von Morbidity und Mortality infolge eines klimabedingten Lebensmittelpreisschocks.

Gesellschaftliche Fragilität: Schwachstellen, Risikokaskaden und Risikoreaktionen.

Komplexere Risikobewertungen sind im Allgemeinen realistischer. Die Risikodeterminanten sind nicht nur Gefahren, Schwachstellen und Expositionen, sondern auch Reaktionen (3, 72). Eine vollständige Risikobewertung muss Klimaauswirkungen, unterschiedliche Exposition, systemische Anfälligkeiten, Reaktionen von Gesellschaften und Akteuren sowie die Folgewirkungen über Grenzen und Sektoren hinweg (73) berücksichtigen, die möglicherweise zu Systemkrisen führen. Im schlimmsten Fall könnte ein Dominoeffekt oder eine Spirale das Ausgangsrisiko kontinuierlich verschärfen.

Gesellschaftliche Risikokaskaden können Konflikte, Krankheiten, politische Veränderungen und Wirtschaftskrisen beinhalten. Der Klimawandel hat eine komplizierte Beziehung zu Konflikten, möglicherweise auch als Risikofaktor (74), insbesondere in Gebieten mit bereits bestehenden ethnischen Konflikten (75). Der Klimawandel könnte die Ausbreitung und Übertragung von Infektionskrankheiten sowie die Ausbreitung und Schwere verschiedener zoonotischer Infektionen (76) beeinflussen und Bedingungen für neue Ausbrüche und Infektionen schaffen (6,77). Epidemien können wiederum kaskadierende Auswirkungen auslösen, wie im Fall von COVID-19. Ökologischer Stress und Naturkatastrophen sind zentrale Determinanten für die kulturelle „Enge“ (Regelstrenge, Traditionstreue und Bestrafung) von Gesellschaften (78). Die Literatur über die mittleren wirtschaftlichen Schäden des Klimawandels ist reichlich vorhanden, aber es gibt weitaus weniger über finanzielle Tail-Risiken, wie etwa die Möglichkeit globaler Finanzkrisen.

Frühere Studien könnten herangezogen werden, um das gesellschaftliche Risiko zu untersuchen. Relativ kleine, regionale



Klimaänderungen sind mit der Transformation und sogar dem Zusammenbruch früherer Gesellschaften verbunden (79, 80). Dies könnte auf die nachlassende Widerstandsfähigkeit und das Überschreiten von Wendepunkten in diesen Gesellschaften zurückzuführen sein. Es gibt Hinweise auf eine kritische Verlangsamung in Gesellschaften vor ihrem Zusammenbruch (81, 82). Es ist jedoch Vorsicht geboten, Lehren aus vormodernen Fallstudien zu ziehen. Vorgeschichte und Geschichte sollten untersucht werden, um nicht nur zu bestimmen, wie vergangene Gesellschaften von bestimmten Klimagefahren betroffen waren, sondern auch, wie sich diese Auswirkungen unterscheiden, wenn sich Gesellschaften beispielsweise in Bezug auf Bevölkerungsdichte, Vermögensungleichheit und Regierungsregime verändern. Ein solcher Rahmen wird es ermöglichen, vergangene und gegenwärtige Gesellschaften unter ein einziges Analysesystem zu bringen (37).

Die Merkmale und Schwachstellen einer modernen globalisierten Welt, in der Lebensmittel- und Transportsysteme Traumata abfedern können, müssen in der Arbeit über gesellschaftliche Sensibilität berücksichtigt werden. Solche großen, miteinander verbundenen Systeme bringen ihre eigenen Schwachstellen mit sich, insbesondere wenn Netzwerke relativ homogen sind und einige dominante Knoten stark mit allen anderen verbunden sind (83). Andere wichtige Schwachstellen der heutigen Zeit sind die schnelle Verbreitung von Fehlinformationen und Desinformationen. Diese epistemischen Risiken geben Anlass zu ernsthafter Besorgnis bei Krisen im Bereich der öffentlichen Gesundheit (84) und haben bereits Klimaschutzmaßnahmen behindert. Eine grobe und vereinfachte Darstellung, wie sich Risikokaskaden entfalten könnten, ist in Abb. 3 dargestellt.

