



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

EARTH AND SOCIETY  
RESEARCH HUB

# STÄDTE MÜSSEN SICH GRUNDLEGENDE VERÄNDERN

ZEHN KLIMAFORSCHER:INNEN BERICHTEN





# STÄDTE MÜSSEN SICH GRUNDLEGENDE VERÄNDERN

ZEHN KLIMAFORSCHER:INNEN BERICHTEN

Ein Lesebuch der Hamburger Klimaforschung

## INHALT

- 4 STRASSENBÄUME
- 10 ACHTUNG HOCHWASSER
- 18 STÄDTE IM KLIMAWANDEL
- 26 INDIENS LANDWIRTSCHAFT
- 32 VERBORGENE VULKANE
- 38 CO<sub>2</sub>-PREIS
- 42 WARNUNG: EXTREMWETTER
- 47 JURISTISCHER KLIMASCHUTZ
- 52 3D-WETTER
- 56 FLUSS-MANAGEMENT

## NEUE KLIMAGESCHICHTEN AUS HAMBURG

Fischmarkt unter Wasser? Mit dem Klimawandel können Starkregen und Sturzfluten in Hamburg häufiger werden. Doch Städte sind meist nicht gut gerüstet, um mit dem Wasser und den damit verbundenen Risiken umzugehen. Wie können sich Städte wie Hamburg an den Klimawandel anpassen? Diese und andere Fragen rund um den Klimawandel untersuchen die Forschenden am ESRAH (ehemals CEN) und am Exzellenzcluster CLICCS der Universität Hamburg.

Erfahren Sie außerdem, wie die nächste Generation von Straßenbäumen fit für den Klimawandel wird, welche Geheimnisse der Meeresboden um Santorini birgt und wie es dem Klimaschutz hilft, der Natur gesetzlich Rechte zu verleihen.

Einmal im Monat geben unsere Forschenden im Hamburger Abendblatt Einblick in ihre Arbeit. Zehn dieser Beiträge haben wir auf den folgenden Seiten für Sie zusammengefasst.

Viel Spaß beim Schmökern!

## TESTFELD FÜR DIE STRASSENBÄUME

Bäume tragen in Hamburg durch Schatten und Kühlung entscheidend zur Lebensqualität bei. Doch unsere Straßenbäume kämpfen mit den Bedingungen am Straßenrand – und mit dem Klimawandel. Vor allem die jung gepflanzten haben Stress. Sie wachsen langsam und bilden häufig keine großen Kronen mehr aus. Wie wird die nächste Generation fit für den Klimawandel?

Um herauszufinden, welche Bäume am besten mit Trockenheit zurechtkommen, habe ich mit meinem Team ein Experiment entwickelt. Drei Jahre lang erforschten wir in der Baumschule Lorenz von Ehren neun verschiedene Baumarten, insgesamt 135 junge Bäume. Dabei spielte das Substrat, also der Boden, in den junge Bäume gepflanzt werden, eine zentrale Rolle.

An vielen Straßenrändern findet sich Sandboden, oft durch Bauarbeiten eingetragen. Sand ist relativ grobkörnig und kann wenig Wasser speichern, gewährleistet aber andererseits einen guten Luftaustausch. Feinkörniger Boden ist dagegen weich wie Mehl und speichert im Vergleich mehr



Wasser. Er ist aber anfälliger für Verdichtung, zum Beispiel durch Gewicht von oben, etwa durch Autos oder Baustellen.

Für unser Experiment wollten wir die Bedingungen an den Straßenrändern nachempfinden. In der Baumschule wurden deshalb Pflanzgruben ausgehoben, die wir mit zwei unterschiedlich zusammengesetzten Böden füllten: Ein oft am Straßenrand vorgefundener Boden, der 95 Prozent Sand enthält sowie ein anderes, häufig verwendetes Substrat mit 93 Prozent Sand und etwas mehr Humus. Dieses kann Wasser ein wenig besser speichern.

Als Vergleich bekam das letzte Drittel der Bäume den fruchtbaren Boden der Baumschule in seine Pflanzgruben. Dieser Boden bietet mit noch mehr Humus und einer feinkörnigen Struktur ideale Bedingungen und kann bis zu viermal mehr Bodenwasser speichern als die Sandböden. Zusätzlich haben wir 300 Sensoren in die Gruben eingegraben. So konnten wir über drei Jahre den Wasserverbrauch verfolgen, während sich die Wurzeln entwickelten.

Die Ergebnisse zeigen: Beide Sand-Substrate sind für trockene Zeiten nicht geeignet. Alle Bäume überlebten zwar, zeigten aber durchweg ein schwaches Wachstum. Wir haben im Wurzelraum eine Wasserverfügbarkeit von nur sechs bis zehn Prozent gemessen, im Vergleich zu 23 Prozent bei idealem Boden.





Wir stellten fest, dass die Bäume nicht einmal das wenige zur Verfügung stehende Wasser voll ausschöpfen konnten. Wenn Sandboden austrocknet, führt seine gröbere Struktur dazu, dass die Kapillarströme des Wassers in den Zwischenräumen leichter abreißen. Dadurch wird der Wasserfluss zu den Baumwurzeln unterbrochen. Im feinkörnigen Boden ist dies nicht so schnell der Fall.

Deshalb kamen Bäume wie die Stadtlinde oder der Amberbaum, deren Wurzeln dem Wasser quasi hinterherwachsen, in Sandböden etwas besser mit der Trockenheit klar. Bäume, die dagegen den Unterdruck stark erhöhen können, um auch bei Trockenheit noch Wasser aufzunehmen, haben die weniger erfolgreiche Strategie – wie zum Beispiel Blasen-esche oder Zerreiche.

Fazit: Kein Baum kann gesund wachsen, wenn die Voraussetzungen nicht stimmen. Die Böden am Straßenrand sind oft von schlechter Qualität. Junge Bäume brauchen daher unbedingt ausreichend große Pflanzgruben mit verbesserten Substraten, die mehr Wasser speichern. Die empfohlene Größe für Pflanzgruben ist zwölf Kubikmeter – je größer, desto besser.

---

**Dr. Alexander Schütt** erforschte am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und am Institut für Bodenkunde Bäume im Klimawandel.



## **ACHTUNG HOCHWASSER: WO MENSCHEN IN HAMBURG MEHR UNTERSTÜTZUNG BRAUCHEN**

Mit dem Klimawandel werden auch extreme Wetterlagen in Hamburg häufiger. Gegen heftige Sturmfluten ist Hamburg mit Deichen gut geschützt. Doch Starkregen und Sturzfluten können überall auftreten – nicht nur entlang von Flüssen. Seit Juni 2021 hat Hamburg eine Gefahrenkarte für Starkregen. Diese zeigt auf einem Stadtplan, wohin das Wasser fließt und wo es zu Überflutungen kommen könnte.

Mich interessiert dabei, wie es den Menschen in solch einer Katastrophenlage ergeht. Sind alle den Gefahren gleichermaßen ausgesetzt und entsprechend verwundbar? Wer kann eine Krise aus eigener Kraft bewältigen und wer nicht? Diese Fragen analysiere ich anhand von unterschiedlichen sozialen Daten zusammen mit meinen Kolleg:innen.

