



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG



DÜNGT DER KLIMAWANDEL DIE SAHARA?

ZEHN KLIMAFORSCHER BERICHTEN

A photograph of a desert landscape. In the foreground, a calm body of water reflects the sky and the dunes. The middle ground is dominated by large, golden sand dunes that curve across the frame. Scattered across the base of the dunes are several tall palm trees and clusters of green, scrubby vegetation. The sky is a clear, bright blue with some wispy white clouds. The overall scene is peaceful and scenic, contrasting the arid environment with the presence of water and lush plants.

DÜNGT DER KLIMAWANDEL DIE SAHARA?

ZEHN KLIMAFORSCHER BERICHTEN

Ein Lesebuch der Hamburger Erdsystemforschung

INHALT

4	KLIMAVERHALTEN
10	HOCHWASSERALARM
14	GRÜNE WÜSTEN
22	ARKTISEIS
28	TIEFE WELLEN
32	SYRIEN
36	PERLFLUSS-DELTA
42	UNTERNEHMENSWERT
48	EXTREMWETTER
54	DETEKTIVARBEIT

NEUE KLIMAGESCHICHTEN AUS HAMBURG

Macht der Klimawandel die Sahara zum grünen Paradies? Was zunächst paradox klingt – viele denken beim Klimawandel zunächst an Dürre und Extremwetter – könnte durch die Zunahme von Kohlendioxid Wirklichkeit werden. Diese und andere Klimaentwicklungen untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN). Denn der Klimawandel hat viele Gesichter und wirkt sich weltweit auf sehr unterschiedliche Weise aus – manchmal auch ganz anders als erwartet. Dieses Lesebuch gibt einen Einblick in die Arbeit am CEN. Erfahren Sie zum Beispiel, warum Schnee von gestern entscheidende Auswirkungen auf die Arktis hat und welche Rolle der Klimawandel im Syrienkonflikt spielt.

Einmal im Monat schildern unsere Forscher in Gastbeiträgen im Hamburger Abendblatt ihre Arbeiten. Zehn dieser Beiträge haben wir auf den folgenden Seiten für Sie zusammengefasst.

Viel Spaß beim Schmökern!

ELTERN, MEDIEN ODER AL GORE: WER PRÄGT UNSER KLIMA-BILD?

Der fünfte Weltklimabericht hat die Aufmerksamkeit der Medien wieder mehr auf den Klimawandel gelenkt. Nahezu alle Zeitungen, viele Magazine, TV- und Radiosender berichteten. Auch im Internet wurde das Thema diskutiert. Doch welche Rolle spielen die Medien für die persönliche Einstellung der Menschen zum Klimawandel und ihr Verhalten?

Um dies herauszufinden, führten wir in unserem Projekt am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP der Universität Hamburg mehr als 40 ausführliche Interviews mit Hamburger Bürgerinnen und Bürgern. Unsere Gesprächspartner wählten wir so, dass die Bandbreite unterschiedlicher Einstellungen zum Klimawandel erfasst wurde. Wichtig war auch, dass die Gruppe einen Querschnitt der Hamburger Bevölkerung abbildet: junge und ältere Menschen, Frauen und Männer mit unterschiedlichem Vorwissen und aus verschiedenen Stadtteilen.

Die Interviews zeigen, dass unterschiedliche Erfahrungen Wissen und Einstellung zum Klimawandel prägen. Die meisten Befragten sehen die Medien dabei als wichtigste



Informationsquelle, um Wissen über den Klimawandel zu erlangen. Für das eigene Verhalten und das Problembewusstsein spielen die Medien nach unseren Ergebnissen jedoch eine untergeordnete Rolle. Einen viel größeren Einfluss hat die zwischenmenschliche Kommunikation – vor allem Gespräche mit Eltern, Freunden oder in der Schule. Darüber hinaus wirken persönliche Erlebnisse darauf, ob die Menschen den Klimawandel als Problem wahrnehmen. Häufig nannten sie hier Extremereignisse wie Hochwasser oder Hitzewellen.

Bei unseren Interviews zeigten sich deutliche Muster: So konnten wir verschiedene Typen identifizieren, die sich bei Mediennutzung und Kommunikation charakteristisch verhalten. Am häufigsten kommt ein Typ vor, der ein buntes Spektrum an Medien und Formaten nutzt, um sich über den Klimawandel zu informieren und sich darüber auch mit Freunden und Familie austauscht. Er ist überzeugt, dass der Mensch den Klimawandel verursacht hat. Aus diesem Grund verhält er sich auch klimabewusst.

Drei weitere Typen teilen diese Einstellung und verhalten sich ebenfalls klimabewusst: Dies sind erstens Menschen, die intensiv Fachliteratur und Wissenschaftssendungen verfolgen, im Internet recherchieren und sich viel über das Thema austauschen. Eine zweite Gruppe informiert sich hauptsächlich über Social Media-Plattformen wie Facebook und kom-

muniziert dort auch. Der dritte Typ umfasst Menschen, bei denen eine Umweltkatastrophe oder ein einzelner Film das Problembewusstsein geschärft und sie aktiviert hat, sich klimabewusst zu verhalten. Besonders häufig nannten sie den Kinofilm “Eine unbequeme Wahrheit“ von Al Gore.

Die übrigen Typen haben gemeinsam, dass sie am menschengemachten Klimawandel zweifeln und sich deshalb nicht klimafreundlich verhalten. Zum einen sind dies Menschen, die traditionelle Medien nutzen. Sie interessieren sich nicht für das Thema und recherchieren auch nicht selbst dazu. Dies sind häufig ältere Menschen, die das Internet kaum nutzen. Zum anderen finden sich in dieser Gruppe Personen, die den Massenmedien gegenüber skeptisch sind. Sie misstrauen Berichten aus Zeitung, Radio oder TV und suchen daher alternative Informationen in Internetforen und Blogs. Wie häufig die ermittelten Typen jeweils in der Bevölkerung vertreten sind, untersuchen wir derzeit in einer repräsentativen Umfrage mit über 1.000 Personen.

Ines Schaudel forscht am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP der Universität Hamburg zur Wahrnehmung und Kommunikation des Klimawandels.



MODELLE HELFEN BEI HOCHWASSER-EVAKUIERUNGEN

Hochwasseralarm! Bei Sturmflutwarnung müssen Küstenbewohner in gefährdeten Gebieten womöglich evakuiert werden. Doch wer sollte sein Haus verlassen, wer kann bleiben? Die Folgen einer Fehleinschätzung wären unter Umständen schwerwiegend.

Mein neues Rechenmodell könnte bald dazu beitragen, Überflutungsgebiete exakter vorherzusagen. Das könnte besonders für die Zukunft wichtig sein, denn durch den Anstieg des Meeresspiegels ist es möglich, dass Sturmfluten häufiger höher auflaufen.

Eine Evakuierung ist eine radikale Maßnahme. Dennoch steht außer Frage, dass die Sicherheit der Menschen an erster Stelle stehen muss und somit kein zu kleines Gebiet evakuiert werden sollte. Gleichzeitig entstehen hohe Kosten, die umso höher sind, je größer das Evakuierungsgebiet ist. Fällt eine angekündigte Flut dann doch harmloser aus, könnten „unnötig“ weiträumige Evakuierungen außerdem zu Frust bei den Betroffenen führen. Wiederholt sich dies, schwindet womöglich das Vertrauen in Hochwasserwarnungen generell.