Integrierte Katastrophenbewertungen.

Der Klimawandel wird sich in einer Welt verändernder Ökosysteme, Geopolitik und Technologie entfalten. Könnten wir sogar „warme Kriege“ sehen – technologisch verstärkte Großmachtkonflikte um schwindende Kohlenstoffbudgets, Klimaauswirkungen oder SRM-Experimente? Solche Entwicklungen und Szenarien müssen berücksichtigt werden, um ein vollständiges Bild der Klimagefahren zu erhalten. Der Klimawandel könnte andere interagierende Bedrohungen verstärken, darunter zunehmende Ungleichheit, demografische Belastungen, Fehlinformationen, neue zerstörerische Waffen und das Überschreiten anderer planetarischer Grenzen (85). Es gibt auch natürliche Schocks, wie Sonneneruptionen und Vulkanausbrüche mit großer Auswirkung, die

mögliche tödliche Synchronizitäten darstellen (86). Diese zu untersuchen ist von entscheidender Bedeutung, und eine Reihe „standardisierter Katastrophenszenarien“ würde die Bewertung erleichtern.

Expertenerhebung, Systemkartierung und partizipative Szenarien bieten vielversprechende Möglichkeiten, solche Kaskaden zu verstehen (73). Es gibt auch bestehende Forschungsagenden für einige dieser Bereiche, die finanziert werden könnten (87).

Integration kann auf verschiedene Weise angegangen werden. Metareviews und Synthesen von Forschungsergebnissen können nützliche Daten liefern, um die Wechselwirkungen zwischen Risiken abzubilden. Dies könnte durch Kausalkartierung, Expertenerhebung und agentenbasierte oder systemdynamische Modellierungsansätze erfolgen. Eine kürzlich durchgeführte Studie hat die Evidenzbasis für Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Ernährungsunsicherheit und Mitwirkenden am gesellschaftlichen Zusammenbruch (Sterblichkeit, Konflikte und Emigration) auf der Grundlage von 41 Studien kartiert (88). Ein besonders vielversprechender Weg ist die Umnutzung bestehender komplexer Modelle zur Untersuchung kaskadierender Risiken. Das resultierende Netzwerk könnte mit standardisierten Katastrophenszenarien einem „Stresstest“ unterzogen werden. Dies könnte helfen abzuschätzen, in welchen Bereichen kritische Engpässe oder Störungen oder drastische Maßnahmen (z. B. Ausfuhrverbote für Lebensmittel) auftreten können. Es wurden komplexe Modelle entwickelt, um frühere groß angelegte systemische Katastrophen wie die globale Finanzkrise 2007-2008 zu verstehen (89). Einige davon könnten für die Untersuchung der potenziellen Natur einer zukünftigen globalen Klimakrise umfunktioniert werden.

Es ist unwahrscheinlich, dass Systemausfälle global gleichzeitig auftreten; es ist wahrscheinlicher, dass es regional beginnt und dann kaskadiert. Obwohl das Ziel darin besteht, katastrophale Klimarisiken global zu untersuchen, ist die Einbeziehung des Wissens über regionale Schäden unabdingbar.

Die potenziell katastrophalen Risiken des Klimawandels sind selbst innerhalb von Modellen schwer zu quantifizieren. Jeder der oben genannten Modellierungsansätze sollte ein besseres Verständnis der Wege des systemischen Risikos und grobe probabilistische Richtlinien liefern. Die Ergebnisse könnten jedoch die Grundlage für argumentationsbasierte Instrumente bilden, um das Potenzial für katastrophale Folgen bei unterschiedlichen Temperaturanstiegsstufen abzuschätzen (90). Diese sollten in offene deliberative demokratische

Methoden einfließen, die einen fairen, integrativen und effektiven Ansatz für die Entscheidungsfindung bieten (91). Solche Ansätze könnten sich auf Entscheidungsfindungsinstrumente unter Unsicherheit stützen, wie z. B. das Minimax-Prinzip oder die Einstufung von Entscheidungen anhand der gewichteten Summe ihrer besten und schlechtesten Ergebnisse, wie im Dasgupta-Bericht zur Biodiversität vorgeschlagen (92).