Um festzustellen, wo die Hamburger Bevölkerung durch Hochwasser besonders gefährdet ist, wurde bisher die Bevölkerungsdichte betrachtet. Leben in einem Gebiet nur



wenige Menschen, sind von einer Krise auch nur wenige betroffen. Doch spiegelt das ausreichend wider, wie verwundbar die Bewohner:innen sind? Um ein genaueres Bild zu bekommen, zogen wir Angaben zu weiteren sozialen Faktoren hinzu. Solche Daten stellt in Hamburg das Statistikamt Nord zur Verfügung.

Wie empfindlich die Bewohner:innen eines Stadtgebietes sind, ermittelten wir über den Anteil an Kindern unter zehn Jahren und an alten und alleinwohnenden Menschen. Diese sind bei Krisen oft auf Hilfe angewiesen und können sich nur schwer aus eigener Kraft retten. Die so genannte Bewältigungsfähigkeit erfasst den Anteil der Menschen, die finanzielle Grundsicherung beziehen oder keinen höheren Schulabschluss haben. Wieso haben wir diese Faktoren herangezogen? Geld kann helfen, Probleme zu lösen. So bietet zum Beispiel ein höheres Einkommen mehr Möglichkeiten, die eigene Situation zu verbessern – beispielsweise nachdem ein Hochwasser das Haus oder die Wohnungseinrichtung zerstört hat.

Mithilfe dieser Daten erstellten wir anschließend unterschiedliche Karten der sozialen Verwundbarkeit. Vergleichen wir unsere Ergebnisse mit der Karte der Bevölkerungsdichte, sehen wir viele Ähnlichkeiten. Doch es lohnt der Blick ins Detail. So weisen unsere Berechnungen auf eine höhere Ver-





wundbarkeit gegenüber Gefahren in Kirchdorf-Süd, Steilshoop und im Osdorfer Born hin. Dort ist diese aufgrund der Bevölkerungsdichte zwar bereits hoch, doch die sozialen Faktoren verschärfen das Gefahrenpotenzial noch. Gehen wir noch detaillierter vor, zeigen sich diverse Gebiete, in denen überdurchschnittlich viele alte Menschen allein leben – etwa in Teilen von Bergedorf. Rein aus der Bevölkerungsdichte ließ sich das bisher nicht ablesen. Westlich der Alster hingegen ist die Bevölkerungsdichte zwar hoch, doch können die dort lebenden Menschen Gefahren leichter bewältigen. Viele haben eine höhere Bildung und die nötigen finanziellen Mittel.

Unsere Berechnungen zeigen, in welchen Vierteln es besonders wichtig ist, den Schutz vor Hochwassergefahren zu verbessern. Die soziale Verwundbarkeit zeigt außerdem, in welchen Stadtgebieten finanzielle Ressourcen und die Bildungschancen unzureichend sind. Es ist wichtig, in diesen Gebieten massiv in Bildung zu investieren, damit die Menschen dort langfristig Krisen leichter bewältigen können.

---

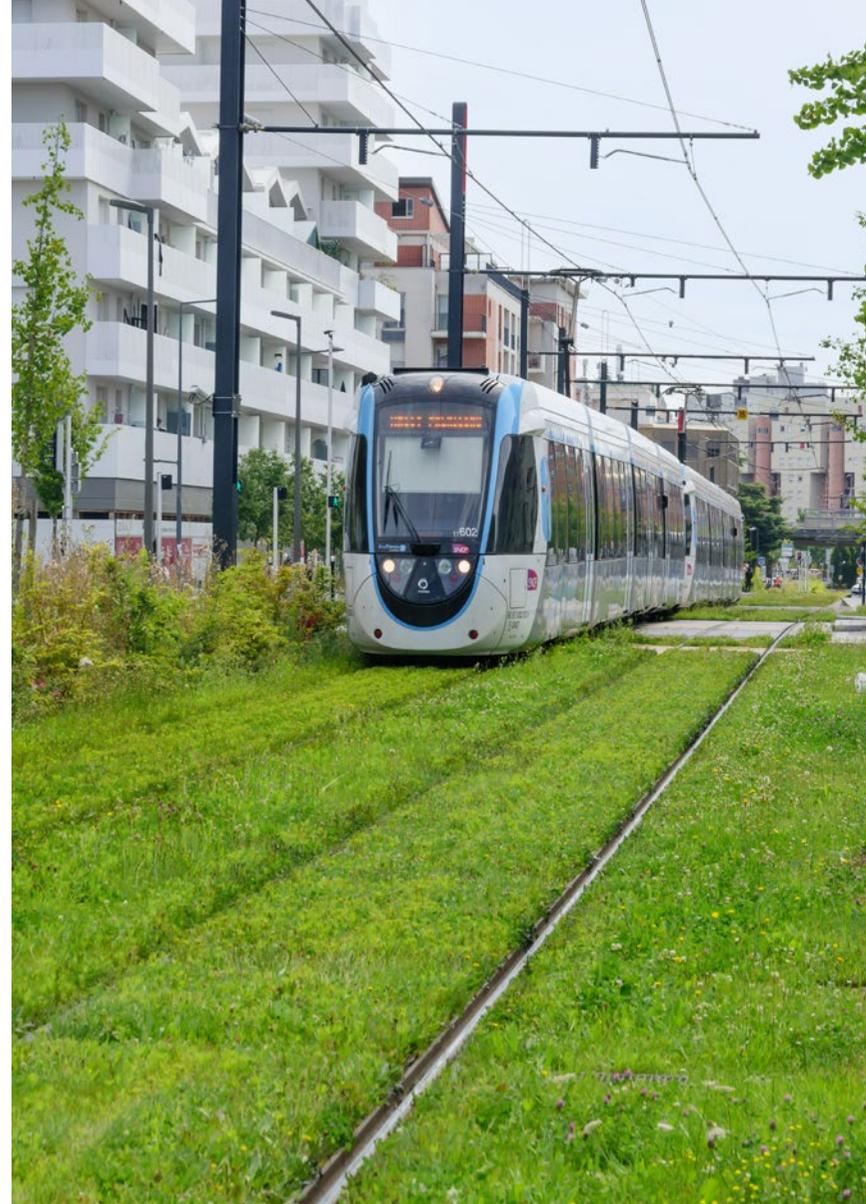
**Dr. Malte von Szombathely** ist Stadtgeograf und forscht im Exzellenzcluster für Klimaforschung CLICCS der Universität Hamburg.

## **ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL: STÄDTE MÜSSEN SICH GRUNDLEGENDE VERÄNDERN**

Bei Starkregen, wenn in kurzer Zeit eine bestimmte Regenmenge überschritten wird, können in Städten lokale Überschwemmungen drohen. Dies hängt aber nicht nur von der Menge ab, sondern auch davon, wie aufnahmefähig der Boden ist.

Ist er versiegelt? Gibt es Pflanzen, die den Abfluss an der Oberfläche verzögern? Gibt es Höhenunterschiede und wenn ja, wo läuft das Wasser zusammen? Außerdem spielt das Fassungsvermögen der Kanalisation eine Rolle.