Besonders wichtig ist es also, das tatsächliche Überflutungsgebiet möglichst exakt vorherzusagen.

Am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg entwickle ich zusammen mit meinen Kolleginnen und Kollegen mathematische Modelle, mit denen wir solche Extrem-Szenarien simulieren und in Computerprogramme umsetzen können. Eine Grundlage für unsere Modelle sind die sogenannten Flachwassergleichungen. Diese mathematische Formel beschreibt die Bewegungen des Wassers physikalisch unter vereinfachten Bedingungen. Doch für die wechselhaften Vorgänge an den Küsten ist dies noch zu ungenau. So muss ich zusätzlich die Wellenlänge der ankommenden Wasserwelle beachten. Ist die Welle kurz, breitet sie sich langsamer aus. Eine lange Welle breitet sich hingegen schneller aus. Um genauer simulieren zu können, wann die Wasserwellen mit welcher Höhe an der Küste eintreffen, möchte ich diesen Aspekt in die Berechnung mit einbeziehen.

Zur Verfügung stehen mir zwei unterschiedliche Gleichungen, die diesen Einfluss der Wellenlänge beschreiben: Die so genannte Boussinesq-Gleichung und außerdem eine neuere Korrekturgleichung. Beide haben Vor- und Nachteile. Welche ist für mein Rechenmodell besser geeignet? Mit der Boussinesq-Gleichung bin ich auf der sicheren Seite. Die Gleichung wurde 1872 entwickelt, ist seither oft verwendet

worden und beschreibt die physikalischen Abläufe gut. Allerdings ist der Einfluss der Wellenlänge hier so kompliziert dargestellt, dass sie sich nicht flexibel in mein Modell einbauen lässt.

Die Korrekturgleichung hingegen behandelt die Wellenlänge so, dass mein Rechenmodell damit ohne größere Umstände erweitert werden kann. Andererseits ist diese Gleichung relativ jung, damit weniger etabliert – und dazu noch unpräzise in der physikalischen Darstellung.

Um diese Ungenauigkeit zu beheben, habe ich die Korrekturgleichung so verändert, dass sie die Abläufe physikalisch besser beschreibt. Ein erster Vergleich für einen einfachen Fall zeigt Erstaunliches: Die von mir verbesserte Korrekturgleichung liefert dieselben exakten Ergebnisse wie die Boussinesq-Gleichung. So steht uns in Zukunft mit Hilfe der Mathematik ein flexibles Werkzeug zur Verfügung, dass an Küsten genauere Vorhersagen erwarten lässt.

Anja Jeschke forscht am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg an Gleichungen für Flachwasserwellen.





DÜNGT DER KLIMAWANDEL DIE SAHARA?

Vor einigen tausend Jahren herrschte ein anderes Klima auf der Erde. Manche Regionen waren wärmer und feuchter – und die Sahara war wesentlich grüner. Ein üppiges Dach aus Pflanzen saugte Wasser aus dem Boden, „schwitzte“ es aus, was wiederum für regelmäßigen Monsunregen sorgte.

Im Laufe der Jahrtausende änderte sich jedoch die Erdbahn und damit der Einfluss der Sonne auf das Klima. Das wirkte sich auch auf die Sahara aus: Der Monsun zog sich zurück und die Vegetation verschwand. Heute erwärmt sich die Erde wieder. Grund ist der vom Menschen verstärkte Treibhauseffekt, weil durch die Nutzung fossiler Energien immer mehr CO_2 in die Atmosphäre gelangt. Mehr CO_2 erwärmt die Erde – sogar deutlich stärker als vor einigen tausend Jahren. Die Frage ist: Kehrt mit dem wärmeren Klima die Vegetation in die Sahara zurück?

Am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP an der Universität Hamburg bin ich mit meinen Kolleginnen und Kollegen dieser Frage mit drei verschiedenen Klimamodellen





nachgegangen. In den Berechnungen wird es bis zum Ende des 21. Jahrhunderts tatsächlich deutlich grüner im zentralen und westlichen Sahel sowie am Südrand der Sahara. Dennoch stimmt die Gleichung „warmes Klima gleich grüne Wüste“ nicht wirklich. Grund für die vermehrte Vegetation ist nämlich nicht nur die Wärme. In zwei von unseren drei Modellen liegt dies maßgeblich am höheren CO₂-Gehalt der Luft.

Pflanzen benötigen Kohlendioxid: Sie „atmen“ es ein und wandeln es mit Hilfe von Sonnenlicht und Wasser in Baustoff für ihre Zellen um. Theoretisch fördert mehr CO₂ also die Vegetation. Unsere Berechnungen zeigen jedoch, dass große Teile der Sahelzone mit dem Klimawandel auch trockener werden. Darunter leiden die Pflanzen, da sie Wasser brauchen, um das CO₂ zu verwerten. Wir sehen also zwei gegensätzliche Effekte: Zusätzliches CO₂ „düngt“ die Pflanzen, höhere Temperaturen trocknen sie aus.

Um diese Wechselwirkung genauer zu betrachten, haben wir beides noch einmal getrennt berechnet. Leider sind die Ergebnisse nicht einheitlich. In manchen Modellen ist das CO₂ der bestimmende Faktor für das vermehrte Wachstum in den Wüstenrandgebieten. In anderen Modellen ergrünen nur Regionen, in denen Niederschlag und Temperatur von Anfang an stimmen. Dazu muss man wissen, dass Kohlendioxid über winzige Spaltöffnungen in die Blätter der Pflanze gelangt. Ist

die Pflanze gut mit Wasser versorgt, sind diese offen und es kann viel CO₂ aufgenommen werden. Gleichzeitig tritt Wasser nach außen und verdunstet, was wiederum die Umgebung kühlt. Umgekehrt braucht die Pflanze bei CO₂-reicher Luft ihre Spaltöffnungen nur wenig zu öffnen. Ein hoher CO₂-Gehalt führt also zu weniger Verdunstung. Der Effekt: Die bodennahe Luft erwärmt sich. Hinzu kommt, dass Vegetation dunkler ist und mehr Sonnenlicht absorbiert als heller Wüstensand. Dies trägt zu einer weiteren Erwärmung bei – schlecht für die Pflanzen, die unter der Hitze leiden.

Auch wenn die verschiedenen Modelle dieses komplexe Wechselspiel unterschiedlich darstellen, kann man sagen: Zwar kann durch die „CO₂-Düngung“ in Zukunft durchaus ein Grüngürtel in der Sahara entstehen. Doch dies ist wahrscheinlich nur von kurzer Dauer. Irgendwann gewinnen Hitze und Wassermangel die Oberhand und die Vegetation geht wieder zurück.

