

REKLIM

Helmholtz-Verbund
Regionale Klimaänderungen

Regionale Klimaänderungen – Ursachen und Folgen

NEWSLETTER Nr. 3

| Oktober 2013



HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL

Fragen, die uns bewegen. Antworten, die wir suchen.



Herausforderung Klimawandel

Klimaforschung im Verbund

Mit der Ausgabe des neuen REKLIM-Newsletter Nr. 3 wird ein weiterer Schritt vollzogen, die wissenschaftlichen Ergebnisse und Erkenntnisse des Helmholtz-Forschungsverbundes zu dokumentieren und als entscheidungsrelevante Informationsangebote in die Öffentlichkeit zu tragen. Neben den Kurzübersichten der 10 Forschungsthemen wird die in REKLIM entwickelte neue Internetplattform meereisportal.de vorgestellt, die Hintergrundinformationen, Expertenwissen sowie ein Karten- und Datenarchiv rund um das Thema Meereis beinhaltet. Es soll als deutschsprachiges Angebot verständlich aufbereitete Informationen und Daten zu dem sich besonders in den Polarregionen verstärkt vollziehenden Klimaveränderungen anbieten und durch aktuelle Berichterstattung von meereisbezogenen Forschungs-Expeditionen unterschiedlichste Adressaten für das Thema interessieren und darüber auch verstärkt sensibilisieren.

In einer weiteren Ergänzung zu den Forschungsinhalten und Themen werden Kurzprofile von einigen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern vorgestellt, um dem Forschungsverbund hierüber auch ein Gesicht zu verleihen. Gerade die Vielzahl der Arbeiten im Nachwuchsbereich (Doktoranden und PostDocs) tragen durch ihren Forschungsbeitrag zum Erfolg des Verbundes bei und erarbeiten durch den inter- und multidisziplinären Ansatz in den einzelnen Themenfeldern auch eine nachhaltige Grundlage für die Erd- und Umweltforschung.

Klimaveränderungen bilden sich auf unterschiedlichen Ebenen ab, seien es die Polarregionen mit ihren unmittelbaren Auswirkungen durch Meereisrückgang oder die zunehmenden Veränderungen in den Permafrostgebieten, die mit einer verstärkten Emission von Methan oder Destabilisierung der Küstenlandschaft einhergehen. Die frühsummerliche Hochwasserflut in Deutschland und in den osteuropäischen Nachbarländern hat gezeigt, wie verwundbar die Infrastrukturen und damit auch die in den betroffenen Regionen lebenden Menschen sind. Der materielle Schaden ist immens hoch, es ist die teuerste Naturkatastrophe, die Deutschland bisher getroffen hat. Der emotionale Schaden ist nicht zu beziffern.

So arbeitet der REKLIM-Verbund bewusst nicht nur an der Verbesserung der naturwissenschaftlichen Grundlage für regionalbezogene Klimaprojektionen sondern auch an transdisziplinären Themen wie Klima und Gesundheit (z.B. die indirekten Auswirkungen von Klimawandel auf die Luftqualität durch Spurengase, Aerosole und Allergenträgern wie Pollen und damit auf die Gesundheit der Menschen) oder im sozioökonomischen Kontext, wo es um Risikoabschätzungen für erforderliche Maßnahmen in der Vermeidung aber auch Anpassung an den Klimawandel geht. Dieser Themenvielfalt zeigt die Stärke des Verbundes und ist im Newsletter 2013 an einigen ausgewählten Beispielen dargestellt.

Prof. Dr. Peter Lemke (AWI)
Leiter des Helmholtz-Verbundes REKLIM



AWI | DLR | FZJ | GEOMAR | GFZ | HMGU | HZG | KIT | UFZ

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungszentrum Jülich

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum

Helmholtz-Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung

Karlsruher Institut für Technologie

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

BETEILIGTE UNIVERSITÄRE PARTNER

Europa-Universität Viadrina (EUV)

Universität Bremen (UHB)

Universität Heidelberg (UHD)

Universität Hamburg (UHH)

Universität zu Köln (UK)

KIT - Universitätsbereich (UKA)

Universität Leipzig (UL)

Technische Universität München (TUM)

Universität Potsdam (UP)

Impressum

Koordinierungsstelle Helmholtz-Verbund REKLIM

Wissenschaftlicher Koordinator:
Prof. Dr. Peter Lemke (AWI)
Geschäftsführer:
Dr. Klaus Grosfeld (AWI)
Koordinationsassistentin:
Marietta Weigelt (AWI)

Kontakt für Anfragen:

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar-
und Meeresforschung

Dr. Klaus Grosfeld
Tel.: 0471-4831-1765
E-mail: Klaus.Grosfeld@awi.de

Dipl.-Geogr. Marietta Weigelt
Tel.: 0471-4831-1750
E-Mail: Marietta.Weigelt@awi.de

www.reklim.de
E-mail: info@reklim.de

Herausgeber:

Helmholtz-Verbund REKLIM, 2013

Texte und Abbildungen:

Mitglieder des Helmholtz-Verbundes
REKLIM

Redaktion und Konzeption:

Prof. Dr. Peter Lemke (AWI)
Dr. Klaus Grosfeld (AWI)
Dipl.-Geogr. Marietta Weigelt (AWI)

Copyright:

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar-
und Meeresforschung

Sprecher- und Sprecherinnen der Themenschwerpunkte:

- Thema 1: Prof. Dr. Klaus Dethloff (AWI),
Prof. Dr. Hans von Storch (HZG)
- Thema 2: Prof. Dr. Peter Lemke (AWI),
Prof. Dr. Heinrich Miller (AWI)
- Thema 3: Prof. Dr. Ursula Schauer (AWI),
Dr. Torsten Sachs (GFZ)
- Thema 4: Prof. Dr. Sabine Attinger (UFZ),
Prof. Dr. Hans Peter Schmid (KIT)
- Thema 5: Prof. Dr. Johannes Orphal (KIT),
Prof. Dr. Andreas Wahner (FZJ)
- Thema 6: Prof. Dr. Christoph Kottmeier (KIT),
Dr. Frauke Feser (HZG)
- Thema 7: Prof. Dr. Bernd Hansjürgens (UFZ),
Prof. Dr. Hans von Storch (HZG)
- Thema 8: Prof. Dr. Ralf Tiedemann (AWI),
Prof. Dr. Achim Brauer (GFZ)
- Thema 9: Prof. Dr. Johannes Orphal (KIT),
Prof. Dr. Andreas Wahner (FZJ)
- Thema 10: Prof. Dr. Reimund Schwarze (UFZ),
Prof. Dr. Beate Ratter (HZG)

Gestaltung:

© KLEMM BREMEN.DE
Koordinierungsstelle REKLIM

Druck:

müllerDitzen AG, Bremerhaven
www.muellerditzen.de



Inhalt

1	Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme	4
2	Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz	6
3	Regionale Klimaänderungen in der Arktis: Steuerung und Langzeiteffekte am Übergang Land-Ozean	8
4	Die Landoberfläche im Klimasystem	10
5	Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala	12
6	Extreme Wetterereignisse – Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren	14
7	Sozioökonomie und Management für regionale Klima-Anpassungs- und Vermeidungsstrategien	16
8	Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten	18
9	Klimawandel und Luftqualität	20
10	Risikoabschätzungen und Risikomanagement für Klimaanpassungsstrategien	22
	Nachwuchswissenschaftler im Verbund	24
	Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg	26
	Norddeutsches Klimabüro	27
	Mitteldeutsches Klimabüro	28
	Süddeutsches Klimabüro	29
	meereisportal.de	30
	Synthese	31
	Ausblick	32

1

Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme

Wie hängt die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre-Ozean-Eis und Landoberflächen ab? Welchen Einfluss haben natürliche und anthropogene Prozesse?

Motivation

In Thema 1 von REKLIM werden horizontal und vertikal hochaufgelöste regionale Klimasystemmodelle entwickelt, in denen die Kopplung der Subsystemmodelle für die Atmosphäre, Ozean, Meereis, Land und Aerosolchemie untereinander erfolgt. Ziel ist es, die beobachteten Änderungen in verschiedenen Regionen mit Hilfe von regionalen Modellsimulationen zu interpretieren. Zudem sollen die bisher unscharfen globalen Klimaprojektionen mit höherer Auflösung für die regionale Skala verfeinert werden. Da mit zunehmender räumlicher Auflösung Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem detaillierter dargestellt und repräsentiert werden, ändern sich auch die Rückkopplungen (feedbacks) mit den großskaligen atmosphärischen Telekonnektionsmustern. Diese Frage wird in neu entwickelten globalen Klimamodellen mit der Möglichkeit regionaler Verfeinerung bearbeitet.

Im REKLIM-Verbund fokussiert sich das Alfred-Wegener-Institut (AWI) mit regionalen Erdsystemmodellen (RESM) auf das Gebiet der Arktis. Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) entwickelt diese für Deutschland und Nordeuropa, während das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) den Schwerpunkt ihrer Entwicklung auf Deutschland und Mitteleuropa legen. Zukünftig wird sich das Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung (GEOMAR) mit der regionalen Ozeanmodellierung im Nordatlantik und Ostseeraum an Thema 1 beteiligen.

Wolken im Klimasystem der Arktis

Wolken in der Arktis stellen eine der größten Unsicherheiten in der Klimamodellierung dieser Region dar, da sie zahlreiche Prozesse im Klimasystem beeinflussen (z. B. Strahlungshaushalt, Temperatur, Niederschlag). Eine möglichst gute Darstellung der Wolken in Klimamodellen ist daher sehr wichtig. Das regionale Klimamodell HIRHAM5 wurde benutzt, um im Rahmen einer Sensitivitätsstudie den Einfluss verschiedener Parameter innerhalb des im Modell verwendeten Wolkenschemas auf die berechnete Wolkenbedeckung in der Arktis zu untersuchen (Klaus, 2013). Das Modell wurde dafür mit Daten aus der globalen Reanalyse ERA-Interim des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) angetrieben, die Ergebnisse wurden mit Beobachtungsdaten des Satelliten MODIS verglichen. Verändert wurden ein Formparameter, der die Berechnung der Gesamtwolkenbedeckung beeinflusst sowie ein Grenzwert für die Bildung von Wolkeneis, welcher den Bergeron-Findeisen-Prozess der Entstehung großer Tropfen in Wolken kontrolliert.