Ob aus einem Starkregenereignis ein Notfall oder gar eine Katastrophe wird, hängt aber auch von gesellschaftlichen Faktoren ab. Zum Beispiel davon, wie gut Bürger:innen über Risiken informiert sind und ihre Grundstücke dementsprechend umgestalten. Durch gezieltes Regenwassermanagement lässt sich ein zu schneller Abfluss an der Oberfläche verhindern. Damit Rückhalteflächen geschaffen und Böden entsiegelt werden, müssen politische Entscheidungen fallen – auch solche, die auf eine Neugestaltung des öffentlichen Raums





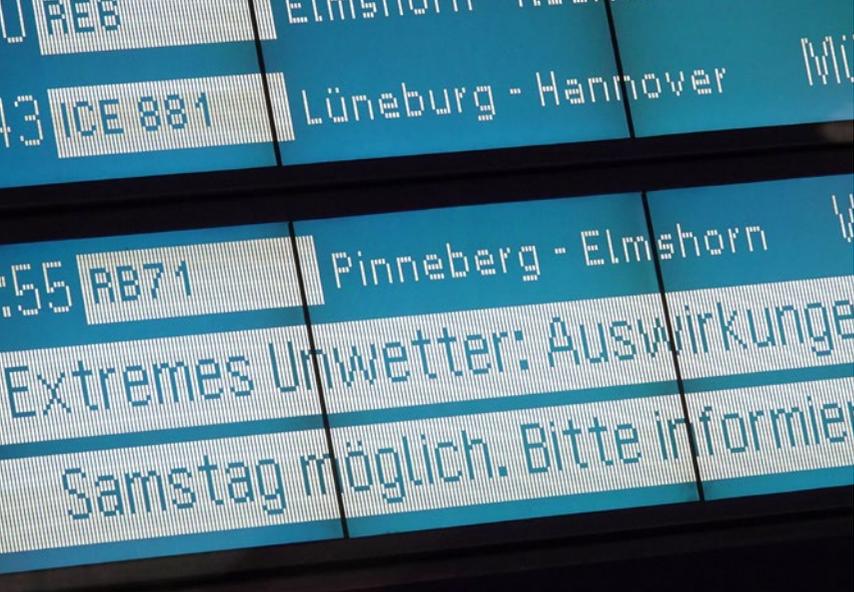
zielen. Zum Beispiel indem wir uns mit dem Wasser arrangieren und diesem generell mehr Raum in der Stadt geben.

Deshalb habe ich mit meinen Kolleg:innen Klimarisiken am Beispiel Hamburg nicht nur aus Sicht der Meteorologie, sondern aus ganzheitlicher Perspektive untersucht. Gemeinsam haben wir geprüft, wie nachhaltig Anpassungsmaßnahmen sind, aber auch wie aufwendig und wie akzeptabel. Wie wahrscheinlich ist es, dass die Maßnahmen umgesetzt werden? Wie hoch ist die Bereitschaft, kann und will die Stadt sich diese leisten?

Das ist knifflig. Denn anders als in der Physik lässt sich gesellschaftliches Handeln nicht exakt berechnen und in ein Computermodell integrieren. So haben Starkniederschläge in der Metropolregion stark zugenommen. Das führt aber nicht automatisch dazu, dass mehr Flächen entsiegelt oder Speicherbecken eingerichtet werden, die die Wassermassen auffangen können. Das hängt eher davon ab, ob die finanziellen Mittel bereitgestellt werden, wie viel Zeit ein Umbau benötigt und wie hoch der Druck auf die Politik ist. Der entsteht zum Beispiel, wenn Schäden sich häufen und immer teurer ausfallen, neue wissenschaftliche Erkenntnisse hinzukommen oder mehr und besser aufgeklärt wird.

Wir haben deshalb ein konzeptionelles Modell der Stadt erarbeitet. Damit lassen sich Ursachen und Zusammenhänge





zwischen den einzelnen Komponenten bildlich darstellen und mögliche Rückkopplungen erkennen. Denn es geht weniger um einzelne Phänomene als darum, ob und inwieweit sich Prozesse gegenseitig verstärken, vermindern oder aufheben. Solche speziellen Analysen lassen sich nur im Team bewerkstelligen.

Jede und jeder von uns ist Profi auf einem bestimmten Gebiet: Hydrologie, Bodenkunde, Sozialwissenschaften, Politikwissenschaften, Rechtswissenschaften, Stadtplanung, Ökonomie, Meteorologie. Unser gemeinsames Ziel: Herausfinden, welches die entscheidenden Hebel sind, um eine nachhaltige Anpassung an den Klimawandel zu ermöglichen.

Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass es notwendig ist, sich auf effektive Hebelpunkte zu konzentrieren, die vielleicht weniger offensichtlich sind, dafür aber auf systemweite Veränderungen abzielen. Die Komplexität der Klimaanpassung kann nur durch eine Beteiligung aller Akteure – Wasserwirtschaft, Stadtplanung, Politik und Bürger:innen – erfolgreich angegangen werden. Der Ansatz der wassersensiblen Stadtentwicklung ist ein erster Schritt in die richtige Richtung.

---

**Dr. Franziska S. Hanf** ist Klimaphysikerin. Sie forscht zu Klimaanpassung in Städten im Exzellenzcluster CLICCS der Universität Hamburg.

## TRADITIONELLE LANDWIRTSCHAFT IN INDIEN BEDROHT

Der Klimawandel beeinflusst die Landwirtschaft in vielen Regionen der Erde. Besonders schwierig wird es in Gebieten wie dem Himalaya in Nordostindien, wo steile Hänge und nährstoffarme Böden ohnehin den Anbau erschweren. Wie sind die Aussichten für die lokale Bevölkerung?

Ein Feld roden, bestellen, ernten, auf ein neues Feld wechseln. Auf vielen Anbaugeländen rund um den Himalaya wird Wanderfeldbau betrieben – eine traditionelle Anbauform etwa für Reis, andere Getreidearten und Gemüse. Beim Wanderfeldbau wird eine Waldfläche abgebrannt, dabei werden Schädlinge vernichtet und der Boden mit der Asche gedüngt. Nach ein bis zwei Anbaujahren wird ein neues Feld bestellt. Währenddessen liegt das alte Feld brach, ein neuer Wald wächst heran und der Boden erholt sich. Mein Team und ich forschen daran, was es für solche traditionellen Anbaumethoden in Zukunft bedeutet, wenn sich das Klima ändert.

Denn der Klimawandel sorgt nicht nur für Waldbrände in Australien und Trockenheit in Deutschland – er hat auch Aus-





wirkungen auf die Bäuerinnen und Bauern in Nordostindien. Wie stark der Anbau dort bereits gefährdet ist, haben wir im Frühjahr 2023 vor Ort untersucht. In Gesprächen berichteten uns die Landwirtinnen und Landwirte etwa, dass sie im Frühjahr keinen Mais anbauen konnten, weil der Regen ausblieb. Hinzu kommen weitere Herausforderungen: Vielerorts verlassen junge Menschen die Dörfer und können nicht mehr beim Anbau helfen. In anderen Gegenden treten kommerzielle Plantagen in Konkurrenz zu traditionellen Anbauformen. Das verringert die verfügbare Landfläche, was zu einer Verkürzung der Anbauzyklen beitragen kann.

Doch wie wird der Klimawandel in Zukunft die Felder am Himalaya beeinflussen? Dafür haben wir Informationen aus Bodenproben und Klimadaten in ein Computermodell eingegeben. Das Modell bildet alle Prozesse ab, die zwischen Atmosphäre, Pflanzen und Boden ablaufen: etwa Wasserkreislauf, Pflanzenwachstum und Bodenerosion. Es berücksichtigt auch, wann die Menschen in Indien Reis aussäen, wann sie ihn ernten und wie lange sie die Flächen danach ruhen lassen. So konnten wir ermitteln, wie das Klima die Böden in Nordostindien bis 2100 beeinflusst.