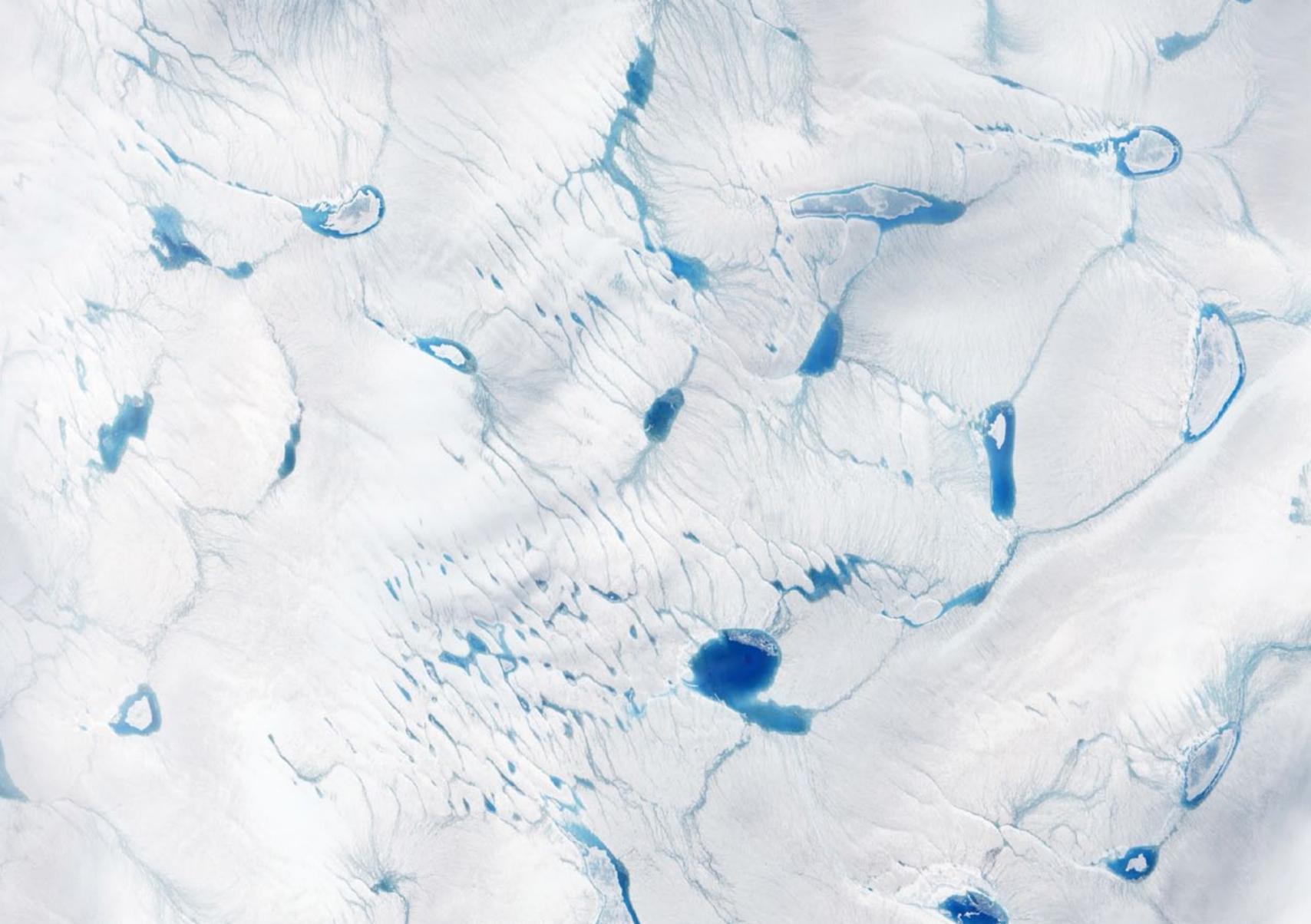
Prof. Martin Claußen ist Meteorologe an der Universität Hamburg und Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie.

BEIM VERMESSEN DES ARKTIS-EISES STÖRT SCHNEE VON GESTERN

Rund um die Uhr vermessen Satelliten im All die Erde und liefern ganze Ladungen an Datenmaterial. Hinter den Zahlenkolonnen verbergen sich viele Informationen. Doch zuerst müssen wir Klimaforscher sie entschlüsseln und damit den Wissensschatz sichtbar machen.

Manchmal stoßen wir dabei ganz unverhofft auf eine „Goldader“. Wie jetzt, bei meiner Entdeckung zum Arktiseis. Die Entwicklung der Eisbedeckung im Arktischen Meer ist ein wichtiger Hinweis auf Klimaänderungen. Seit Jahren schrumpft die eisbedeckte Fläche tendenziell. Manche Wissenschaftler befürchten, die Entwicklung sei kaum noch umkehrbar – mit weitreichenden Folgen für das Klimasystem. Deshalb wird diese Fläche seit mehr als 35 Jahren per Satellit beobachtet. Doch wie dick ist das Eis eigentlich? Denn mehr noch als die bloße Fläche liefert ja gerade die Eisdicke das tatsächliche Volumen der Eismasse und damit ein wichtiges Indiz für seine Lebensdauer.





Seit Ende 2010 können wir am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg mit dem Forschungssatelliten SMOS die Eisdicke bis zu einen Meter tief bestimmen, ein großer Fortschritt. Der Satellit registriert dabei die natürliche Strahlung, die von allen Körpern ausgeht – also auch vom Ozean und dem darüber liegenden Meereis. Die Strahlung wird auf ihrem langen Weg ins All mehrfach abgelenkt und reflektiert. Hierbei wird jeweils nur ein Teil der Energie durchgelassen, so dass am Satelliten ein verändertes Signal eintrifft. Am stärksten passiert dies an den Grenzübergängen: zum Beispiel beim Wechsel von Ozean zu Eis oder Eis zu Luft. Zunächst beschreiben wir die physikalischen Abläufe an den einzelnen Grenzen mit Hilfe von Rechenmodellen. Anschließend können wir aus den Daten dann den Abstand dieser Grenzen zueinander ermitteln – zum Beispiel die Dicke einer Eisschicht.

Ergänzt wird SMOS in Sachen Eisdicke von CryoSat-2, einem weiteren Satelliten. Während SMOS mit seiner „Sichttiefe“ bis zu einem Meter die dünneren Randgebiete des Meereises erfassen kann, ist CryoSat der Profi für das dickere Eis. Anders als SMOS misst CryoSat nämlich per Radar, wie hoch das Eis aus dem Wasser ragt. Da wir wissen, dass 10 Prozent des Meereises über und 90 Prozent unter Wasser schwimmen, lässt sich daraus die Gesamtdicke errechnen.

Das funktioniert allerdings nur, wenn die aktuelle Schneeeauflage beachtet wird. Deren Gewicht kann den Eiskörper so nach unten drücken, dass das 90-zu-10-Prozent-Verhältnis nicht mehr stimmt. Doch woher bekommen wir diesen Schneewert? Bislang konnten Forscher ihn mithilfe von veralteten Karten nur grob abschätzen.