Abbildung 1.1 zeigt hierzu die Wolkenbedeckung über dem Modellierungsgebiet der Arktis für November 2007, einmal für den Kontroll-Lauf (ursprüngliche Parameter), für den Sensitivitäts-Lauf (veränderte Parameter) und die Beobachtungsdaten des Satelliten MODIS. Besonders über dem Arktischen Ozean zeigt der Sensitivitäts-Lauf eine deutlich verminderte Wolkenbedeckung im Vergleich zum Kontrolllauf. Der Vergleich mit den Satellitendaten demonstriert, dass diese geringere Wolkenbedeckung deutlich besser der Beobachtung entspricht.

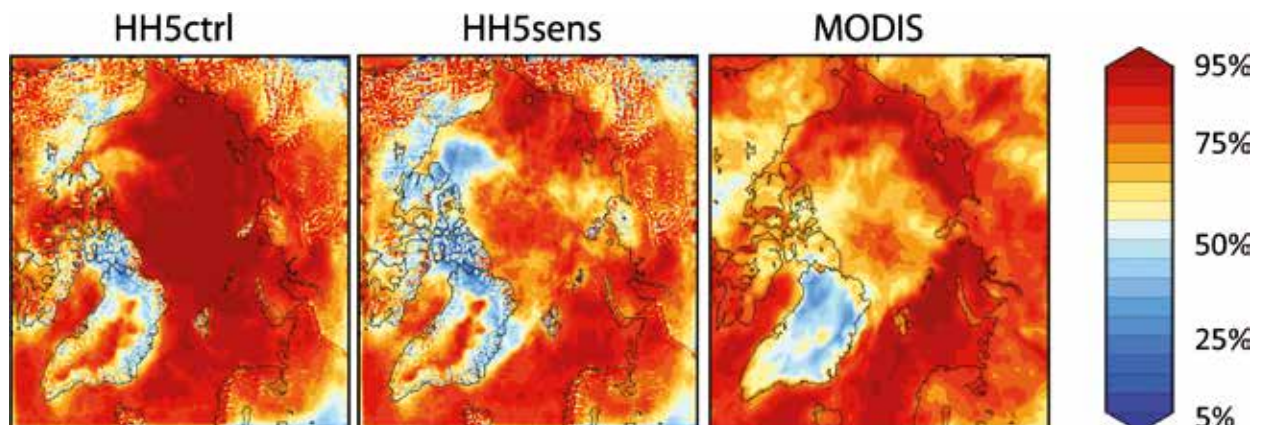


Abb. 1.1: Wolkenbedeckung über der Arktis für September 2007 aus einem Kontroll-Lauf (HH5ctrl), einem Sensitivitäts-Lauf (HH5sens) und von Beobachtungen (MODIS). (Grafik: Daniel Klaus, AWI)

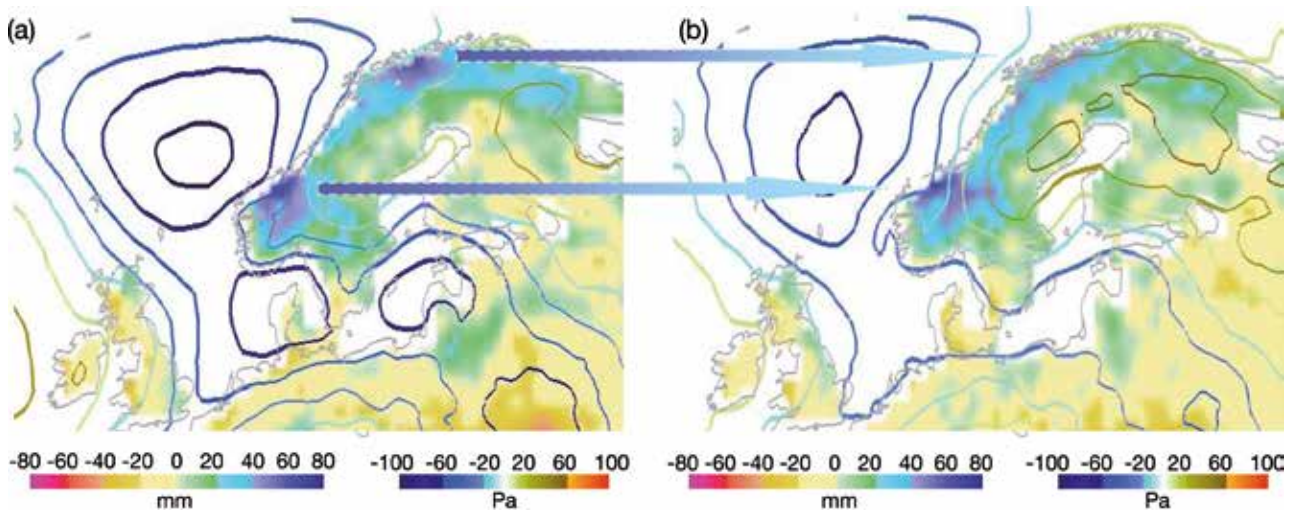


Abb. 1.2: Unterschiede im Niederschlag (mm/Monat, gefüllte Flächen) im Vergleich zu Referenzdaten (WATCH) für CCLM (a) und COSTRICE (b). Unterschiede im auf Meereshöhe reduzierten Bodendruck (Pa, Konturen) im Vergleich zu Reanalysedaten (ERA-Interim). Beides gemittelt über die Sommer 1998-2002. (Grafik: Ha Hagemann, HZG)

Atmosphäre-, Ozean- und Meereisrückkopplungen

COSTRICE (das Modellsystem bestehend aus den regionalen Modellen für Atmosphäre (CCLM=COSMO-CLM), Ozean (TRIMNP) und Meereis (CICE), sowie einem Koppler (OASIS) für den Austausch zwischen den Modellkomponenten) wurde mit neuen Modellversionen für Atmosphäre und Ozean aktualisiert. Eine Fallstudie für die Jahre 1997-2002 zeigt den Einfluss des gekoppelten Modellsystems im Vergleich zu unabhängigen Berechnungen mit den Einzelkomponenten. Unterschiede sind z.B. in der Menge des Meereises, der Temperatur und Summe der Wärmeflüsse an der Ozeanoberfläche zu sehen, aber auch im Niederschlag über den angrenzenden Landgebieten. Die Musterbeschreibung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) gelingt mit COSTRICE besser, als es mit den Einzelkomponenten der Fall ist. Der auf Meereshöhe reduzierte Bodendruck wird vom Atmosphärenmodell CCLM alleine zu niedrig für die Gebiete Nordatlantik, Nord- und Ostsee berechnet, was den großen Unterschied im Niederschlag im Vergleich zu Referenzdaten erklären könnte (Abb. 1.2a). Aufgrund der Rückkopplungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis in COSTRICE wird dieser Unterschied reduziert (Abb. 1.2b).

Einfluss von Seesalzpartikeln auf die Entwicklung eines Medicanes im November 2011

Ein Medicane ist ein troposphärisches Tiefdruckgebiet, das meist im Herbst über dem Mittelmeer auftreten kann. Es besitzt Ähnlichkeiten zu einem Hurrikan, daher auch die Wortschöpfung von Medicane aus „Mediterranean Sea“ (Mittelmeer) und dem englischen „Hurricane“. Ein kreisförmiges, wolkenfreies Auge ist dabei von einer nahezu symmetrischen Wolkenmauer umgeben. Die Windgeschwindigkeiten eines Medicanes erreichen nur selten Werte eines echten Hurrikans, auch die räumliche Ausdehnung ist geringer. Dennoch verursachen Medicanes durch extreme Niederschläge, Überflutungen und hohe Windgeschwindigkeiten große Schäden, wenn sie auf Land treffen. Jährlich werden bis zu zwei Medicanes im Mittelmeerraum beobachtet. Eine gute Vorhersage solcher Systeme ist also unabdingbar.

Je höher die Windgeschwindigkeiten über der Meeresoberfläche, desto mehr Seesalzpartikel werden in die Atmosphäre emittiert. Durch die hohen Windgeschwindigkeiten, die ein Medicane mit sich führt, gelangen also viele Seesalzpartikel in die Atmosphäre, wo sie Wolkenbildung und Niederschlag beeinflussen. Durch Streuung und Absorption von Strahlung ändern diese den Wärmehaushalt. Außerdem können sie als Wolkenkondensationskeime den Wasserkreislauf und damit die physikalischen Eigenschaften der Wolke beeinflussen.

Um diesen Einfluss herauszuarbeiten, wird das Modellsystem COSMO-ART verwendet, das die Wechselwirkung zwischen Aerosolpartikeln und Wolken beschreibt. Ein Medicane, der im November 2011 auftrat, wird – einmal mit der Beschreibung von Seesalzemissionen, einmal ohne – simuliert. Vor allem an Küstenstädten führt die zusätzliche Behandlung von Seesalz zu Veränderungen in den Niederschlagssummen. Eine Berücksichtigung von Seesalz verbessert zum Beispiel die Niederschlagsvorhersage in Nizza. Abbildung 1.3 zeigt das simulierte Windfeld und die Anzahldichte von Seesalzpartikeln für den 7.11.2011 in 20 m über Grund um 18:00 UTC.