In Zukunft wird durch stärkere Regenfälle während des Sommermonsuns immer mehr fruchtbarer Boden abgetragen. Besonders betroffen ist der Anbau auf den steilen

Hängen und auf Flächen mit intensiver Bewirtschaftung, also kurzen Brachzeiten. Dort spülen Regenfälle den Boden leichter weg. So könnte die Bodenerosion um mehr als 60 Prozent zunehmen, wenn sich die Erde statt um 1,5 um 3 Grad Celsius erwärmt. Bodenerosion wird also vor allem zum Ende des Jahrhunderts zunehmend zum Problem für die traditionelle Landwirtschaft in Nordostindien.

Wollen die Menschen unter diesen Aussichten den Wanderfeldbau weiter betreiben? Aus der jüngeren Generation tendieren viele dazu, die Landwirtschaft zu verlassen. Ältere hingegen halten am Wanderfeldbau fest, aus kulturellen Gründen, aber auch aus Mangel an Alternativen, selbst wenn sie sich dafür an neue Bedingungen anpassen müssen.

Helfen könnten etwa längere Pausen zwischen den Anbauzyklen, dann wird weniger fruchtbarer Boden abgetragen. Auch die Beschaffenheit der Felder muss berücksichtigt werden: Je steiler die Anbaufläche, desto länger sollte das Feld brachliegen. Angepflanzte Bäume könnten zudem helfen, den Boden mit ihren Wurzeln zu stabilisieren.

---

**Dr. Lea Schröder** erforscht am Exzellenzcluster für Klimaforschung CLICCS der Universität Hamburg, wie sich Landwirtschaft nachhaltig an den Klimawandel anpassen kann.

## SANTORINI: UNTERGRUND DES MEERES ERZÄHLT GESCHICHTE DER VULKANE

Das malerische Santorini ist eine Inselgruppe in der südlichen Ägäis. Diese Inseln bilden den Rand einer mächtigen, vom Meer gefluteten vulkanischen Caldera. Häufig wurde spekuliert, dass Santorini die Reste von Atlantis birgt – jenes hochentwickelten Inselreichs, das plötzlich unterging. Vor etwa 3600 Jahren zerstörte der Ausbruch des Vulkans im Inselzentrum eine blühende minoische Stadt, was Anknüpfungspunkte zur antiken Legende bietet.

Dieser Ausbruch erzeugte einen Tsunami, der das gesamte östliche Mittelmeer erreichte und so vermutlich zum Untergang der Kultur der Minoer beitrug. Er änderte auch das Klima: Aschewolken verdunkelten die Sonne und versetzten die Welt in einen zweijährigen Winter.

Die Spuren der Vulkane reichen auf den Inseln bis zu 600.000 Jahre in die Vergangenheit. Doch die geologischen Strukturen gewähren den Blick nur auf einen Teil der Geschichte. Denn große Teile des Vulkansystems sind unter Wasser und





unter dem Meeresboden verborgen. Ich habe mit einem internationalen Forschungsteam erstmals detailliert rekonstruiert, wie sich das Vulkansystem räumlich und zeitlich entwickelt hat. Seine geologische Geschichte umfasst auch die nahe gelegenen Christiana-Inseln und den Unterwasservulkan Kolumbo.

Auf Expeditionen unter Leitung meines Doktorvaters Christian Hübscher sammelten wir seismische Daten, die uns zeigen, wie die vulkanischen Zentren gewachsen und wieder verschwunden sind. Um ein Bild vom Untergrund des Meeresbodens zu erhalten, nutzten wir ein Verfahren, das dem Ultraschall in der Medizin ähnelt: Mit Forschungsschiffen schleppen wir Unterwassermikrofone, sogenannte Hydrophone, durch das Meer. Über einen speziellen Luft-Pulser produzieren wir dabei akustische Signale, die in den Boden dringen und dort zurückgeworfen werden. Die Hydrophone nehmen die reflektierten Signale auf, die wir mit Hilfe von Computerprogrammen auswerten.

Mit diesen Signalen können wir ein strukturelles Abbild des Untergrunds erstellen und einige hundert Meter unter den Meeresboden schauen. Die Ablagerungen von Vulkanausbrüchen zeigen dabei Eigenschaften, die wir einzelnen Vulkanen zuordnen können. Dabei machten wir eine Neuentdeckung: ein bisher unbekannter Vulkan westlich von

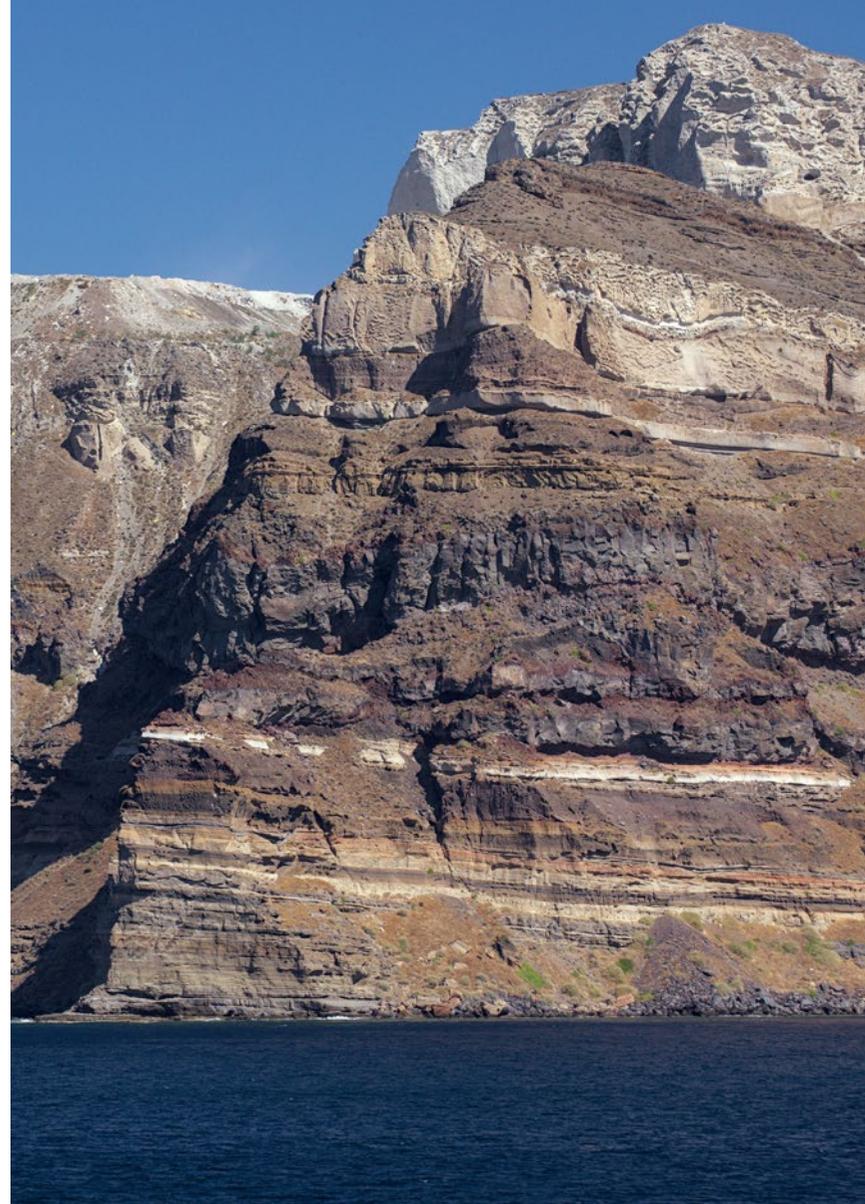
Santorini! Lange erloschen wurde er über Jahrtausende von jüngeren Sedimenten überdeckt.