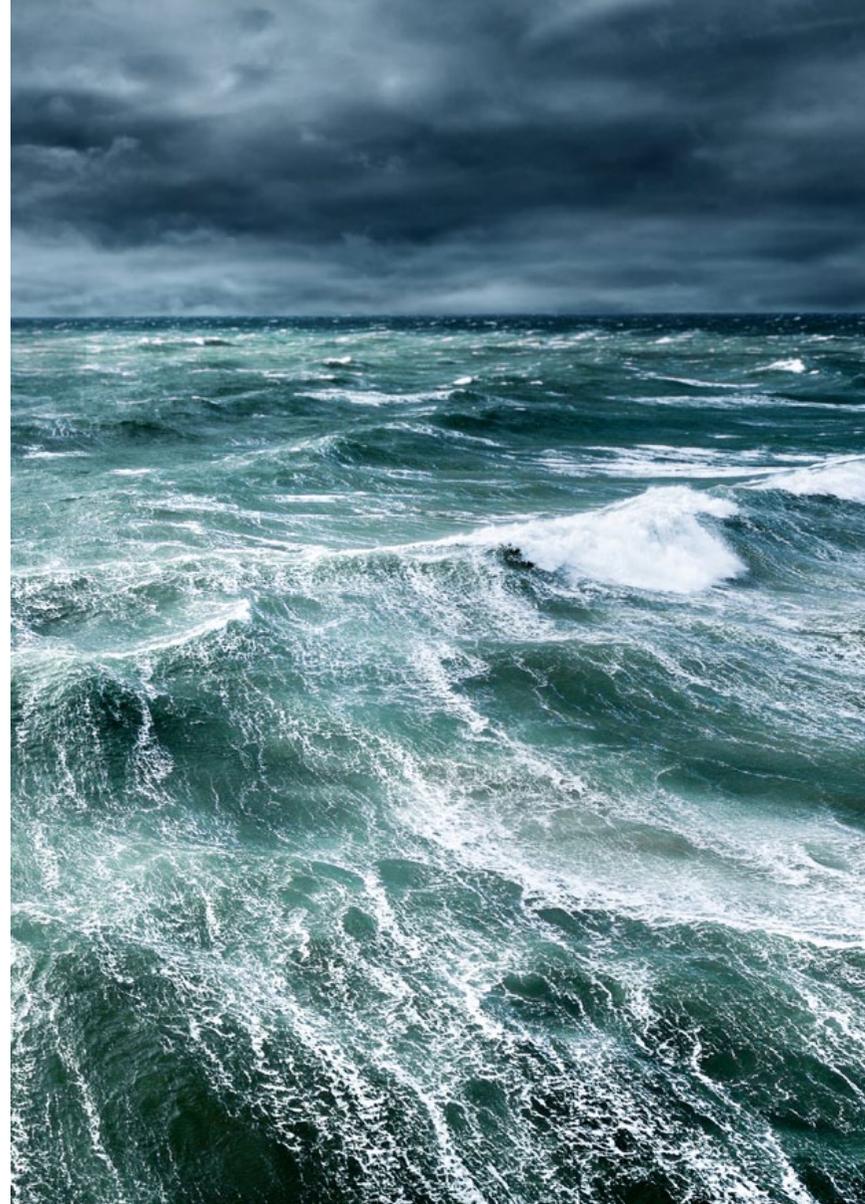
Eine unverhoffte Lösung fand ich in den SMOS-Daten, als ich in unser Rechenmodell zusätzlich eine Formel für die Schneeschicht einbaute. Gerade dort, wo SMOS das Eis nicht mehr messen kann – nämlich über dickem Eis – liefert er jetzt Werte zur Schneedicke. Expeditionen mit Messflugzeugen über der Arktis haben diese Werte bisher bestätigt, ein toller Erfolg. Erstmals werde ich nun flächendeckend aktuelle Schneekarten erstellen können. Die nächste Aufgabe ist es nun zu untersuchen, ob diese Karten tatsächlich für die CryoSat-Berechnungen verwendet werden können, um die Entwicklung des Eisvolumens in der Arktis noch besser zu beobachten und zu verstehen.

Dr. Nina Maaß erforscht am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg, wie sich mit Satelliten das Arktiseis vermessen lässt.

„TIEFE WELLEN“ IM OZEAN BESTIMMEN MEERESSTRÖMUNGEN UND KLIMA MIT

Wer an einem warmen Sommerabend auf das glatte Meer blickt, kann sich oft nur schwer vorstellen, dass unsere Ozeane eigentlich nie zur Ruhe kommen. Drei Dinge halten sie in Bewegung: Der Wind, der das Wasser an der Oberfläche vor sich hertreibt. Unterschiedliche Temperaturen und Salzgehalte im Meer, durch die kalte, schwere Wassermassen in die Tiefe sinken und warmes Wasser nachströmt. Und schließlich die Gezeiten, die entstehen, weil die Erdrotation und die Massenanziehung von Mond und Sonne die Weltmeere in Bewegung halten.

Alle drei Bewegungsmuster beeinflussen unser Klima, denn Meeresströmungen sind wichtige „Transportbänder“ für Energie und Wärme. So bringt beispielsweise der Golfstrom Wärme aus dem Golf von Mexiko bis ins europäische Nordmeer und sorgt bei uns für milde Temperaturen. Anders als der Wind, der nur die oberen Schichten durchmischt, und das



Absinken kalter Wassermassen, das nur in bestimmten Regionen stattfindet, erfasst die Gezeitenbewegung den gesamten Ozean und reicht bis auf den Grund – in Tiefen bis zu mehreren Tausend Metern.

Der Meeresboden ist es, der diese Bewegung für Klimamodelle schwer berechenbar macht. So sind die Ozeane nicht nur unterschiedlich tief, sondern auch von zahlreichen Gräben, Rücken und Abhängen durchzogen. Jedes Mal, wenn die Gezeitenwelle hier auf ein Hindernis stößt oder sich auch nur am Boden reibt, wird sie gebremst, geteilt, umgelenkt und manchmal auch beschleunigt – etwa wenn das Wasser durch eine enge Schlucht am Boden strömen muss.

Reichweite und Energie dieser „tiefen Wellen“ und ihre Wechselwirkung mit dem Meeresboden sind für die Klimaforschung wichtige Größen. Sie beeinflussen Strömungen und Wärmetransport im Ozean wesentlich mit – und damit das Klima. Gleichzeitig wirken sie mit dem Anstieg des Meeresspiegels zusammen. Schon das erste in Hamburg in den 50er Jahren entwickelte Rechenmodell war ein Gezeitenmodell für die Nordsee. Dennoch dauerte es bis in die 2000er Jahre, bis internationale Forschergruppen Rechenmodelle entwickeln konnten, die diese Prozesse weltweit abbilden.

Am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg haben wir solche weltweiten

Gezeitenmodelle jetzt erstmals systematisch verglichen und bewertet. Ergebnis sind globale Karten, die zeigen, wo und wie sich verschiedene Gezeitenmuster überlagern, wo der Input an Energie besonders hoch oder niedrig ist. Im zweiten Schritt haben wir mit unserem Modell HAMTIDE die so genannte Energiedissipation berechnet. Die Ergebnisse zeigen, wie sich die Gezeiten-Energie im Ozean verteilt, welche Wege sie nimmt und ob klimarelevante Meeresströmungen eher verstärkt oder gemindert würden.

Seit den 70er Jahren hat sich viel getan: Wir verfügen heute, bis auf wenige Ausnahmen, über umfassende Daten, was die Topografie des Meeresbodens anbelangt, und außerdem über detaillierte Gezeitenbeobachtungen an der Oberfläche. Gleichzeitig sind unsere Modelle heute ausreichend leistungsfähig, um beides zusammenzuführen und die komplexe Energieverteilung und -bewegung im Ozean immer besser abzubilden. Gelingt es uns, diese Erkenntnisse in die globalen Klimaberechnungen einzubeziehen, ist dies ein großer Schritt vorwärts.

Prof. Detlef Stammer ist Ozeanograph und Direktor des Centrums für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.