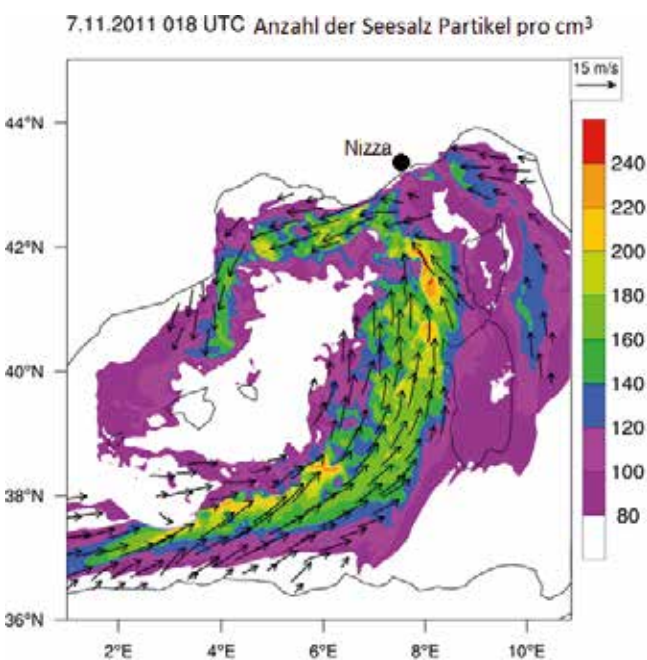


Abb. 1.3: Windfeld (Vektorpfeile) und die Anzahldichte von Seesalzpartikeln (Farbkodierung) für den 7.11.2011 in 20 m über Grund um 18:00 UTC. (Grafik: Isabel Kraut, KIT)

2

Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz

Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen (insbesondere von Grönland) und wie reagiert der Meeresspiegel auf Schmelzwasser und Erwärmung?

Meeresspiegeländerungen sind in der Wahrnehmung der Menschen nur auf langen Zeitskalen von Bedeutung. Aktiver Küstenschutz adressiert daher im Wesentlichen die Abwehr von Gefahren durch Überflutung aufgrund der Gezeiten oder von Sturmfluten. Ohne aktiven Küstenschutz durch Eindeichung wären heute rund 7.500 km² mit 4.8 Millionen Einwohnern an der deutschen Nordseeküste zweimal täglich durch Überflutung bedroht. Aber gerade weil aktiver Küstenschutz gleichermaßen mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden ist, sind langfristige Meeresspiegeländerungen eine wichtige Maßzahl. Diese beträgt nach derzeitigen Erkenntnissen 3.1 +/- 0.6 mm/Jahr und es wird bis zum Ende des Jahrhunderts mit einem globalen mittleren Meeresspiegelanstieg von 18 - 59 cm gerechnet. Faktoren, die den Meeresspiegel auf langen Zeitskalen verändern sind die Beiträge durch Gletscher- und Eisschildschmelzen sowie die thermische Ausdehnung der Ozeane aufgrund der Erwärmung. Auf der regionalen Skala wirken auch Landmassenhebungen und -senkungen als Folge massiver Massenverlagerungen, sei es durch rezentes Abschmelzen der Eisschilde oder noch in Folge nach-eiszeitlicher Entlastungsprozesse in der tiefen Erde.

Eismassenbilanz und globale Auswirkungen

Die Interaktion der Eisschilde mit dem Meeresspiegel und der festen Erde sind wichtige Faktoren für die Eismassenbilanz und die Stabilität des Inlandeises. So führen Variationen in der Eismächtigkeit zu einer Verformung der Erdoberfläche und des Erdschwerefeldes, wodurch sich die Topographie und der Meeresspiegel relativ zur Küste verändern. Dies beeinflusst wiederum die Position der Aufsetzlinie, jener Linie, ab der das Eis an den Rändern aufschwimmt, und damit das dynamische Verhalten des gesamten Eisschilds. Um diese Wechselwirkungen zu untersuchen, wurde ein gekoppeltes Modellsystem entwickelt, das aus einem thermomechanischen Eisschildmodell (RIMBAY) vom AWI und einem viskoelastischen Erdmodell (VILMA) vom GFZ besteht. Das Modell erlaubt es nun, die Eisschild- und Schelfeis-dynamik, sowie die viskoelastische Deformation der festen Erde, wie sie vor allem auf der Zeitskala von Jahrtausenden stattfindet, gemeinsam konsistent zu simulieren. Weitere Besonderheit des Modells ist eine realistische Beschreibung von lokalen Meeresspiegelvariationen, wie sie durch Boden-deformation und schwerfeld-induzierte (gravitativ) selbst-konsistente Wasserumverteilung verursacht werden. Für ein vereinfachtes Szenario eines Meeresspiegelanstiegs – wie er etwa seit der letzten Eiszeit belegt ist – weisen erste Ergebnisse auf einen großen Einfluss der Erddeformation auf die Position der Aussetzlinie hin (Abb. 2.1). Neben einem steigenden Meeresspiegel wurde auch der Einfluss anderer Größen auf die Position der Aufsetzlinie und die Massenbilanz untersucht, wie z.B. die Erwärmung der Ozeane und die Veränderung von Reibungseigenschaften am Übergang zwischen Eis und Felsbett. In Zukunft wird das gekoppelte System auf die Simulation des letzten glazialen Zyklus des Antarktischen Eisschildes mit dem Ziel angewendet, den Einfluss des Meeresspiegelanstiegs durch die nördliche Hemisphäre auf die Enteisungsgeschichte der Antarktis besser zu verstehen.

Meeresspiegeländerungen, von der globalen Skala ...

Änderungen der Masse des Weltozeans sind eine wichtige Randbedingung für globale Ozeanzirkulationsmodelle, sie sind allerdings nur mit relativ großer Unsicherheit zu bestimmen. Mit Hilfe der neu prozessierten Daten des GRACE-Satelliten für

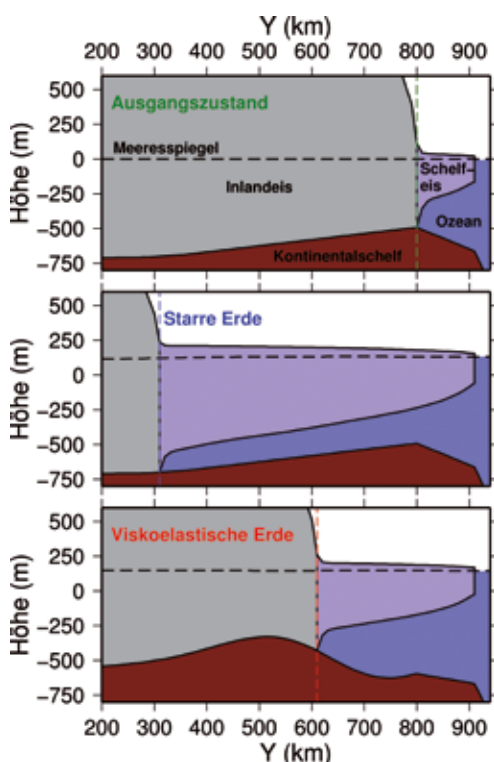


Abb. 2.1: Simulierter Einfluss von Erddeformation und Meeresspiegeländerung auf die Position der Aufsetzlinie. Oben: Ausgangszustand. Mitte: keine Erddeformation, nur Meeresspiegeländerung (120 m, ähnlich wie nach der letzten Eiszeit). Unten: Erddeformation und Meeresspiegeländerung. Es ist zu erkennen, dass der Massenverlust des Eisschildes durch die Meeresspiegeländerung (Mitte) für den Fall der deformierbaren Erde zu einer Landhebung führt, die zu einer früheren Stabilisierung der Aufsetzlinie beiträgt (unten). (Grafik: Hannes Konrad, GFZ)

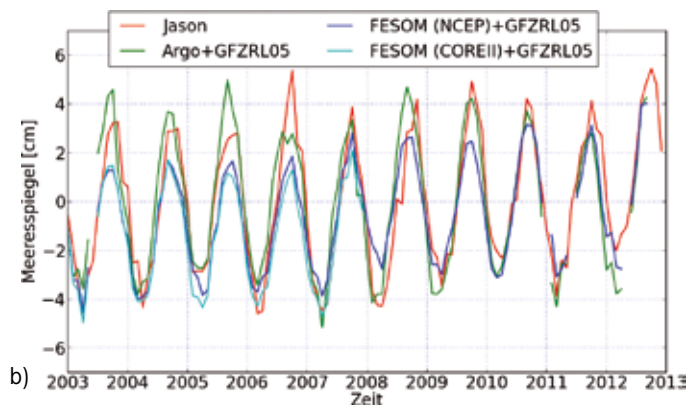
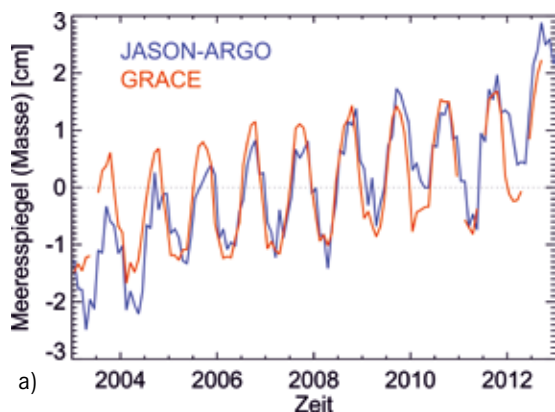


Abb. 2.2: a) Zeitreihe des Massenanteils der global gemittelten Meeresspiegeländerung zwischen 60°S und 60°N. Rot: abgeleitet aus GRACE-Satellitendaten (Gravimetrie); Blau: aus der Differenz von Jason-1/2 Satellitendaten (Altimetrie) und Temperatur-/Salzgehaltsprofilen der Argo-Drifter. (Grafik: Saskia Esselborn, GFZ).
 b) Zeitreihe der über den Nordatlantik gemittelten Meeresspiegeländerung. Rot: abgeleitet aus Jason-1/2 Satellitendaten (Altimetrie); Grün: aus Temperatur-/Salzgehaltsprofilen der Argo-Drifter berechnete (sterische) Ausdehnung; Dunkelblau: Modellergebnis mit NCEP-Antrieb; Hellblau: Modellergebnis mit CORE-II-Antrieb. Die letzten drei Kurven wurden mit GRACE-Satellitendaten korrigiert. (Grafik: Dmitry Sidorenko, AWI)

die Jahre 2003-2013 wurde aus globalen Massenänderungen eine Zeitreihe des globalen Meeresspiegels abgeschätzt (Abb. 2.2a) und mit kombinierten Höhenmessungen von Satellitenaltimetern (Jason-1 und Jason-2) und Temperatur-/Salzgehaltsprofilen von Argo-Driftern verglichen. Beide Zeitreihen des massenäquivalenten Meeresspiegels stimmen gut überein und zeigen einen ausgeprägten Jahresgang mit einer Amplitude von ca. 1 cm mit Maxima im Nordherbst. Der globale Trend stimmt seit dem Jahr 2005 ebenfalls überein und beträgt ca. 2.5 mm/Jahr. Ein Vergleich dieser Daten mit Simulationsergebnissen des hochauflösenden Finite-Elemente Meereis-Ozean Modells FESOM, das mit Reanalyse-Atmosphärendaten NCEP und CORE-II angetrieben wurde, zeigt für die thermische Ausdehnung der obersten 1000 m im Nordatlantik sowie für die Gesamt-Massenänderung (simulierte Ausdehnung plus Bodendruckdaten vom GFZ) gute Übereinstimmung im saisonalen Signal, jedoch eine geringere Amplitude als die Beobachtungen (Abb. 2.2b). Die Ursache hierfür vermuten wir im atmosphärischen Antrieb des Ozeanmodells. Anstelle der in der Natur auftretenden Wärme- und Impulsflüsse werden aus gemessener Temperatur- und Winddaten abgeleitete Größen verwendet, die in der Natur gegebenen Prozess nicht exakt widerspiegeln.