Aber wann genau entstanden die Schichten? Um das herauszufinden, haben wir ihre Dicke gemessen. Mithilfe der durchschnittlichen Sedimentationsraten konnten wir ihr Alter abschätzen und ermitteln, wann sich die Eruptionen ereigneten. Wir konnten zeigen, dass das Vulkansystem in vier Phasen und aus einer Kette einzelner vulkanischer Zentren entstanden ist.

Die erste Phase begann bereits vor rund drei Millionen Jahren im Pliozän. Erst in der letzten Phase, die vor etwa 350.000 Jahren begann, entstand der zentrale Vulkan, dessen Ablagerungen man heute auf Santorini bewundern kann. Wir vermuten, dass die Phasen eng mit der tektonischen Aktivität des umliegenden Rift-Systems – einer Reihe von langgezogenen Brüchen in der Erdkruste – zusammenhängen. Unsere Ergebnisse werden dabei helfen, die Häufigkeit von Vulkanausbrüchen in der Region zu rekonstruieren und so Gefahren zu erkennen und Risiken zuverlässiger zu bewerten.

---

**Dr. Jonas Preine** erforschte in seiner Doktorarbeit am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit die Entwicklung von Vulkansystemen.



## CO<sub>2</sub>-PREISE SIND AUCH FÜR DIE GESUNDHEIT GUT

War die Ökosteuer ein Flop? Seit 1999 wurde deutschlandweit auf Benzin und Diesel ein Aufschlag erhoben. Geplant war, ihn jedes Jahr weiter zu erhöhen. Doch schon 2003 wurde die Abgabe bei rund 15 Cent pro Liter eingefroren. So besteht die Steuer bis heute, parallel zum CO<sub>2</sub>-Preis, der seit 2021 erhoben wird. Die bisherige Forschung bescheinigte der Ökosteuer nur geringen Nutzen – doch das Gegenteil ist der Fall.

Um den Klimawandel einzudämmen, müssen wir den Ausstoß von CO<sub>2</sub>, also Kohlendioxid, extrem zurückfahren. Ein Weg ist dabei eine Steuer auf Benzin und Diesel. Aber welcher Preis bewirkt wie viel weniger Abgase? Die Ökosteuer wurde früh ausgebremst, hatte sie überhaupt einen Effekt? Für den Bereich Verkehr haben wir jetzt genau hingeschaut. Mit meinem damaligen Doktoranden Pier Basaglia habe ich gesamtwirtschaftliche Auswirkungen von Preisen auf CO<sub>2</sub> analysiert.

Wie hätten sich die Emissionen in Deutschland ohne die Ökosteuer entwickelt? Leider gibt es kein zweites Deutschland zum Vergleich, in dem die Abgabe nicht eingeführt wurde.



Im Team haben wir einen anderen Weg gefunden: Wir programmierten einen aussagekräftigen Deutschland-„Klon“, ein Modell, das den deutschen Verkehrssektor mit Hilfe von ökonomischen Kennzahlen beschreibt. Dazu nutzen wir Datensätze von anderen Industrieländern, die Deutschland möglichst ähnlich sind und im untersuchten Zeitraum keine Umweltsteuer eingeführt hatten. Aus diesem Pool kombinieren wir den Klon. Er setzt sich aus Werten wie dem Einkommen oder der Zahl der Autos pro Kopf zusammen.

Um den Klon zu prüfen, simulierten wir die Entwicklung in den 30 Jahren vor der Steuer und verglichen dies mit echten Messwerten. Weil es beim Klonen immer leichte Schwankungen gibt, haben wir gleich sieben Klone erstellt, um auf Nummer sicherzugehen. Wie also hat sich die Ökosteuer ausgewirkt?

Eindeutig: massiv. Der Vergleich ergab, dass im Sektor Verkehr im Zeitraum von 1999 bis 2009 im Durchschnitt rund zehn Prozent CO<sub>2</sub> pro Jahr relativ zum Klon eingespart wurden.

Warum wurde die Steuer dann als kaum wirksam bewertet? Frühere Studien des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) verglichen einfach die Emissionen in Deutschland vor Einführung der Steuer und danach. Doch die gesamte Wirtschaft hätte sich auch ohne die Steuer verändert. Die Deutschen sind reicher geworden, sie kaufen andere

Autos und fahren mehr Kilometer. Wir konnten jetzt den tatsächlichen Effekt der Steuer herausrechnen.

Und wir sehen noch mehr: Durch die Ökosteuer wurden pro Jahr 27 Prozent weniger Feinstaub und 13 Prozent weniger schädliche Stickstoffoxide emittiert. Im Gegensatz zu Klimaschäden, die vor allem in der Zukunft anfallen, hilft dies der Gesundheit direkt und reduziert weitere Kosten. Nimmt man beide Faktoren zusammen, sparte die Umweltsteuer in zehn Jahren circa 80 Milliarden Euro ein.

Für die Berechnung haben wir die Zahlen des Umweltbundesamtes verwendet. Dies ging im Jahr 2012 davon aus, dass der Ausstoß einer Tonne CO<sub>2</sub> etwa 80 Euro Folgekosten für Schäden an Umwelt und Wirtschaft verursacht. Mittlerweile geht die Behörde von mehr als 300 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> aus. Wir sparen also ganz offiziell mit jedem nicht verbrauchten Liter Benzin oder Diesel viel mehr gesellschaftliche Kosten ein als gedacht. Die Ökosteuer ist somit eindeutig kein Flop – sie hilft dem Klima und unserer Gesundheit.

---

**Prof. Moritz Drupp** ist Nachhaltigkeitsökonom und forscht am Exzellenzcluster für Klimaforschung CLICCS der Universität Hamburg zu CO<sub>2</sub>-Bepreisung.

## SO LÄSST SICH VOR WETTEREXTREMEN VERLÄSSLICH WARREN

Wasserknappheit, vertrocknete Felder, Feuergefahr – die Folgen von Dürre, Hitzewellen und anderen Wetterextremen können verheerend sein. Umso wichtiger, dass Menschen sich rechtzeitig darauf vorbereiten. Dabei gilt, je früher es zuverlässige Vorhersagen gibt, desto besser.

Für meine Doktorarbeit habe ich deshalb erforscht, wie sich solche Wetterextreme mehrere Monate im Voraus prognostizieren lassen. Ganz konkret untersuchte ich ein Zirkulationssystem im tropischen Pazifik zwischen Südamerika und Australien. Die Meeresströmungen und Luftzirkulationen sind dort meist konstant.

Doch alle zwei bis sieben Jahre verändert sich das System: Entweder es verstärkt sich in gleichbleibender Richtung oder es kehrt sich um, sodass Luft und Ozeanwasser andersherum strömen. Diese Ereignisse, La Niña und El Niño genannt, können weltweit extremes Wetter auslösen. Doch wie kann ich frühzeitig abschätzen, ob und wo dadurch beispielsweise eine Dürre eintritt?





Schon jetzt lassen sich solche Extreme etwa einen Monat im Voraus prognostizieren. Diesen Vorhersagezeitraum möchte ich aber noch verlängern. Dazu brauche ich drei Dinge: aktuelle Messdaten aus der Atmosphäre und dem Ozean, ein Klimamodell und einen leistungsstarken Computer. Speise ich die Messdaten in mein Modell ein, kann es die Witterung für mehrere Monate im Voraus berechnen – doch wie verlässlich?