DÜRRE VERTRIEB 1,5 MILLIONEN KLEINBAUERN IN SYRIEN

Der Nordosten Syriens gehörte zu den landwirtschaftlich ertragreichsten Regionen des Nahen Ostens. Von 2006 bis 2010 herrschte dort jedoch eine der verheerendsten Dürren seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Missernten und steigende Nahrungsmittelpreise waren die Folge.

Die traditionell und kleinbäuerlich geprägte Bevölkerung war diesen Problemen nicht gewachsen. Von der autokratischen Regierung waren für solch katastrophale Zustände kaum Vorkehrungen getroffen worden. Wissenschaftlich gesehen sprechen wir in einer solchen Situation von fehlender Resilienz – in diesem Fall der fehlenden Fähigkeit, sich an klimatische und wirtschaftliche Veränderungen anzupassen. Infolge der Dürre verloren 1,5 Millionen Bauern und Viehzüchter ihren Lebensunterhalt und zogen in weniger betroffene Gebiete des Landes. Im Süden Syriens ließen sich viele der geflohenen Familien vorerst nieder. Dort wurden im März 2011 auch erste Stimmen gegen das Regime al-Assads laut. Die Proteste wuchsen zu einem Bürgerkrieg, der bis heute andauert. Viele



der Migranten aus dem Norden flohen daraufhin weiter Richtung Jordanien, Türkei und Libanon – dieses Mal als Kriegsflüchtlinge.

Als Friedensforscherin am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg interessiert mich, welche Faktoren die Migration in Syrien gesteuert haben und ob und inwieweit die Umweltflüchtlinge an den Protesten beteiligt waren. Die Ergebnisse könnten Aufschluss darüber geben, wie Klimaänderungen und deren Folgen generell als treibende Kraft in Konflikten zu bewerten sind. 2014 war ich deshalb vier Wochen in jordanischen Flüchtlingslagern unterwegs und habe 30 syrische Familien mit bis zu 35 Mitgliedern interviewt. Unter anderem habe ich gefragt, ob sich in den Dürrejahre die Wasserversorgung und Ernteerträge verändert haben und inwieweit das die Entscheidung zur Flucht beeinflusst hat. Ich habe auch gefragt, ob die Umweltflüchtlinge direkt an den Protesten beteiligt waren. Demnach haben sich die Geflohenen wegen Ihrer schwierigen Gesamtsituation und aus Angst zwar nicht selber an den Protesten beteiligt; die Dürre und die fehlende politische Unterstützung der Landbevölkerung haben die Proteste jedoch angeheizt.

Viele der Geflohenen planen, nach Beendigung der Unruhen in ihre syrische Heimat und in die Landwirtschaft zurückzukehren. Doch der Weltklimarat warnt vor den Klima-

änderungen im Nahen Osten. Dürrephasen gehören zwar seit jeher zum dortigen Klima, Beobachtungen zeigen aber: In den letzten 20 Jahren waren die Winter sehr viel trockener als in den 80 Jahren davor. Bis Ende des Jahrhunderts erwarten Forscherinnen und Forscher im Norden Syriens einen weiteren Rückgang der durchschnittlichen Niederschläge um 20 Prozent und einen Anstieg der mittleren Temperatur um vier Grad Celsius. Um den syrischen Bauernfamilien eine Rückkehr zu ermöglichen, sind neue Strukturen nötig. Das Wasser effektiver zu nutzen und alternative Einkommensmöglichkeiten zur Landwirtschaft auszuloten, würde die Klimaanpassung erleichtern. Fest steht: Wer auch immer Syrien nach dem Krieg regieren wird, wird sich den Folgen des Klimawandels stellen müssen.

Dr. Christiane Fröhlich forscht am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg zu Klimawandel, Migration und Konflikten.



ÜBERSCHWEMMUNGEN BEDROHEN SÜDCHINAS PERLFLUSS-DELTA

Im südchinesischen Delta des Perflusses wachsen zurzeit elf Städte zu einer Megacity zusammen. Die Gegend war einmal ländlich geprägt, verwandelte sich aber durch Investitionen aus Hongkong und Taiwan binnen drei Jahrzehnten in eine boomende Fabrik für Exportgüter.

Auf einer Fläche nur knapp so groß wie Niedersachsen leben so viele Menschen wie in ganz Großbritannien. Schon heute verlangt das sommerfeuchte Monsunklima den Bewohnern einiges ab. Im Vergleich zu Hamburg fällt mehr als doppelt so viel Niederschlag, der sich auf die sechs Monsun-Monate konzentriert. Regelmäßige Überflutungen gewinnen durch betonierte Flächen und kanalisierte Flussbetten noch zusätzlich an Zerstörungskraft. Hinzu kommen immer wieder Taifune, die meterhoch Meerwasser ins Land drücken.

Wird der Klimawandel diese Gefahren verschärfen? Was sind mögliche Anpassungsstrategien? Dies habe ich am Exzellenzcluster für Klimaforschung CiSAP an der Universität Hamburg erforscht. Mithilfe von historischen Messdaten



aus dem Delta und eines Rechenmodells des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie ermittelte ich Zukunftsszenarios für Temperatur, Niederschlag, Meeresspiegel und tropische Wirbelstürme. Demnach wird es im 21. Jahrhundert durchschnittlich bis zu drei Grad wärmer im Delta. Der Niederschlag wird extremer, also zeitweise ungewöhnlich schwach oder stark. Der Meeresspiegel könnte gegenüber 2005 bei ungebremsten Treibhausgasemissionen um bis zu einen Meter steigen.

Das bedeutet: Das Delta wird mehr und heftigere Überflutungen durch den Fluss erleben, aber auch durch die Gezeiten des Südchinesischen Meeres. Denn fast acht Prozent der Fläche liegen höchstens drei Meter über dem Meeresspiegel. Und genau dort – im Flachland – haben sich Industrie und Städte angesiedelt. Extrem exponiert sind auch die neuen Küstenzonen, die durch künstliche Landgewinnung entstehen.

Flut ist jedoch nicht gleich Flut. Je nach Lage und Struktur sind Städte unterschiedlich stark verwundbar. Anhand statistischer Daten schätzte ich zunächst die Flut-Wahrscheinlichkeit ein, die beispielsweise von der Lage über dem Meeresspiegel abhängt. Um die Flut-Empfindlichkeit einer Stadt einzustufen, analysierte ich unter anderem Daten zur Bevölkerungsstruktur. So gelten Jugendliche, Ältere und Arbeitslose als besonders gefährdet. Drittens betrachtete ich die Fähigkeit

einer Stadt, sich an das Flut-Risiko anzupassen. Diese ergibt sich auch aus sozialen Standards wie dem pro-Kopf-Einkommen. Besonders interessant ist das Beispiel Hongkong. Die Halbinsel ist stark gefährdet – als Wirtschafts- und Finanzmetropole besitzt sie jedoch die Mittel, steigende Risiken durch Schutzmaßnahmen zu kompensieren.

Wie muss der Flutschutz im Delta angepasst werden? Neben traditionellen Lösungen wie dem Deichbau benötigt die Region vor allem „sanfte Maßnahmen“, die ein Bewusstsein für die Gefahr herstellen: eine gemeinsam entwickelte Klimastrategie, zuverlässigere Wettervorhersagen, offizielle Handlungsempfehlungen bei Flutgefahr. Nicht zuletzt könnten auch soziale Medien Flutinformationen in Echtzeit liefern.