... zur regionalen Skala

Mittels Altimetermessungen (Jason-1/2) können neben der globalen Struktur auch regionale Veränderungen des Wasserstandes überwacht werden. Abbildung 2.3 zeigt die geographi-

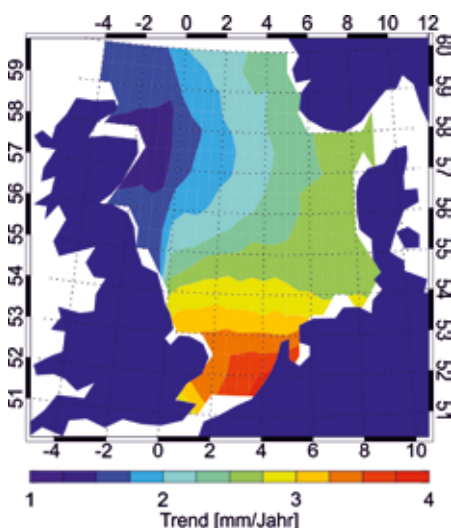


Abb. 2.3: Trend des Wasserstandes in der Nordsee (April 1993 bis Dezember 2012) berechnet auf der Basis von monatlich gemittelten Altimeterwerten. Landhebungs- und Senkungsprozesse wurden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. (Grafik: Saskia Esselborn, GFZ)

sche Verteilung in der Nordsee über die letzten 20 Jahre. Die Reaktion der Wasserstände auf lokale Luftdruckänderungen wurde dabei nicht – wie sonst üblich – eliminiert, um die lokal zu beobachtenden Wasserstände wiederzugeben. Demnach ist der Wasserstand in der Nordsee in den letzten 20 Jahren überall angestiegen, Minima von gut 1 mm/Jahr befinden sich vor der schottischen Küste, Maxima von bis zu 4 mm/Jahr rund um die Rheinmündung.

... zur lokalen Skala

Neben hochfrequenter Variabilität zeigen Analysen von Pegel- und Altimeterdaten aus der Nordsee auch starke Schwankungen mit Perioden von Jahren bis Jahrzehnten. In REKLIM wurden auf Basis von langen Pegelzeitreihen mittels einer Hauptkomponentenanalyse Jahresmittel des Wasserstandes für die Deutsche Bucht seit 1924 erstellt. Dieser rekonstruierte mittlere Wasserstand stimmt für die letzten 15 Jahre gut mit den Altimetermessungen von Topex und Jason-1/2 überein (Abb. 2.4). Die jährlichen Schwankungen des Wasserstandes in der Deutschen Bucht scheinen somit repräsentativ für die gesamte Nordsee zu sein. Das dominante Muster des Wasserstandes (ein Nord-Süd Gradient über der gesamten Nordsee) erklärt 80% der Gesamtvariabilität und die zugehörige Zeitreihe stimmt sehr gut mit den mittleren Wasserständen in der Deutschen Bucht überein. Diese Ergebnisse lassen erwarten, dass aus einer Kombination der Pegel- und Altimeterdaten die Muster der Wasserstandsvariabilität in der Nordsee während des letzten Jahrhunderts rekonstruiert und somit langfristige Änderungen abgeschätzt und besser beurteilt werden können.

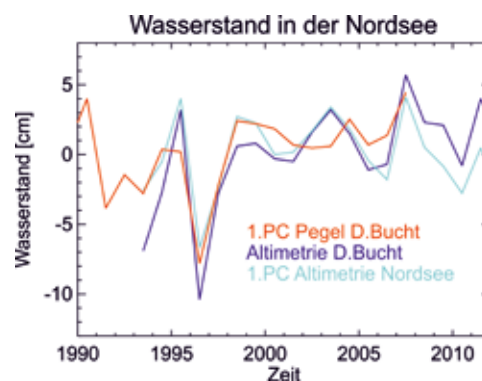


Abb. 2.4: Zeitreihen des Jahresmittels des Wasserstandes in der Nordsee. Rot: Amplitude der ersten Hauptkomponente aus Pegel- und Altimeterdaten; Blau: Mittelwert aus Satelliten-Altimeterdaten (Topex, Jason-1/2) jeweils für die Deutsche Bucht; Türkis: Amplitude der ersten Hauptkomponente der Altimeterdaten für die gesamte Nordsee. (Grafik: Frauke Albrechts, HZG; Saskia Esselborn, GFZ)

3

Regionale Klimaänderungen in der Arktis: Steuerung und Langzeiteffekte am Übergang Land-Ozean

Welche spezifischen Änderungen folgen aus dem Klimawandel für Boden, Ozean und Atmosphäre der Schelfmeere und Permafrostregionen in der Arktis und welche Wechselwirkungen gibt es?

Im vergangenen Jahr standen multidekadische Süßwasser- und Meereisveränderungen der gesamten Arktis im Fokus der ozeanischen Arbeiten (Abb. 3.1). Gleichzeitig verlagerte sich der Schwerpunkt der Untersuchungen zu Treibhausgasflüssen aus dem Paläobereich in die rezenten Umlagerungen aus submarinem und terrestrischem Permafrost.

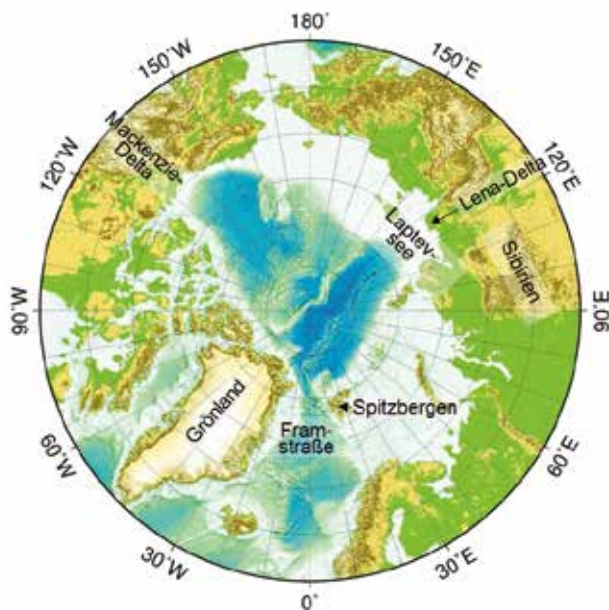


Abb. 3.1: Karte mit im Text bezeichneten Untersuchungsgebieten (Grafik: Andreas Wisotzki, AWI)

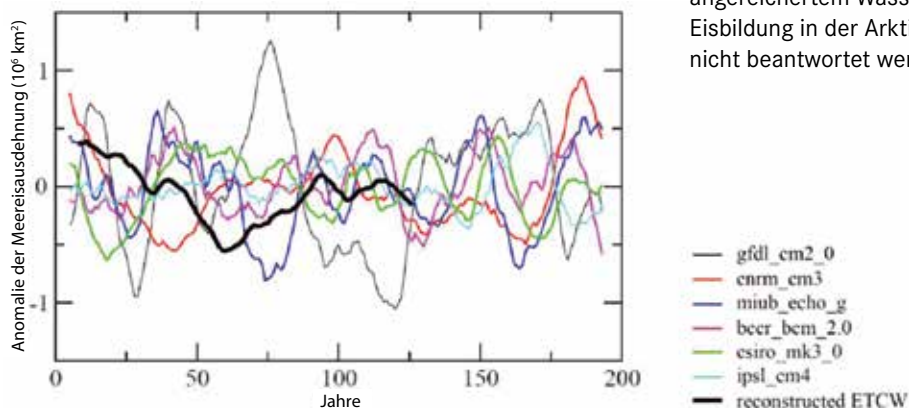


Abb. 3.2: Anomalien der arktischen Meereisausdehnung (10^6 km^2) im Winter simuliert mit mehreren Klimamodellen (farbige Linien) und für den Zeitraum 1880 bis 2008 rekonstruiert unter Verwendung von beobachteten Atmosphärentemperaturen (dicke schwarze Linie). Das Minimum der rekonstruierten Anomalie fällt mit dem Temperaturmaximum des ETCW zusammen. Die Legende enthält die Namen der benutzten Modelle. (Grafik: Vladimir Semenov, GEOMAR)

Meereisänderungen und Ozeanzirkulation

Die arktische Meereisausdehnung im Sommer ist seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 um ca. 50% zurückgegangen. Welche Rolle spielen natürliche Einflüsse neben dem anthropogenen Treibhauseffekt? Dazu haben Semenov und Latif (2012) die Dynamik des „Early Twentieth Century Warming“ untersucht, einer starken Erwärmung zwischen 1920 und 1940. Die Studie zeigt, dass es in jener Zeit im Winter ebenfalls einen erheblichen Rückgang des arktischen Meereises gegeben haben muss. Die Größenordnung der natürlichen Schwankungen wurde auch mit Klimamodellen abgeschätzt. Interne Schwankungen des arktischen Meereises im Winter können demnach in der gleichen Größenordnung liegen, wie der Rückgang während der letzten Jahrzehnte (Abb. 3.2).