Um das zu prüfen, habe ich mit dem Klimamodell zuerst das vergangene Wettergeschehen nachberechnet. Dieses ist mir durch die vielen Wettermessungen bekannt. Stimmen Mess- und Modelldaten gut überein, berechnet mein Modell die Vergangenheit realistisch – und kann somit auch verlässliche Vorhersagen für die Zukunft erstellen. Doch die Datensätze deckten sich nicht in allen Jahren gleich gut. Bei genauem Hinsehen bemerkte ich, dass sich Dürren in Nordamerika nur dann besonders gut vorhersagen lassen, wenn das Klimasystem eine markante Abweichung aufweist – sprich, wenn ein La Niña-Ereignis vorherrscht.

Konkret: Ist die Temperatur der Wasseroberfläche im Ostpazifik kälter als im Durchschnitt, sind die Monate Dezember, Januar und Februar im südlichen Nordamerika und im angrenzenden Mexiko eher trocken.

Das ist nicht neu. Neu ist jedoch, dass die Modellvorhersagen während dieser Abweichungen verlässlicher sind als

in anderen Jahren. In den Zeiten, in denen die höchste Gefahr von Dürren ausgeht, können wir unseren Vorhersagen also am meisten vertrauen.

Ich behalte die Temperatur des Pazifikwassers daher genau im Blick. Bei den ersten Anzeichen einer Abweichung speise ich die Messwerte in mein Modell ein. Bis zu vier Monate im Voraus bekomme ich mithilfe meiner Berechnungen genaue Angaben dazu, wann eine Dürre und wie groß ihre räumliche Ausdehnung zu erwarten ist. Ein echter Fortschritt, der Verwaltung und Landwirtschaft mehr Zeit gibt, die schlimmsten Folgen abzumildern.

Aktuell arbeite ich daran, meine Ergebnisse auf Europa zu übertragen. Welche Klimaabweichungen lassen Hitzewellen über Mitteleuropa entstehen? Finde ich heraus, welche klimatischen Prozesse hohe Temperaturen bedingen, kann ich heiße Sommer in Zukunft womöglich besser vorhersagen – und vor großer Hitze mehrere Monate im Voraus warnen.

---

**Dr. Patrick Pieper** ist Experte für saisonale Klimamodellierung und hat dazu am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und im Exzellenzcluster für Klimaforschung CLICCS in Hamburg geforscht.

## WENN DIE NATUR AUF NACHHALTIGKEIT KLAGT

Alle reden davon, viele versprechen es, einige versuchen es ernsthaft: Nachhaltigkeit. Ein Begriff, an dem sich Menschen weltweit orientieren, der aber häufig nur als Beschwörungsformel dient.

Denn im Kern handeln wir nur dann nachhaltig, wenn Verbrauch und Regeneration von natürlichen Ressourcen im Gleichgewicht sind. So würden wir die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht einschränken und die Ökosysteme erhalten. Blicken wir jedoch auf unseren Ressourcenverbrauch und kommende Klimaveränderungen, rückt dieses Ziel in weite Ferne.

Am Centrum für Erdsystemforschung und – eben – Nachhaltigkeit (CEN) interessiert mich besonders, wie Gesellschaften dem Klimawandel und dem Verlust der Biodiversität begegnen. Wie meine Forschung zeigt, gibt es dabei in der Praxis drei Wege, wie Nachhaltigkeit erreicht werden soll.

Da gibt es zum einen Maßnahmen, die unter den Begriff „Modernisierung“ fallen. Viele favorisieren diesen Weg. Staaten, Nicht-Regierungs-Organisationen und die Industrie

unterstützen die Vision, in der eine moderne „Grüne Wirtschaft“ ohne schädigende Nebenwirkungen einfach weiter produzieren und wachsen kann. Innovationen und CO<sub>2</sub>-Preise sollen den Klimawandel aufhalten und unsere Lebensgrundlagen erhalten. Die Bilanz ist allerdings ernüchternd: Das Artensterben schreitet voran, die Müllberge wachsen und die Erde erhitzt sich weiter.

Deshalb fordern andere einen radikalen Wechsel: Transformation. Die Wachstumslogik des Kapitalismus muss aufgebrochen werden, denn die Ressourcen der Erde sind begrenzt. Das setzt dem permanenten Wachstum in jedem Fall ein natürliches Ende. Wirtschaft radikal neu zu denken, könnte eine nachhaltigere Entwicklung ermöglichen. Unsere Analysen zeigen jedoch, dass wir hiervon sehr weit entfernt sind.

Einen eher düsteren Charakter hat der dritte Weg, der über autoritäre Politik und Kontrolle funktioniert. Denkbar ist, dass Staaten oder Firmen eigenmächtig Geoengineering-Maßnahmen durchführen, die EU-Außengrenzen könnten verstärkt werden oder Eliten sich in sicheren Zonen abschotten. Weil aktuelle Krisen sich zu einem ökologischen Notstand entwickeln können, erwarten wir tatsächlich, dass Kontrolle zukünftig stärker eingesetzt werden wird. Demokratische Prozesse könnten ausgehebelt werden und der Staat direkt eingreifen. Weltpolitisch deutet derzeit einiges darauf hin.





Echte Nachhaltigkeit lässt sich jedoch auf keinem dieser Wege noch rechtzeitig erreichen. Von Plastik- und Atommüll über die Erwärmung der Atmosphäre und der Ozeane hat die Menschheit tiefgreifende Veränderungen herbeigeführt, die nachfolgenden Generationen eine enorme Last aufbürden. Genau genommen befinden wir uns daher im Zeitalter der Post-Nachhaltigkeit. Wir sollten alles dafür tun, die Lasten nicht noch größer werden zu lassen.

Ein Lichtblick ist dabei ein Ansatz aus den Rechtswissenschaften. Er kommt aus der Modernisierung, kann aber transformativ wirken: Im Jahr 2008 hat das Land Ecuador in seiner Verfassung der Natur Rechte zugesprochen. Seitdem können Einzelpersonen oder Gruppen stellvertretend klagen, wenn die Rechte eines Ökosystems verletzt werden, weil es zum Beispiel verschmutzt oder beschädigt wird. 2017 wurde ein Fluss in Neuseeland zur juristischen Person erklärt, in Spanien ist die Lagune Mar Menor als erstes Ökosystem in Europa seit 2022 als Rechtsperson anerkannt. Hieraus resultierende Urteile könnten in Zukunft weltweit Impulse geben.

---

**Prof. Frank Adloff** ist Soziologe und Mitglied im Vorstand des Centrums für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und dem nachfolgenden Earth and Society Research Hub ESRAH der Uni Hamburg.