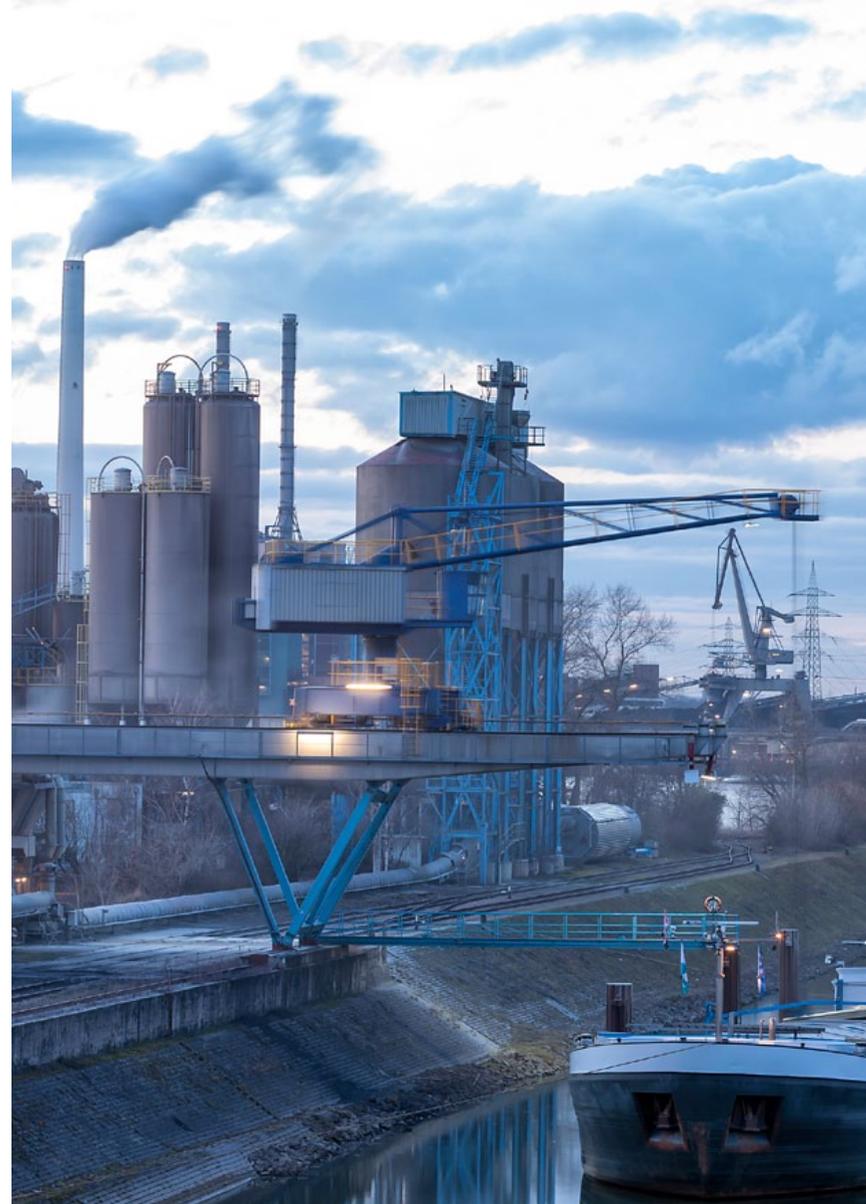
Dr. Liang Yang ist Geograph am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP an der Universität Hamburg.

HOHER CO₂-AUSSTOSS DRÜCKT WERT EINES UNTERNEHMENS

Seit Einführung des Europäischen Emissionshandels hat CO₂ einen Preis: Unternehmen mit besonders hohem Ausstoß müssen Emissionszertifikate kaufen – also das Recht, CO₂ zu emittieren. Klimafreundliche Unternehmen können dagegen Zertifikate verkaufen und so Mehreinnahmen erwirtschaften.

Aber ändert sich durch den Emissionshandel überhaupt etwas für die Unternehmen? In der Theorie sollen CO₂-Zertifikate einen Anreiz zu klimaschonender Produktion bieten. Das funktioniert aber nur, wenn sie sich als Gewinne oder Verluste bemerkbar machen – sind Emissionsrechte zu billig, geht der Anreiz verloren. Problematisch ist es auch, wenn die Unternehmen ihre höheren CO₂-Kosten einfach an die Verbraucher weiterreichen. Den Preis für zu hohe Emissionen zahlen dann die Kunden. Dies ist in der Energiebranche der Fall, wie wissenschaftliche Studien gezeigt haben.

Am CEN haben mein Kollege Nicolas Koch und ich erstmals untersucht, ob CO₂-Emissionen dennoch den Wert von Energieunternehmen beeinflussen. Anders als die jährlich





veröffentlichten Bilanzen spiegelt der Unternehmenswert auch Erwartungen für die Zukunft wider. Ist das Unternehmen für kommende Herausforderungen – zum Beispiel aus der Klimapolitik – gewappnet, sind das gute Bedingungen für einen hohen Wert. Um dies zu berechnen, haben wir uns einige große Versorger angesehen: Welchen Strommix produziert das Unternehmen? Kohle, Gas oder Erneuerbare? Wie modern sind seine Kraftwerke? Vor allem hat uns interessiert, ob sich Investitionen in emissionsarme Technologien rechnen würden.

Vor dieser Frage stehen die Stromversorger übrigens selbst gerade, denn viele Anlagen sind alt und müssen ohnehin modernisiert werden. Da Kraftwerke für eine lange Lebensdauer konzipiert werden und der Neubau kostenintensiv ist, müssen Investitionsentscheidungen wohlüberlegt sein. Wichtig ist auch, dass zukünftig weniger Zertifikate kostenlos an die Unternehmen verteilt und mehr Zertifikate versteigert werden. Bereits abgeschafft wurde das so genannte „grandfathering“: Wie viele kostenlose Zertifikate ein Unternehmen erhält, wird nicht mehr anhand seiner früheren Emissionen berechnet. Grundlage sind vielmehr Benchmarks, die sich am CO₂-Ausstoß der effizientesten Anlagen des jeweiligen Sektors in Europa orientieren. Stößt eine Anlage mehr CO₂ aus, muss der Betreiber Zertifikate zukaufen – Maßstab sind

also die CO₂-Einsparungen, die das Unternehmen mit klimaschonender Technologie erreichen könnte. Beides wird dazu führen, dass CO₂-Zertifikate teurer werden.

In unserer Studie haben wir Daten aus über 450 Kraftwerken analysiert und zwei Szenarien durchgespielt: Was passiert, wenn die Versorger ihre alten Anlagen durch Anlagen desselben Typs ersetzen? Was, wenn sie stattdessen in emissionsarme Technologien investieren? Berechnungsgrundlage waren die selbstgesteckten Emissionsziele der Unternehmen. In beide Szenarien haben wir außerdem weitere Faktoren einbezogen, etwa Rohstoffpreise, Lebensdauer der Anlagen und Wachstumsraten bei CO₂-Preisen. Das Ergebnis: Der Unternehmenswert leidet eindeutig unter zu hohen Emissionen. Im Jahr 2020 werden Unternehmen, die ihre Emissionsziele ernst nehmen, bis zu 26 Prozent mehr wert sein als bei ungebremseter Emission. Verantwortlich ist die zu erwartende Preisentwicklung für CO₂-Zertifikate. Das heißt: Investitionen in emissionsarme Stromproduktion sind nicht nur klimaschonend, sondern auch ökonomisch sinnvoll. Voraussetzung ist, dass die gesetzlichen Vorgaben stabil bleiben.