Ein IPCC-Sonderbericht über den katastrophalen Klimawandel  
Das IPCC hat dem katastrophalen Klimawandel noch keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Vierzehn Sonderberichte wurden veröffentlicht. Keine deckte extreme oder katastrophale Klimaveränderungen ab. Für den siebten IPCC-Bewertungszyklus wurde ein Sonderbericht über „Kipppunkte“ vorgeschlagen, und wir schlagen vor, dass dieser erweitert werden könnte, um alle Schlüsselaspekte des katastrophalen Klimawandels zu berücksichtigen. Dies erscheint nach dem Entscheidungsrahmen des IPCC gerechtfertigt (93). Ein solcher Bericht könnte untersuchen, wie Rückkopplungen des Erdsystems Temperaturbahnen verändern könnten und ob diese irreversibel sind. Ein Sonderbericht über den katastrophalen Klimawandel könnte dazu beitragen, weitere Forschungen anzustoßen, ebenso wie der Sonderbericht „Erderwärmung um 1,5 °C“ (94). Dieser Bericht löste auch eine öffentliche Besorgnis über die Schwere der Auswirkungen in niedrigeren Temperaturbereichen aus. Die Auswirkungen eines Berichts über den katastrophalen Klimawandel könnten sogar noch deutlicher sein. Es könnte helfen, sich vor Augen zu führen, wie viel in einem Worst-Case-Szenario auf dem Spiel steht. Eine weitere Forschungsfinanzierung zu katastrophalen und Worst-Case-Klimaänderungen ist von entscheidender Bedeutung. Eine effektive Kommunikation der Forschungsergebnisse wird entscheidend sein. Während Bedenken bestehen, dass angstausslösende Botschaften nicht hilfreich sein und Lähmungen hervorrufen könnten (95), sind die Beweise für hoffnungsvolle vs. ängstliche Botschaften gemischt, sogar über Metaanalysen hinweg (96, 97). Die Rolle von Emotionen ist komplex, und es ist von strategischer Bedeutung, Botschaften für bestimmte Zielgruppen anzupassen (98). Ein kürzlich erschienener Überblick über die Klimadebatte betonte, wie wichtig es ist, politische Bündelung zu vermeiden, vertrauenswürdige Botschafter auszuwählen und wirksame Rahmen zu wählen (99). Diese Art von Überlegungen werden entscheidend sein, um eine nützliche und genaue Bürgerdiskussion zu gewährleisten.

Schlussfolgerungen

Es gibt zahlreiche Beweise dafür, dass der Klimawandel katastrophal werden könnte. Wir könnten in solche „Endspiele“ selbst bei bescheidenen Erwärmungsniveaus eintreten. Das Verständnis extremer Risiken ist wichtig für eine solide Entscheidungsfindung, von der Vorbereitung bis zur Berücksichtigung von Notfallmaßnahmen. Dazu müssen nicht nur Szenarien mit höheren Temperaturen untersucht werden, sondern auch das Potenzial der Auswirkungen des Klimawandels, zu systemischen Risiken und anderen Kaskaden beizutragen. Wir schlagen vor, dass es an der Zeit ist, ernsthaft zu prüfen, wie wir unseren Forschungshorizont am besten erweitern können, um dieses Gebiet abzudecken. Die vorgeschlagene Forschungsagenda „Climate Endgame“ bietet eine Möglichkeit, sich in diesem wenig untersuchten Bereich zurechtzufinden. Sich einer Zukunft mit sich beschleunigendem Klimawandel zu stellen und dabei blind für Worst-Case-Szenarien zu sein, ist bestenfalls naives Risikomanagement und schlimmstenfalls tödlich dumm.