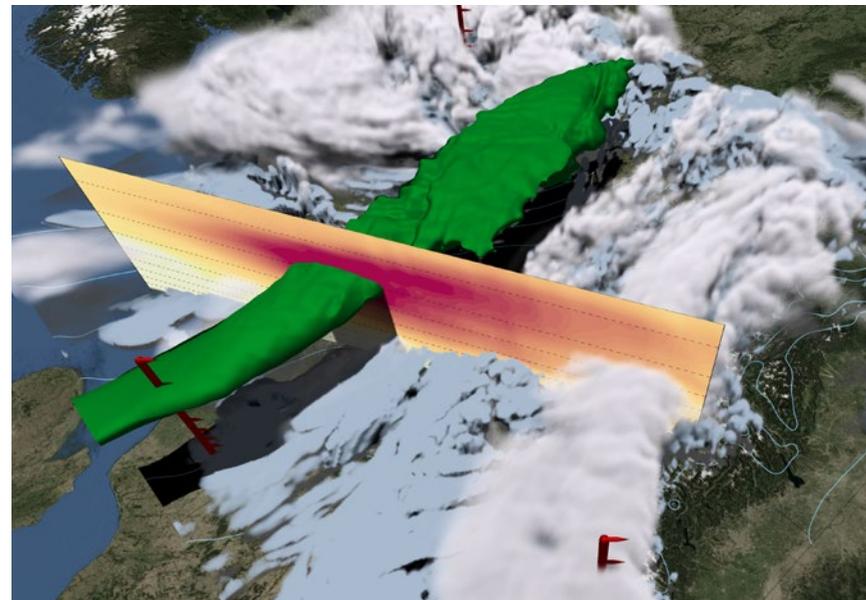
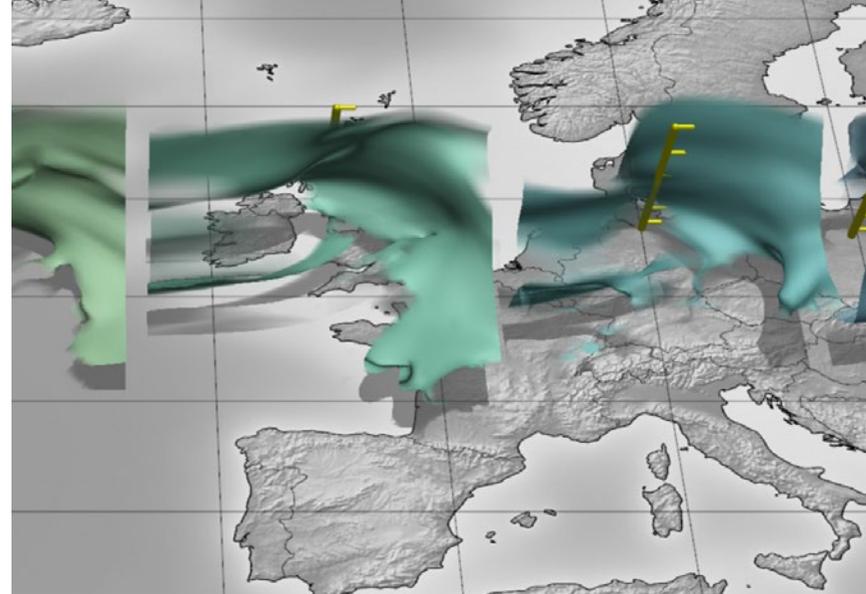
## WETTER UND KLIMA JETZT DREIDIMENSIONAL

Wie wird das Wetter morgen, wie das Klima in 20 Jahren? Das errechnen heute komplexe Computermodelle, die als Ergebnis lange Zahlenkolonnen ausspucken. Anschließend müssen die riesigen Datenmengen oft noch als Grafik oder Karte aufbereitet werden, um sie zu deuten – bisher meistens zweidimensional, in 2D.

Doch wie wäre es, wenn ich die Atmosphäre unmittelbar und in 3D untersuchen könnte? Das habe ich mich schon in meiner Zeit als Meteorologe in München oft gefragt. Dort war ich an der Planung von Forschungsflügen beteiligt.

Meine Aufgabe war es, diejenige Route zu finden, auf der bestimmte interessante Wetterphänomene mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten. Dafür mussten oft in kurzer Zeit verlässliche Prognosen für den anstehenden Flug erstellt werden: Wo tauchen die gesuchten Wolken auf? In welche Richtung werden die Rauchschwaden von Waldbränden ziehen?

Solche dreidimensionalen Prozesse musste ich dabei mühsam und zeitaufwendig aus 2D-Karten rekonstruieren. Andere Bereiche sind hier schon viel weiter. In Computer-



spielen etwa kann ich Welten durchschreiten, während sich die virtuelle Umgebung direkt an meine Bewegungen anpasst. Ließe sich dies nicht auf wissenschaftliche Daten übertragen?

Die Schnittstelle zwischen Meteorologie und Informatik hatte mich schon lange fasziniert. So begann ich mit Grafik-Hardware aus dem Spielbereich zu experimentieren, um meteorologische Daten in einer 3D-Umgebung sichtbar zu machen. Ich programmierte eine Software, mit der ich diese Daten interaktiv darstellen konnte. Am CEN, dem Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg, entwickle ich das Tool stetig weiter.

Durch die Rechenleistung der Grafikkarten wird die Darstellung schnell und flüssig, so dass ich Wetterphänomene direkt untersuchen kann. Ich kann horizontal und vertikal durch die Atmosphäre scrollen und sehe die Ereignisse darin ganz unmittelbar dreidimensional. Interessante oder neue Phänomene erkenne ich so intuitiv, ohne lange nach ihnen suchen zu müssen.

Das ist ein wichtiger Schritt für die Forschung, denn durch eine interaktive 3D-Darstellung werden auch verborgene Prozesse sichtbar. Standardmäßig werden Prognose-Daten nur in 2D-Karten untersucht. Nur von besonders interessanten Teilen der Daten werden gegebenenfalls am Ende der Analyse aufwendige 3D-Animationen erstellt. Mit unserer Soft-

ware namens Met.3D lassen sich dagegen alle Daten sofort dreidimensional erforschen.

Begrenzt wird die Anwendung dabei von der Menge der Daten, die in den Grafikspeicher passen. Deshalb arbeitete unser Team daran, die Datenmenge zu reduzieren. Das gelingt zum Beispiel, indem das Programm bestimmte Strukturen der Atmosphäre wie Kalt- oder Warmfronten automatisiert erkennt. Wollen wir etwa Kaltfronten untersuchen, scannen wir die Daten zuvor auf dieses Merkmal, filtern die Treffer heraus und müssen anschließend nur noch diese Daten in den Grafikspeicher überführen.

Derzeit plane ich, Met.3D in die Lehre mit einzubeziehen und begleitend zu erforschen, welchen Mehrwert das Programm hier bietet. Ich bin überzeugt, dass Studierende die Prozesse in der Atmosphäre viel besser verstehen, wenn sie die Zusammenhänge in 3D selbst untersuchen können.

---

**Dr. Marc Rautenhaus** erforscht als Atmosphärenforscher und Informatiker am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und am Regionalen Rechenzentrum der Universität Hamburg die wissenschaftliche Visualisierung von Daten.

## KLIMAWANDEL: KOLUMBIENS LÄNGSTER FLUSS BRAUCHT MANAGEMENT

Im Norden Kolumbiens mündet der Río Magdalena ins Karibische Meer. Von der Quelle bis zur Mündung legt der mächtige Strom mehr als 1.600 Kilometer zurück und sein Einzugsgebiet ist etwa so groß wie das des Rheins. Durch den Klimawandel werden die Trockenperioden hier länger, zugleich häufen sich Überschwemmungen.

Da Wirtschaft und Bevölkerung stark gewachsen sind, erhöht sich der Wasserverbrauch. Insbesondere die Landwirtschaft verschlingt riesige Mengen Wasser. Gleichzeitig liefert der Río Magdalena heute rund 70 Prozent der gesamten Wasserkraft-Energie des Landes.