Süßwasser aus der Arktis kann die großräumige Zirkulation im Nordatlantik beeinflussen. Deshalb wird seit 1998 der Ausstrom von Süßwasser aus der Arktis durch die Framstraße in einer deutsch-norwegischen Kooperation untersucht. Die Zeitreihen aus ganzjährig zwischen Grönland und Spitzbergen verankerten Messgeräten wurden in einigen Jahren durch Tracermessungen ergänzt, die die Identifizierung von Süßwasser unterschiedlicher Herkunft (Kontinentalabfluss, Eisschmelze, Pazifikeinstrom) erlauben. Obwohl bislang kein Trend im südwardigen Transport von Süßwasser zu erkennen ist (Abb. 3.3), zeigen Daten aus sechs Traceraufnahmen große Änderungen in der Zusammensetzung. Vermutlich bilden sie Schwankungen der Zirkulation innerhalb der Arktis ab und nicht Änderungen der jeweiligen Quellen. Ob allerdings die Abnahme von salzangereichertem Wasser aus Eisbildung auch mit verringerter Eisbildung in der Arktis in Zusammenhang steht, kann bisher nicht beantwortet werden.

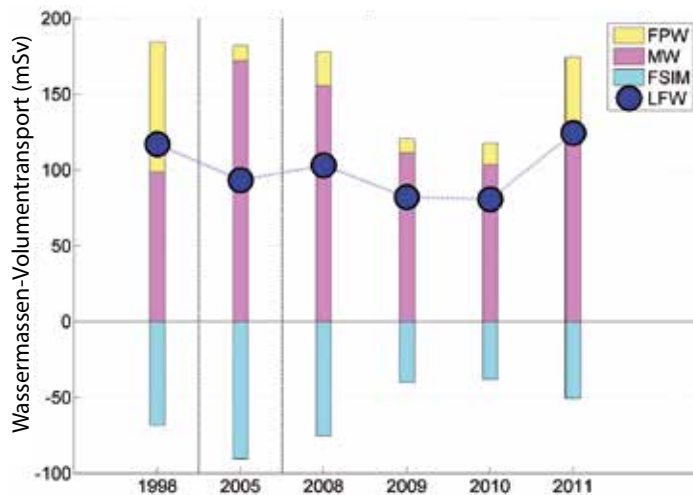


Abb. 3.3: Süßwassertransporte durch die westliche Framstraße (11°W bis 4°O, roter Pfeil) aus Temperatur-, Salzgehalts-, Tracer- sowie direkten Geschwindigkeitsmessungen während der jeweiligen Expedition (positiv nach Süden). Blaue Kreise: Gesamter Süßwasserexport relativ zu 34.9 Salzgehalt. Transportanteile von meteorischem Wasser (MW: Kontinentalabfluss und Niederschlag) in Magenta, Pazifikwasser (FPW) in Gelb und Netto-Meereisschmelze (FSIM) in Türkis. Negative Meereisschmelztransporte entsprechen südwärtsigem Transport von salzangereichertem Wasser aus Meereisbildung. (Grafik: Benjamin Rabe, AWI)

Klima, Kohlenstoff-, Energie- und Wasserflüsse der Permafrostlandschaften – von lokalen zu überregionalen Skalen

Eine große Unbekannte in den Rückkoppelungsmechanismen zwischen arktischen Permafrostgebieten und dem Klimasystem ist die Menge des in die Atmosphäre abgegebenen Methans aus dem Permafrost und aus Seen. Im Sommer 2012 wurden erstmals vom Flugzeug bzw. vom Hubschrauber aus Wärme-, Methan- und CO₂- Flüsse über Permafrost in Alaska, Kanada und Sibirien gemessen (Abb. 3.4). Die Messdaten zeigen eine starke Kopplung an Feuchtströme und entsprechend hohe regionale und zeitliche Variabilität. Das zentrale Mackenzie-Delta emittiert z.B. ein Vielfaches an Methan im Vergleich zu angrenzenden Gebieten. Langzeitmessfelder für Permafrostparameter im Lena-Delta und auf Spitzbergen wurden ausgebaut und mikrobiologische und geophysikalische Experimente wurden durchgeführt.

Neu implementierte operationelle Fernerkundungsdienste stellen großflächig Oberflächenparameter arktischer Permafrostlandschaften bereit und verbessern damit u.a. die Evaluierung

von Modellen. Mit einem regionalen Klimamodell wurde für Sibirien das Klima der letzten Dekaden rekonstruiert. Ein erster Vergleich der simulierten Schneebedeckung mit den satellitenabgeleiteten Daten zeigt, dass die Modellrekonstruktion für Sibirien realistischere Daten als herkömmliche Reanalyse-Datensätze liefert. Außerdem zeigen die Satellitendaten in dem flachen Schelfmeer Trübeverteilungen, die auf Resuspension und damit auf intensiven Wämetransport zum Meeresboden und dem submarinen Permafrost hindeuten.

Submariner und Küsten-Permafrost und Treibhausgase auf arktischen Schelfen

Zur Untersuchung des submarinen Permafrosts wurden in der Laptevsee bis zu 40 m lange Sedimentkerne gebohrt. An ihnen wird die Variabilität des Eisgehaltes und das Ablagerungsmilieu bestimmt, die die potentielle Ausgasung von Methan auf dem sibirischen Schelf steuern. Die Gelände- und Labordaten fließen in ein Modell, mit dem die Degradation des submarinen Permafrosts seit der Überflutung des sibirischen Schelfs nach der letzten Eiszeit simuliert werden kann.



Abb. 3.4: Die Hubschrauberschleppsonde „Helipod“ während der Messung turbulenter Wärme- und CO₂-Ströme über dem sibirischen Lena-Delta. (Foto: Torsten Sachs, GFZ)

4

Die Landoberfläche im Klimasystem

Was sind die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosystem, Wasserressourcen, Land- und Forstwirtschaft und wie beeinflussen diese wiederum das Klima?

Auswirkungen des Klimawandels auf den Treibhausgas Austausch von Grünlandböden im Alpenraum

Böden unter Grünlandnutzung stellen erhebliche Kohlenstoff (C) - und Stickstoff (N) -Speicher dar und sind gegenwärtig im Alpenraum einer deutlichen Klimaerwärmung ausgesetzt. Ob diese Klimaänderung die C- und N-Speicher von Grünlandböden mobilisiert, so dass diese vermehrt als Treibhausgase (THG) in die Atmosphäre gelangen, ist bisher nicht bekannt. Deshalb wurde vom KIT IMK-IFU ein Freilandexperiment etabliert, das die klimabedingte Veränderung der Quell- und Senkenstärke der THGs Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) erfasst. Hierzu wurden Grünland-Bodenkerne (2.5 – 3.5 t) entlang eines natürlich gegebenen Höhengradienten von höher gelegenen zu niedriger gelegenen, wärmeren Standorten versetzt und damit den für die kommenden Jahrzehnte zu erwartenden Klimabedingungen ausgesetzt. Im ersten Jahr zeigten THG-Messungen mittels manueller und automatischer Kammern (Abb. 4.1) eine signifikante Zunahme der pedogenen CH_4 -Aufnahme unter zukünftigen Klimabedingungen. Ebenso wurde die Bodenrespiration stimuliert, jedoch waren die Unterschiede zwischen der Kontroll- und Klimaänderungsvariante deutlich geringer. Die N_2O Emissionen unter Klimawandelbedingungen waren nur im Frühjahr und Sommer leicht erhöht, die Jahressumme insgesamt jedoch geringer als die der Kontrollvariante (Abb. 4.2). Dies ist auf häufigere und intensivere Frost-Tau Ereignisse unter derzeitigen Klimaverhältnissen zurückzuführen. Eine Vorstudie mit kleineren Bodenkernen erbrachte ebenso moderate Änderungen des



Abb. 4.1: Automatisches Treibhausgas-Messsystem am TERENO-Standort Rottenbuch. (Foto: Ralf Kiese, KIT IMK-IFU)

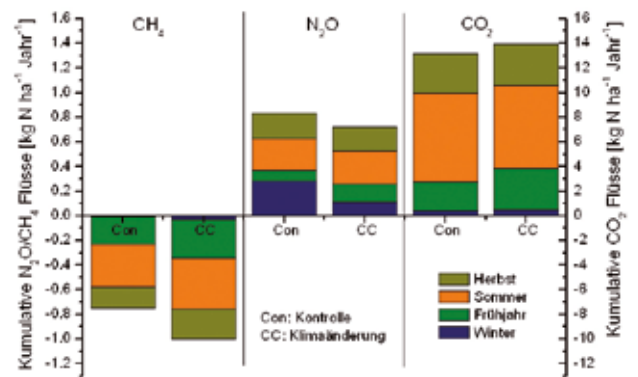


Abb. 4.2: Vergleich saisonaler und jährlicher Treibhausgasflüsse von Graslandböden unter normalen und prognostizierten Klimaverhältnissen. (Grafik: Ralf Kiese, KIT IMK-IFU)

THG-Austauschs von Grünlandböden im ersten Jahr. Jedoch wurde nach drei Jahren unter Klimawandelbedingungen eine signifikante Abnahme der Boden C- und N-Gehalte beobachtet. Das in-situ Klimawandelexperiment zum THG-Austausch von Grünlandböden geht damit nun in die „heiße Phase“.

Gekoppelte Modellierung von Vegetation-Atmosphäre Wechselwirkungen mit WRF/Expert-N

Der Einfluss der Vegetationsbeschreibung in Landoberflächenmodellen spielt in regionalen Wetter- und Klimasimulationen eine wichtige Rolle. Das Ökosystemmodell Expert-N wurde an das regionale Wetter und Klimamodell WRF gekoppelt. Es beinhaltet verschiedene Teilmodelle für Bodenprozesse (Wasser und Nährstofftransport bzw. Umsatz) und Pflanzenwachstum (landwirtschaftliche Kulturen, Grünland und Wald) und kann zu einem kompletten Boden-Pflanzen Modell kombiniert werden. Expert-N wurde derart erweitert, dass es möglich ist, flächiges Pflanzenwachstum zu modellieren.