Prof. Alexander Bassen forscht am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg zu Klimawandel und Gesellschaft.

KLIMA IN FORMELN: AUCH EXTREM- WETTER FOLGT GESETZEN

Monsterwellen, Taifune, Jahrhundertfluten – solche zerstörerischen Wetterextreme scheinen unberechenbar. Dennoch arbeiten Klimaforscher daran, sie in strenge mathematische Formeln zu fassen und im besten Falle sogar vorherzusagen.

Das ist eines meiner Forschungsthemen als angewandter Mathematiker und theoretischer Meteorologe am Hamburger Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP. Auf extreme Phänomene treffen drei Eigenschaften zu: Sie treten selten auf. Sie weichen besonders stark von den gewohnten Mittelwerten ab. Und sie wirken sich heftig auf Natur und Gesellschaft aus. Kurz gesagt sind Extreme untypisch und gerade deshalb schwer zu beobachten. Und hier kommt die Statistik ins Spiel.

Um Extremwerte zu berechnen, gibt es zwei Ansätze. Betrachten wir etwa das Risiko einer Region, überflutet zu werden. Eine Möglichkeit ist, für jedes Jahrzehnt lediglich den höchsten Pegelstand herauszunehmen. Wir betrachten so stets nur einen Wert pro Zeiteinheit. Andere, ebenfalls hohe Wasserstände fallen durch das Raster. Bei der zweiten





Methode hingegen werden alle Extremwerte berücksichtigt, die oberhalb eines bestimmten Grenzwerts liegen. Man erhält damit für den Zeitraum von zehn Jahren also beliebig viele Flutereignisse, manchmal aber auch gar keines. Die Ergebnisse beider Methoden lassen sich grafisch in Kurven darstellen, die zeigen, wie häufig bestimmte extreme Wasserstände aufgetreten sind.

Interessanterweise passen alle so errechneten Wahrscheinlichkeiten zu einer von vier Standard-Kurven, die schon länger bekannt sind. Benannt sind diese Kurven-Typen nach ihren wissenschaftlichen Entdeckern Gumbel, Fréchet, Weibull und Pareto. Folglich sind auch Extreme bestimmten Gesetzmäßigkeiten unterworfen. Dies wiederum ermöglicht uns, die Wahrscheinlichkeit künftiger Ereignisse zu errechnen. Das ist übrigens nicht nur für Klimawissenschaftler interessant, sondern auch für Ingenieure, Versicherungen oder die Finanzwirtschaft. Wie hoch muss der Staudamm werden, um in den nächsten hundert Jahren wahrscheinlich nicht überschwemmt zu werden? Wieviel Geld muss vorsichtshalber für Schäden durch Großbrände eingeplant werden? Wie wahrscheinlich ist ein Börsencrash?

Die Aussagen aus den genannten Methoden haben jedoch einen Nachteil. Sie basieren auf der Annahme, dass das Klimasystem unveränderlich ist. Doch das Gegenteil ist

der Fall. Unser System hängt von zahlreichen äußeren Faktoren ab und verändert sich deshalb ständig. Gemeinsam mit Kollegen in Frankreich, Portugal und Großbritannien arbeite ich deshalb an der Frage, wie wir den Klimawandel in unsere Formeln zur Extremwert-Theorie einfließen lassen können. Fest steht: So chaotisch extremes Wetter auch ist, Häufigkeit, Stärke und räumliche Verteilung gehorchen dennoch universellen Gesetzen. Diese Gesetze betrachten Extremforscher wie durch eine Lupe, denn in außergewöhnlichen Wetterlagen sind die Ereignisse überhöht und gut erkennbar. Extreme sind für uns nützlich, denn sie zeigen uns, wie sich ein System grundsätzlich verhält – in unserem Fall das Klima.



Prof. Valerio Lucarini ist theoretischer Meteorologe und war von 2011 bis 2016 am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP an der Universität Hamburg tätig.



DETEKTIVJOB KLIMAFORSCHER: GEGENSPIELER DES KLIMAGASES CO₂ GESUCHT

Für den Ostseeraum zeigt die Temperaturkurve einen klaren Trend: In den vergangenen dreißig Jahren wurde es hier um bis zu zwei Grad Celsius wärmer. Wie kam es dazu? Um das zu beantworten, müssen wir Klimaforscher in die jüngere Vergangenheit schauen.

Dabei gehen wir vor wie Detektive in einem komplizierten Fall. Die reiche Gräfin Celsius liegt am Boden – starb sie eines natürlichen Todes oder wurde sie ermordet? Ähnlich in der Klimaforschung: Liegen die gestiegenen Temperaturen im Bereich natürlicher Temperaturschwankungen? Oder haben sie eine externe Ursache?

Gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen am Exzellenzcluster für Klimaforschung CliSAP untersuche ich zunächst die Messreihen seit 1980. Wir inspizieren also den Tatort. Liegen die Daten im Bereich der natürlichen Schwankungen, müssen wir gar nicht erst einen Fall eröffnen. Die Gräfin starb an Altersschwäche. Doch tatsächlich erweisen sich die Werte für Sommer und Herbst sowie der Jahresdurchschnitt als Ausrei-

ßer, die es zu erklären gilt. Wir geben einen Fahndungsbrief heraus: „Täter gesucht!“

Einen Hauptverdächtigen gibt es bereits. Ursache für den Temperaturanstieg in allen vier Jahreszeiten könnte die vermehrte Gegenwart des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) sein. Ob das stimmt, sagen uns die Klimarechenmodelle. Diese liefern Vorschläge, wie die Temperaturerhöhung aufgrund gestiegener CO₂-Konzentrationen ausfallen sollte. Und in der Tat, die Simulationen ergeben, dass für die Winter- und Frühlingsmonate sehr wohl CO₂ der alleinige Täter sein kann.

Doch der Fall ist noch nicht gelöst. Die festgestellte Erhöhung der Sommer- und Herbsttemperaturen seit 1980 ist zu hoch. Laut den CO₂-getriebenen Rechenmodellen müsste sie niedriger sein. Wir schließen daraus, dass CO₂ alleine die Erwärmung nicht erklärt. Was könnte den ungewöhnlichen Temperaturanstieg in den warmen Monaten bewirkt haben?

Wir folgen einem weiteren Verdacht. Winzige Schmutzpartikel in der Luft könnten der gesuchte Faktor sein. Diese sogenannten Aerosole reflektieren das Sonnenlicht und wirken so wie ein Sonnenschirm. Sie kühlen folglich die bodennahen Luftschichten. Außerdem ermöglichen die Teilchen das Entstehen von Wolken, die ebenfalls für Kühlung sorgen. Aerosole verhalten sich demzufolge wie eine Temperaturbremse.