Mich interessiert, wie die Region künftig Energiegewinnung und Bewässerung unter einen Hut bekommen kann. Um herauszufinden, wie solch ein Wassermanagement optimiert werden kann, habe ich ein mathematisches Modell erstellt und mehrere Szenarien durchgerechnet. Dazu habe ich verschiedene Prognosen zur Entwicklung von Klima und Gesellschaft miteinander verknüpft. Auch technische Berechnun-



gen sind eingeflossen: Wie voll werden die Speicher, wie viel Wasser wird verfügbar sein und wie hoch ist der Wasserverbrauch in Zukunft?

Meine Berechnungen haben ergeben, dass bereits in den kommenden 20 Jahren das Wasser in Spitzenzeiten für Landwirtschaft, private Haushalte und Industrie knapp wird. Deshalb sollte die Infrastruktur rechtzeitig mit Dämmen und Stauseen ausgebaut werden, um die Speicherkapazitäten zu verbessern und den Wasserbedarf bis zum Jahr 2100 zu decken.

Und die Wasserkraft? Meine Ergebnisse zeigen, dass Konflikte zwischen Energiegewinnung und Bewässerung vor allem im Januar auftreten, wenn es besonders trocken ist. Die Felder müssen dann intensiv bewässert werden. Eine Zwickmühle, denn gleichzeitig fehlt das Wasser für die Stromerzeugung in den Stauseen, wenn nun der Energiebedarf besonders hoch ist. Auch in meiner Heimatstadt Santa Marta gibt es in solchen Phasen oft stundenlang keinen Strom.

Was könnte die Lösung sein? Die Kapazitäten von Dämmen und Stauseen müssen bis zum Jahr 2100 deutlich gesteigert werden, um Haushalte, Landwirtschaft und Industrie ausreichend versorgen zu können. Dies erfordert hohe Investitionen, anschließend sind Betriebs- und Wartungskosten aber vergleichsweise gering.

Doch wie erzielen die Investitionen den optimalen sozialen Nutzen? Dazu habe ich beispielhaft verschiedene Varianten untersucht, wie solche Entscheidungen gefällt werden: Bei der ersten Möglichkeit passt der Entscheidungsträger das Management den Veränderungen dynamisch an. Ein zweiter, eher kurzsichtiger Entscheidungsträger investiert hingegen in der Annahme, dass das aktuelle Niveau von Wasserangebot und -nachfrage auch künftig bestehen bleibt. Ein weiterer geht davon aus, dass das Angebot konstant bleibt, die Nachfrage sich aber in Zukunft ähnlich wie im vergangenen Jahrzehnt verändert.

Fazit: Geschicktes Management ist entscheidend. Hier können meine Modellrechnungen den lokalen Behörden helfen, vorausschauend zu planen und optimal zu investieren, um die Wasserversorgung für kommende Generationen zu sichern. Dadurch ließe sich der volkswirtschaftliche Nutzen bis zum Jahr 2100 sogar um 120 Milliarden US-Dollar erhöhen. Beim Bau von Staudämmen dürfen Menschenrechte nicht verletzt und die folgenreichen Eingriffe in die Umwelt müssen sorgfältig mit dem ökonomischen Nutzen abgewogen werden.

---

**Dr. Martha Bolivar** ist Wasserbauingenieurin aus Kolumbien und war Mitglied des Centrums für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit.

## **Bildnachweis**

© picture alliance/dpa | Ulrich Perrey (Titel), © picture alliance / dpa | Christian Charisius (Titel innen), © Dr. Alexander Schütt / UHH (S. 5), © Thomas Wasilewski (S. 7, o.), © picture alliance/dpa | Soeren Stache (S. 7, u.), © picture alliance/dpa | Arne Dedert (S. 8), © picture alliance/dpa | Christian Charisius (S. 10), © picture-alliance / dpa | Patrick Lux (S. 12), © picture alliance / dpa | Peter Kneffel (S. 13, o.), © picture alliance / ABBfoto (S. 13, u.), © picture alliance / photothek | Thomas Imo (S. 15, o.), © picture alliance / Westend61 | Ekaterina Yakunina (S. 15, u.), © picture alliance / ASSOCIATED PRESS | FABIAN BIMMER (S. 16), © picture alliance / CHROMORANGE | www.viennaslide.com (S. 19), © picture alliance/dpa/MAXPPP | Fabien Cottureau (S. 20/21), © picture alliance / Daniel Bockwoldt/dpa | Daniel Bockwoldt (S. 23, o.), © picture alliance/dpa | Daniel Bockwoldt (S. 23, u.), © picture alliance/dpa | Bodo Marks (S. 24, o.), picture-alliance / dpa/dpaweb / Carsten Rehder (S. 24, u.), © picture alliance / Zoonar | RealityImages (S. 27), © umesh negi / iStock (S. 28), © picture alliance / robertharding | Annie Owen (S. 29, o.), © picture alliance / ASSOCIATED PRESS | Mukhtar Khan (S. 29, u.), © picture alliance / NurPhoto | Nicolas Economou (S. 33), © picture alliance / NurPhoto | Savvas Karmaniolas (S. 34, o.), © picture alliance / Westend61 | Michael Runkel (S. 34, u.), © Dr. Jonas Preine / UHH (S. 37), © picture alliance / imageBROKER | Lilly (S. 39), © picture alliance / Weingartner-Foto / picturedesk.com (S. 43, o.), © picture alliance / ZUMAPRESS.com | Boniface Muthoni (S. 43, u.), © picture alliance / ASSOCIATED PRESS | Eugene Garcia (S. 44), © picture alliance / imageBROKER | Jochen Tack (S. 49), © picture alliance / imageBROKER | Unai Huizi (S. 50, o.), © picture alliance / ASSOCIATED PRESS | Brett Phibbs (S. 50, u.), © Dr. Andreas Beckert / Met.3D / UHH/ Creative Commons Attribution 4.0 License / Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (S. 53, o.), © Marc Rautenhaus / Met.3D / UHH / Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (S. 53, u.), © picture alliance / Zoonar | Matthias Gille (S. 57, o.), © picture alliance / AA | Juan David Moreno Gallego (S. 57, u.)

## **Herausgeber**

Earth and Society Research Hub (ESRAH), Universität Hamburg  
[www.esrah.uni-hamburg.de](http://www.esrah.uni-hamburg.de)

## **Redaktion**

Miriam Frieß, Stephanie Janssen, Ute Kreis, Thomas Merten,  
Franziska Neigenfind  
Earth and Society Research Hub (ESRAH)

## **Gestaltung**

HAAGEN design, Hamburg

## **Auflage:** 500

**Druck:** Reset St. Pauli, lokal, 100% klimaneutral

Hamburg, 2025

Mit freundlicher Unterstützung des Hamburger Abendblatts

---

## **ESRAH**

Der Earth and Society Research Hub (ESRAH) ist ein 2024 gegründetes interdisziplinäres Forschungszentrum der Universität Hamburg: Um das Zusammenspiel von Klima, Erde, Umwelt und Gesellschaft zu untersuchen, haben sich das Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) und das Center for Sustainable Society Research (CSS) zusammengeschlossen. Beide Institutionen gehen in ESRAH auf.

Dort arbeiten Forschende aus den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften eng zusammen. Gleichzeitig ist ESRAH das Zuhause des Exzellenzclusters „Climate, Climatic Change, and Society“ (CLICCS).

**[www.esrah.uni-hamburg.de](http://www.esrah.uni-hamburg.de)**

**[www.cliccs.uni-hamburg.de](http://www.cliccs.uni-hamburg.de)**

**<https://uhh.de/cen-esrah-linkedin>**