Bei der Kopplung spielen Flüsse latenter und fühlbarer Wärme sowie die atmosphärische Rückstrahlung eine wichtige Rolle. Ändern sich diese, hat dies Auswirkungen auf die thermodynamischen Größen des Wettermodells. Durch die Rückkopplung dieser Änderungen auf das Pflanzenwachstumsmodell wird auch das simulierte Pflanzenwachstum beeinflusst (Abb. 4.3). Durch die verbesserte mechanistische Darstellung der Pflanzenwachstumsprozesse kann eine genauere Vorhersage des Pflanzenwachstums und des Wetters bzw. des Klimas erreicht werden, falls diese höhere Modellkomplexität zu realistischeren Simulationen des Blattflächenindex führt.

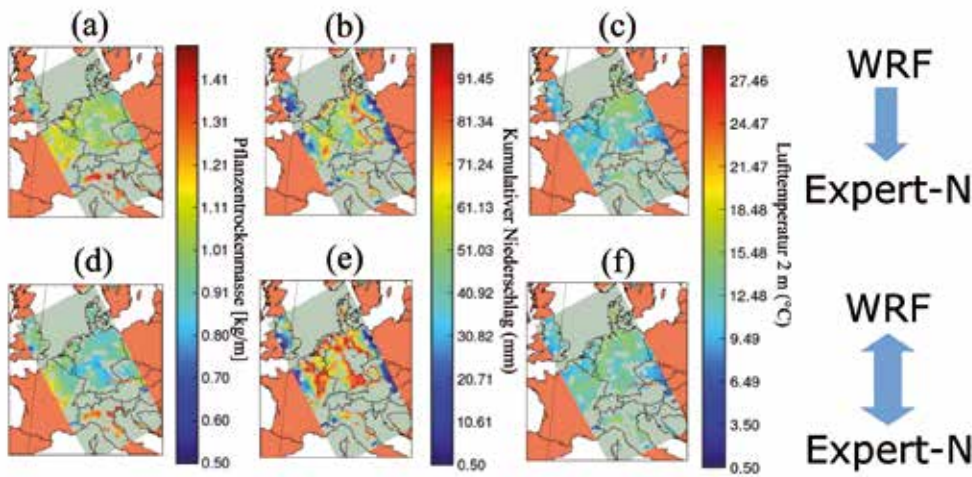


Abb. 4.3: Einfluss der Rückkopplungsart auf den Biomassezuwachs von Grünland (Tafeln a, d), die kumulativen Niederschlagsmengen (Tafeln b, e) und die Temperaturen (Tafeln c, f) im September 2010. Die Tafeln a-c zeigen Ergebnisse von Simulationen ohne Rückkopplung und die Tafeln d-f mit Rückkopplung der Stoffflüsse zwischen dem Landoberflächenmodell (Expert-N) und dem Wettermodell (WRF). (Grafik: Christian Klein, HMGU)

Einen weiteren Einfluss auf den Blattflächenindex bzw. auf die Flüsse hat die Bewirtschaftung der Agrarflächen, die vor allem mit mechanistischen Pflanzenmodellen gut dargestellt werden können.

Der Einfluss bodenhydraulischer Eigenschaften auf die Modellierung von Landoberflächen

Um den Transport von Bodenwasser generell modellieren zu können, müssen die hydraulischen Eigenschaften des Bodens bekannt sein. Dies ist in der Realität leider nicht der Fall. Jedoch wird die Bodentextur, wie beispielsweise Sand- und Tongehalt, regelmäßig von staatlichen Behörden überwacht. Um bodenhydraulische Eigenschaften aus der Bodentextur abzuleiten, werden daher sogenannte Pedotransfer-Funktionen (PDF) verwendet. Es wurde untersucht, wie sich Unsicherheiten in den PDFs in Unsicherheiten der hydrologischen Zustände, wie z.B. Bodenfeuchte oder Abflussmenge, übertragen (Abb. 4.4). Es konnte gezeigt werden, dass Beobachtungsfehler am wenigsten zu den Unsicherheiten in Wassergehalt-Saugspannungs-Kurven (WSK) beitragen. Fehler in der Bestimmung der Bodentextureigenschaften tragen hingegen am Stärksten zur Unsicherheit bei. Als Letztes liefert die Repräsentativität des ausgewählten Kalibrationsdatensatzes eine mittlere Unsicherheit in den WSKs.

Im nächsten Schritt wurde untersucht, wie sich gegebene Unsicherheiten in prognostischen Variablen eines hydrologischen Modells manifestieren (Abb. 4.5). Die Abflussmenge von Bodenwasser reagiert sehr unempfindlich auf Unsicherheiten in PDFs, während die Ergebnisse in der Bodenfeuchte sehr

stark und nicht-linear von Parametervariationen abhängen. Während sich die Fehler in der Bestimmung bodenstruktureller Eigenschaften am stärksten in den WSKs auswirken, mitteln sich diese im hydrologischen Modell weitestgehend heraus und führen so nur zu kleinen Unsicherheiten in den Modellergebnissen. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn die Fehler in der Texturbeschreibung zufällig verteilt sind. In den meisten Texturdatensätzen fehlen aber wichtige Informationen wie z. B. die Bodendichte. Unterschiedliche Methoden, die Bodendichte abzuschätzen, liefern daher große Unsicherheiten, insbesondere für gesättigte Bodenfeuchtegehalte. Der Einfluss ist dann ebenso groß wie die Unsicherheit aufgrund der Repräsentativität des Kalibrierdatensatzes.

Daher ist die Kenntnis der Bodeneigenschaften entscheidend für die Modellierung von Landoberflächen. Parameterunsicherheiten in PDFs beeinflussen die verwendeten Bodenfeuchteabschätzungen, z.B. in Analysen saisonaler Trockenheit. Die Unsicherheiten sind jedoch im Rahmen von Modellierungen abschätzbar. Unsere Studie konnte nun zeigen, dass die Qualität der Eingabeparameter von Bodentextureigenschaften die Unsicherheit der Ausgabewerte in gleicher Größenordnung bestimmt. Dieser Fehler ist unumgänglich in einer Modellierung, er muss daher vorab bestimmt und zur berechneten Unsicherheit der Ergebnisse hinzugezählt werden.

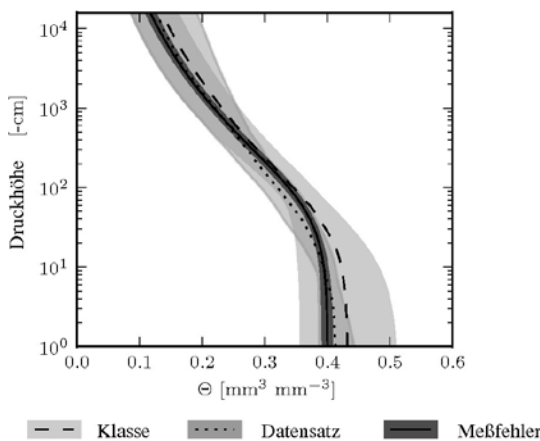


Abb. 4.4: Unsicherheitsspanne der Wassergehalt-Saugspannungs-Kurven für drei Unsicherheiten für eine deutsche Bodenklasse: „Messfehler“ ist die Unsicherheit aufgrund der Beobachtungsfehler, „Datensatz“ aufgrund mangelnder Repräsentativität des Kalibrationsdatensatzes und „Klasse“ ist die Variation innerhalb der Bodenklasse. Linien zeigen die Mediane an. (Grafik: Maren Göhler, UFZ)

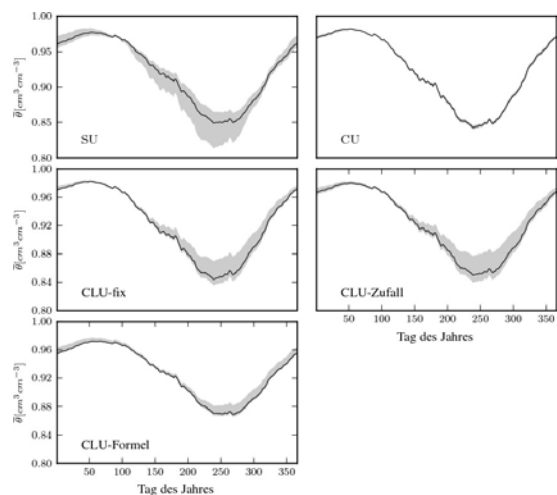


Abb. 4.5: Durchschnittliche Bodenfeuchtevariabilität des Einzugsgebietes für fünf verschiedene Unsicherheitsursachen: SU: Repräsentativitätsfehler, CU: Beobachtungsfehler, CLU: Fehler in bodenstrukturellen Eigenschaften, CLU-fix weist eine fest vorgegebene Dichte für jede deutsche Bodenklasse aus, CLU-Zufall weist einen Zufallswert aus einer beobachtungs-basierten Spannweite aus, und CLU-Formel berechnet die Bodendichte mittels einer Regressionsanalyse aus natürlichen Böden. Schattierte Bereiche markieren Spannweite zwischen höchster und niedrigster Schätzung, Linien zeigen den Median an. (Grafik: Maren Göhler, UFZ)

5

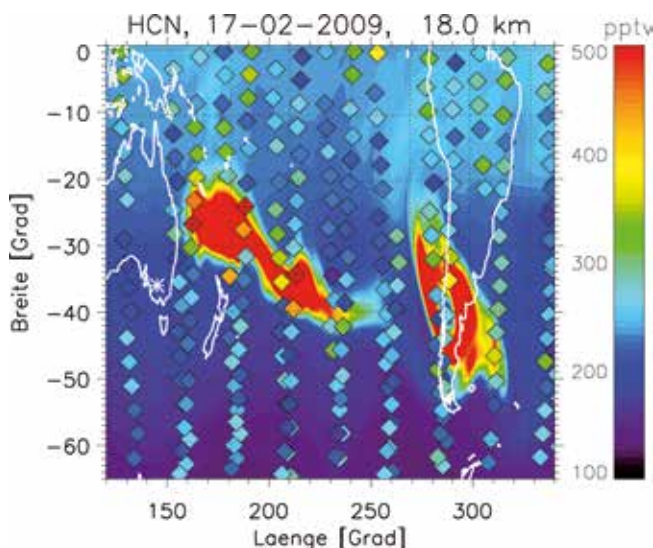
Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala

Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst?