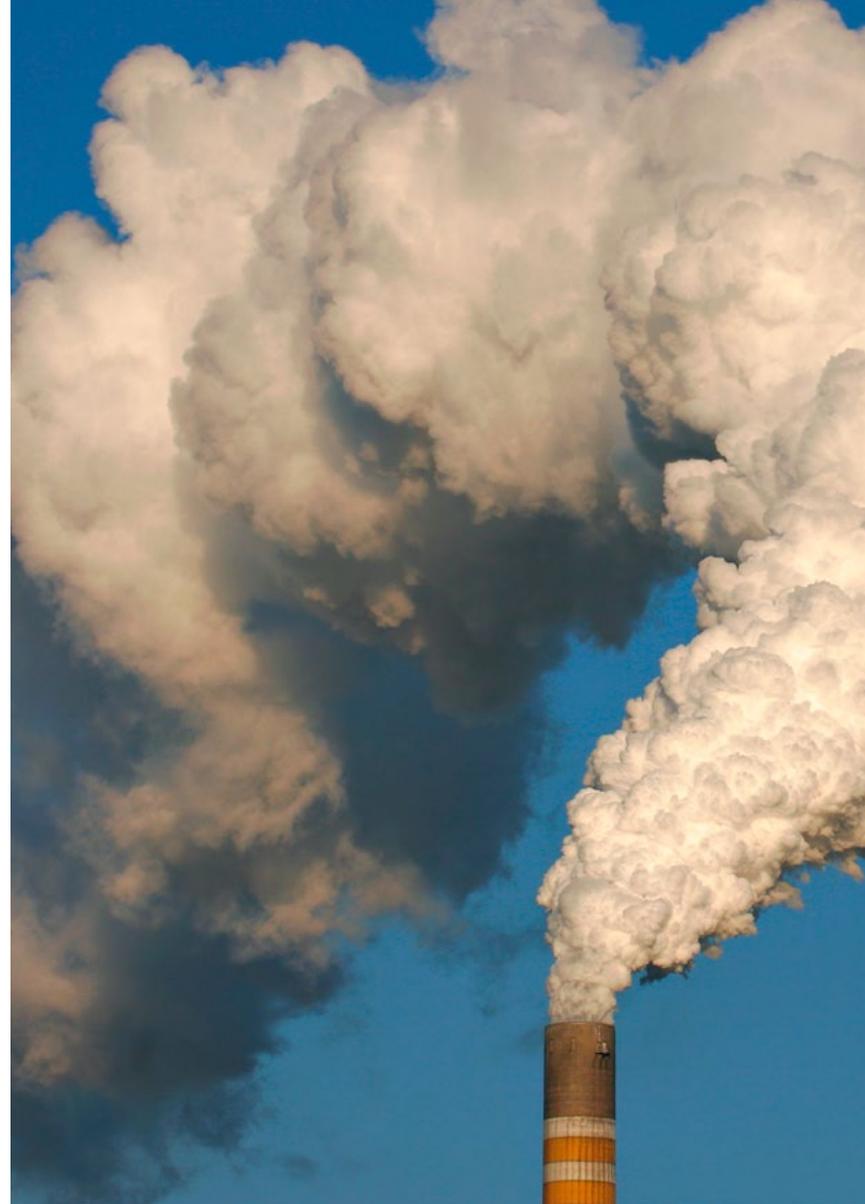


Wir vermuten, dass dieser Mechanismus im Sommer und Herbst besonders wirksam ist.

Die Konzentration der Aerosole in der Luft nahm im Verlauf der Industrialisierung im Ostseeraum stark zu. Wir nehmen daher an, dass Aerosole die Wärmewirkung des CO₂ im baltischen Raum bis 1980 milderten. Der Klimawandel wurde also durch die Umweltverschmutzung eine Weile gedämpft. Das änderte sich mit der Luftreinhaltungspolitik ab den 1980er Jahren. Industriell erzeugte Aerosole wurden weniger und damit auch ihre kühlende Wirkung im Sommer und im Herbst. Das könnte die außergewöhnlich hohen Temperaturanstiege in den letzten Jahrzehnten erklären.

Der Mordfall scheint gelöst. Täter ist das CO₂, das die Temperatur im Ostseeraum erhöht hat. Die hitzeempfindliche Gräfin Celsius hatte anfangs noch Helfer: Die Aerosole verschafften ihr besonders im Sommer und im Herbst Erleichterung, indem sie die Luft kühlten.

Prof. Hans von Storch forscht am Exzellenzcluster für Klimaforschung an der Universität Hamburg und war bis 2015 Direktor des Instituts für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht.



Bildnachweis

©iStock.com/Pavliha (Titel), ©iStock.com/aghezzi (Titel innen, S. 1), ©iStock.com/SlobodanMiljevic (S. 5 o.), ©UHH/CEN/M. Zapf (S. 5 u.), ©iStock.com/Philartphace (S. 8/9), ©picture alliance/dpa/Jens Wolf (S. 11 o.), ©iStock.com/SteveAllenPhoto (S. 11 u.), ©iStock.com/DZarzycka (S. 14/15), ©NASA - NASA Goddard Space Flight Center Image by Reto Stöckli (S. 16 o.), ©Von Wolkenkratzer - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29418750> (S. 16 u.), ©iStock.com/Seqoya (S. 18/19), ©Alfred-Wegener-Institut/Mario Hoppmann, CC-BY 4.0 (S. 23 o.), ©NASA's Scientific Visualization Studio (S. 23 u.), ©NASA Earth Observatory image by Jesse Allen, using EO-1 ALI data provided courtesy of the NASA EO-1 team, CC BY-NC-ND 2.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode> (S. 24/25), ©iStock.com/HadelProductions (S. 29), ©“Close to Aleppo, Syria” by Jurgen, <https://flic.kr/p/5DtPgv>, CC BY-NC-ND 2.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode> (S. 33 o.), ©iStock.com/aliunlu (S. 33 u.), ©iStock.com/Joanna-Palys (S. 36), ©iStock.com/olaser (S. 38/39), ©iStock.com/Bim (S. 43), ©iStock.com/ollo (S. 44/45), ©Alessandro Pavone (S. 49 o.), ©By Trocaire from Ireland - DSC_0974, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29660143> (S. 49 u.), ©iStock.com/rusm (S. 50), ©iStock.com/gece33 (S. 53 o.), ©iStock.com/hernan4429 (S. 53 u.), ©H. Havermeier (S. 56/57), ©iStock.com/AVTG (S. 59)

Herausgeber

Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN),
Universität Hamburg
www.cen.uni-hamburg.de

Redaktion

Julika Doerffer, Stephanie Janssen, Ute Kreis,
Franziska Neigenfind und Lisa Wolf.
Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN)

Gestaltung

HAAGEN design, www.haagendesign.de

Auflage: 3.000

Hamburg, 2017

mit freundlicher Unterstützung des Hamburger Abendblatts

ZUM INHALT

Wird die Sahara durch den Klimawandel wieder grün? Welche Rolle spielt Schnee von gestern, wenn man heute Arktiseis vermisst? Und was bedeuten die Folgen des Klimawandels für den Syrienkonflikt?

In einer Artikelserie des Hamburger Abendblatts geben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungszentrums CEN und des Exzellenzclusters CliSAP der Universität Hamburg regelmäßig Antwort – leicht verständlich und ohne Fachchinesisch. In unserem siebten Lesebuch haben wir zehn spannende Beiträge dieser Serie für Sie zusammengestellt.

www.cen.uni-hamburg.de

www.clisap.de