Die an diesem Thema beteiligten Wissenschaftler untersuchen den Einfluss atmosphärenchemischer Prozesse auf das Klimasystem und leisten einen Beitrag zur Entwicklung gekoppelter Chemie-Klimamodelle, die dann eine verfeinerte Untersuchung regionaler Klimaänderungen ermöglichen. Die Arbeiten des letzten Jahres decken ein breites Spektrum ab, von der Auswertung von Satellitenmessungen über die Untersuchung natürlicher Schwebeteilchen bis hin zur Verbesserung des Spurengastransports in der Tropopausenregion (Grenzhöhe zwischen dem unteren Atmosphärenbereich, der Troposphäre, und der darüber liegenden Stratosphäre) und der Untersuchung des Einflusses der solaren Variabilität auf das Klimasystem.

Nutzung von Satellitendaten

In einer Fallstudie über die verheerenden Waldbrände in Südost-Australien im Februar 2009 konnte anhand von Daten des Satelliteninstrumentes MIPAS gezeigt werden, dass Spurengase wie beispielsweise Blausäure, die von den dortigen Feuern emittiert wurden, bis in die Stratosphäre gelangten und global verteilt wurden (Abb. 5.1). Solche Feuer stellen eine Herausforderung an die Modellierung dar, da sowohl die Stärke der Emissionen als auch die effektive Höhe, in der die Emissionen in die Atmosphäre gelangen, nur ungenau bestimmt werden können. Zudem sind Feueremissionen extrem variabel,



und diese Variabilität muss auch in Chemie-Klimarechnungen berücksichtigt werden.

Weitere Studien basieren auf der GPS-basierten Radiookkultationsmethode. Es konnten erstmals realistische horizontale Wellenlängen und Impulsflüsse von Schwerewellen mit Radiookkultationsdaten der COSMIC-Mission im globalen Maßstab bestimmt werden (Faber et al., 2013). Neuere Untersuchungen zur Temperaturvariabilität in der tropischen UTLS (Höhenbereich der oberen Troposphäre - unteren Stratosphäre) aus kombinierten Radiookkultationsdatensätzen zwischen 2001 und 2013 manifestieren den bereits beschriebenen positiven Temperaturtrend in den Tropen im Höhenbereich zwischen 17 und 22 km (REKLIM-Newsletter Nr. 2, S. 13, 2012). Aktuell wird daran gearbeitet dieses Trendmuster mittels anderer Datensätze zu verifizieren und zu erklären.

Klimawirkung von Aerosolen

Basierend auf Laboruntersuchungen an der großen atmosphärischen Simulationskammer AIDA wurden neue Modellparameterisierungen entwickelt, die das Eisbildungsverhalten biologischer Aerosole (u. a. Sporen, Pollen und Bakterien) beschreiben. Dabei zeigte sich, dass vor allem einige Bakterien bereits bei relativ hohen Temperaturen gute Nukleationskeime bilden, wohingegen andere biologische Partikel eher schlechtere Eisbildner sind als Staub. Die Anwendung dieser Parameterisierungen im regionalen Modell COSMO-ART zeigt jedoch, dass die biologischen Partikel nur in geringen Konzentrationen in Wolkenhöhe präsent sind und daher ihr Einfluss auf die Eisbildung in Wolken gering ist.

Des Weiteren wirkten REKLIM Wissenschaftler an einer großangelegten Studie zum Einfluss von Rußpartikeln auf das Klima mit (Bond et al., 2013) und untersuchten den Einfluss von Aerosolen auf den asiatischen Sommermonsun (Fadnavis et al., 2013).

Abb. 5.1: Konzentrationsverteilung von Blausäure aus Feuern in Südost-Australien im Februar 2009 in 18 km Höhe (d.h. in der Stratosphäre). Die Rauten stellen die MIPAS Beobachtungen dar, die farbigen Flächen im Hintergrund sind Modellrechnungen mit dem GEM-AQ Modell. (Quelle: Glatthor et al., 2013)

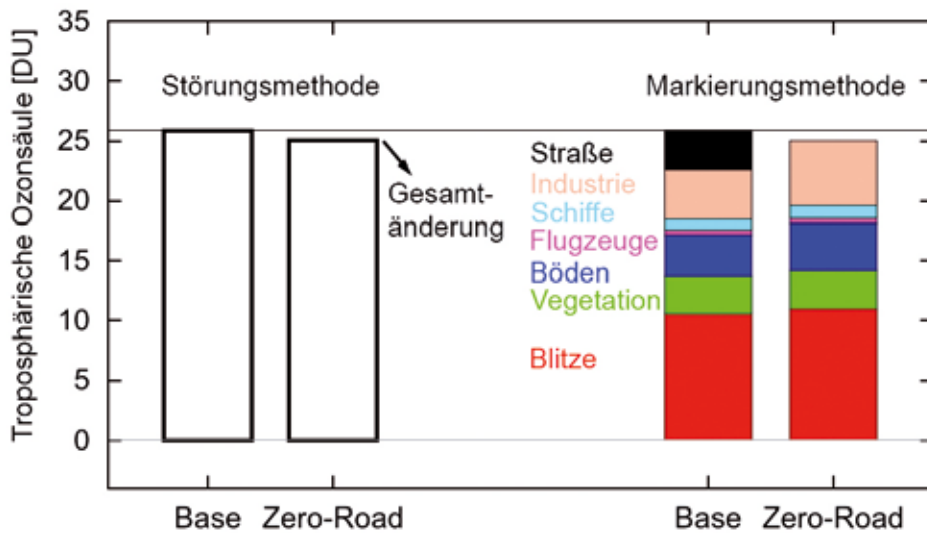


Abb. 5.2: Troposphärische Ozonsäule in Dobson-Einheiten (DU) für eine Referenzsimulation (Base) sowie eine Simulation ohne Straßenverkehrsemissionen (Zero-Road). Links sind Ergebnisse des Störungsansatzes und rechts mittels der „Tagging“-Methode dargestellt. (Quelle: Grewe et al., 2012)

Einfluss des Straßenverkehrs auf Luftqualität und Klima in Europa

Der Straßenverkehr ist eine wesentliche Quelle für Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, aus denen im Sommer Ozon gebildet wird, welches eine toxische Wirkung auf Lebewesen und Pflanzen hat und zudem ein Treibhausgas ist. Der Einfluss des Straßenverkehrs auf die Luftqualität und das Klima in Europa wird im Rahmen eines DLR-Projekts anhand von Rechnungen mit dem MECO(n) Modellsystem (Kerkweg und Jöckel, 2012) untersucht, das von der globalen Skala bis zu Auflösungen von wenigen Kilometern genutzt werden kann.

Anhand von speziell markierten Modellspezies („Tagging“-Methode) sollen die Reaktionswege der chemischen Spezies aus unterschiedlichen Quellen zurückverfolgt werden, ohne das System zu stören, wie es bei Sensitivitätsrechnungen mit geänderten Emissionen der Fall wäre. Die Abbildung 5.2 zeigt einen Vergleich der beiden Methoden von Grewe et al. (2012), welche die Vorteile der „Tagging“-Methode für das Projekt hervorhebt. Die Ergebnisse aus dem Störungsansatz (links) würden vermuten lassen, dass der Beitrag des Straßenverkehrs auf den Ozongehalt der Troposphäre nur gering ist. Nutzt man jedoch die „Tagging“-Methode (rechts), so ist deutlich

zu erkennen, dass der Beitrag des Straßenverkehrs deutlich größer ist. Diese Fehlinterpretation lässt sich auf eine Steigerung der Effizienz der Ozonproduktion aus den übrigen Quellen zurückführen, wenn die Emissionen des Straßenverkehrs nicht vorhanden sind. Diese Nichtlinearität wird im Störungsansatz jedoch nicht berücksichtigt.

Transport in der Tropopausenregion

Die obere Troposphäre ist für den Klimawandel von besonderer Bedeutung, da Treibhausgase dort einen großen Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre haben. Dementsprechend ist es wichtig, gerade in dieser Region, die durch große Konzentrationsunterschiede geprägt ist, die Transportprozesse von Spurenstoffen akkurat wiederzugeben. Klassische Klimamodelle, zumal in relativ grober Auflösung, tendieren dazu, die Spurengase aus der Troposphäre (dazu gehört auch der Wasserdampf) zu schnell in die untere Stratosphäre zu bringen. Durch den Einsatz eines anderen Transportschemas kann dieser Effekt vermieden werden (Abb. 5.3).

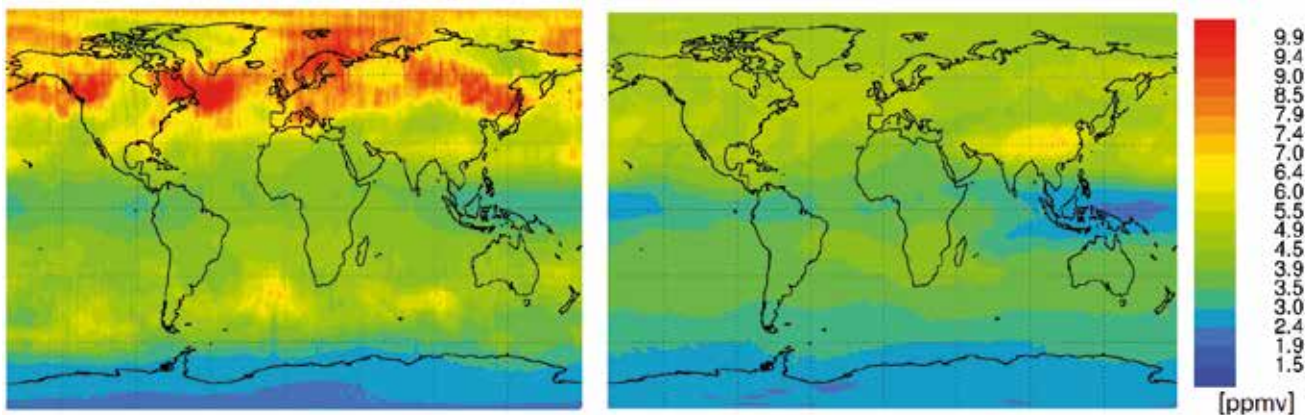


Abb. 5.3: Modellsimulationen von Wasserdampf in der unteren Stratosphäre mit zwei verschiedenen Transportschemata. Links die Ergebnisse von EMAC mit dem klassischen semi-lagrangischen Schema, rechts die Ergebnisse mit dem neuen gekoppelten Trajektorienmodell EMAC-CLaMS. Während der Wasserdampf im klassischen Modell in der Sommerhemisphäre deutlich überschätzt wird, zeigen erste Ergebnisse des neuen Modellsystems hier niedrigere Werte. (Quelle: Charlotte Hoppe, KIT)

6 Extreme Wetterereignisse – Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren

Wie wird sich die Ausprägung und Häufigkeit extremer Wetterereignisse in einem zukünftigen Klima verändern?

In den vergangenen Jahren kam es in Deutschland und weltweit zu einer Vielzahl von Naturkatastrophen, die mit erheblichen Schadenssummen und Verlusten von Menschenleben verbunden waren. So führte beispielsweise Hurrikan Sandy im Oktober/November 2012 zu Schäden in Höhe von fast 100 Mrd. US\$. In Deutschland waren die Folgen des Junihochwassers 2013 noch gravierender als die der Jahrhundertflut von 2002. Obwohl diese Beispiele nur singuläre Ereignisse sind, stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise derartige Katastrophen neben gesellschaftlichen und sozio-ökonomischen Veränderungen auch durch den anthropogen bedingten Klimawandel mit bestimmt sind. Im Rahmen von Thema 6 werden verschiedene Analysen zu meteorologischen Extremereignissen wie tropische Zyklonen, Starkniederschlägen und damit verbundenen Überschwemmungen sowie Hagelstürmen durchgeführt.

Tropische Zyklonen über dem Nordwestpazifik und Südostasien in einer regionalen Klimasimulation

Starke Taifune beeinflussen die Subtropen und ihre Bewohner im westlichen Pazifik immer stärker. Für den nordwestlichen Pazifik zeigen mehrere Beobachtungsdatensätze („best track data“) verschiedener meteorologischer Institute jedoch große Unterschiede in den Trends der tropischen Zyklonenaktivität für die letzten Jahrzehnte. Regionale atmosphärische Klimamodelle stellen hier eine Alternative zu den Beobachtungen dar. Sie verfeinern globale, gegitterte Wetterdaten (Reanalysen) und produzieren damit möglichst homogene Datensätze.

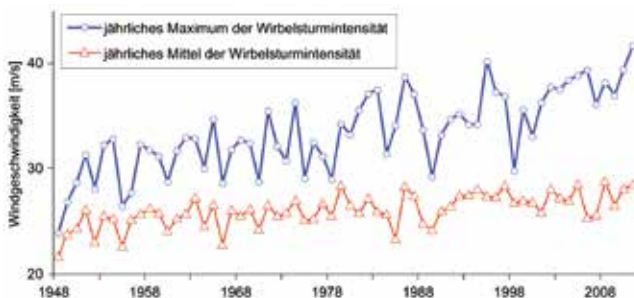


Abb. 6.1: Jährliche Maxima und jährliche Mittel der tropischen Zyklonenintensität von allen verfolgten tropischen Zyklonen im Regionalmodell CCLM. Die Intensität ist dargestellt als maximale Windgeschwindigkeit in Bodennähe. Die X-Achse zeigt die Zeit in Jahren. (Grafik: Monika Barcikowska, HZG)

So können Änderungen der Anzahl und Intensität tropischer Wirbelstürme für die letzten Jahrzehnte zuverlässiger bestimmt werden.

Die Variabilität starker tropischer Zyklonen im Regionalmodell zeigt gute Übereinstimmungen mit Beobachtungen, sowohl zwischenjährlich als auch für dekadische Zeiträume. Die jährliche Anzahl der Tage, an denen tropische Zyklonen auftraten, nahm zwischen 1948 und 2011 zu; im letzten Jahrzehnt gab es jedoch auch eine kurze Abnahme. Im südchinesischen Meer gibt es einen zunehmenden Trend, der allerdings hauptsächlich auf die Zunahme schwächerer Stürme zurückzuführen ist. Im südöstlichen Bereich des nordwestlichen Pazifiks zeigt sich eine abnehmende Tendenz der tropischen Zyklonenaktivität. Der regionale Modellauf beschreibt insgesamt eine Zunahme der Anzahl und Intensität (Abb. 6.1) und eine nordwestwärts gerichtete Verlagerung der Zugbahnen tropischer Wirbelstürme für die letzten rund 60 Jahre; dies wird auch durch jüngste Beobachtungsdaten bestätigt.

Die Rolle von Wasserbau und Klima bei Hochwassertrends am Rhein

Je nach betrachtetem Zeitraum ist an Pegeln entlang des Rheins eine deutliche, zum Teil statistisch signifikante, Zunahme von Hochwasserabflüssen zu verzeichnen. So zeigt beispielsweise die gemessene Abflusszeitreihe am Pegel Worms eine signifikante relative Änderung der Hochwasserabflüsse von wenigen Prozent bis zu 100% bezogen auf den Mittelwert in der jeweiligen Periode (Abb. 6.2 A). Am GFZ wurde der Frage nachgegangen, durch welche Faktoren die Abflusstrends im Wesentlichen bestimmt werden: Klimavariabilität oder Wasserbaumaßnahmen, wie die Begradigung des Rheinhauptstroms im Zuge der Errichtung von Wasserkraftanlagen am Oberrhein im Zeitraum von 1955 bis 1977, sowie der Ausbau von Hochwasserretentionsflächen. Durch eine modellbasierte Homogenisierung von Hochwasserabflüssen wurden an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Analysen erstellt, mit deren Hilfe Abflüsse ohne wasserbauliche Maßnahmen am Rhein nach 1955 rekonstruiert werden konnten. Dabei zeigt sich, dass die relativen Änderungen bei den Hochwassertrends um bis zu 25% geringer ausgefallen wären (Abb. 6.2 B). Das entspricht dem Anteil der Wasserbaumaßnahmen an der Hochwasserzunahme. Das restliche Zunahmesignal, bereinigt von dem Einfluss der Wasserbaumaßnahmen, scheint großräumig zu sein und deutet auf einen großskaligen Treiber wie Klimavariabilität oder Klimawandel hin.

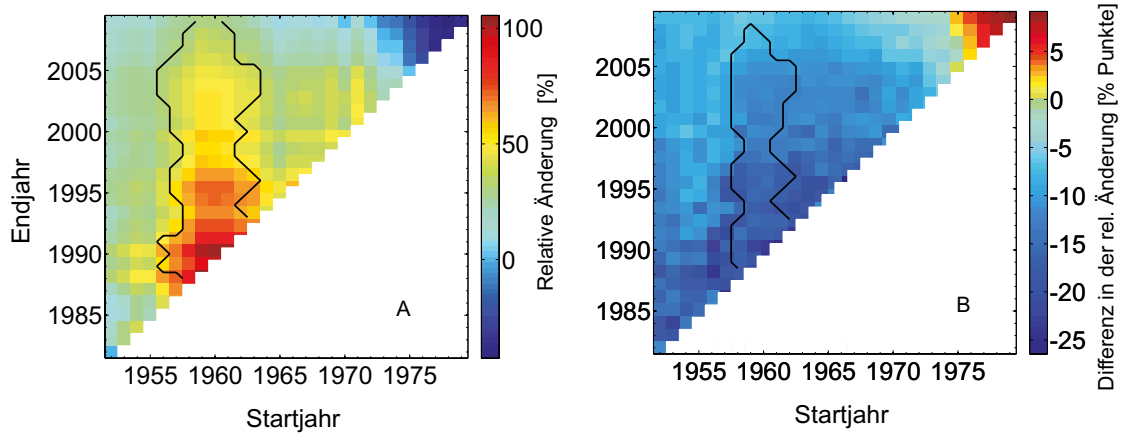


Abb. 6.2: (A) Trendanalysen von gemessenen Hochwasserabflüssen für verschiedene Perioden (unterschiedlicher Anfangs- und Endpunkt der Zeitreihe) am Pegel Worms, charakterisiert durch die relative Änderung des Abflusses in Bezug auf den Mittelwert in der jeweiligen Periode. (B) Differenz zwischen relativen Hochwasserabflussänderungen in gemessenen und homogenisierten Zeitreihen. Schwarze Konturlinien zeigen statistisch signifikante Änderungen (5% Signifikanzniveau). (Grafik: Sergiy Vorogushyn, Bruno Merz, GFZ)

Meteorologische Extremereignisse in regionalen Klimamodellen

In einer Studie am UFZ wurde untersucht, inwieweit RCMs in der Lage sind, beobachtete Extreme wiederzugeben. Dazu wurden für zwölf RCMs des ENSEMBLES Projekts extreme Temperatur- und Niederschlags-Indizes für den Zeitraum von 1960–2000 berechnet und mit denen von Beobachtungen verglichen (relative Abweichungen von -40% bis +40%). Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit ein Ensemble aus mehreren Modellen in der Lage ist, die beobachteten Indizes besser wiederzugeben als einzelne Modelle. Als Kriterium wurde der prozentuale Anteil der signifikanten Indizes gewählt. Dazu wurde an jeder Gitterzelle der Prozentsatz „R“ an Indizes bestimmt, die einen signifikanten Unterschied zu den Beobachtungen aufweisen, und dann das räumliche Mittel von „R“ gebildet („mittleres R“ in Abb. 6.3). Die Analyse zeigt, dass Kombinationen von fünf bzw. sechs Modellen ein niedrigeres „mittleres R“ gegenüber dem Ensemble aus allen Modellen aufweisen und durch geeignete Auswahlmethoden gefunden werden können. Eine Methode wählt zunächst die beste Kombination von zwei Modellen aus und fügt schrittweise ein weiteres Modell hinzu (Vorwärts Auswahl). Eine andere Methode beginnt mit der Kombination aller Modelle und entfernt schrittweise ein Modell (Rückwärts Eliminierung). Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass selbst die beste Kombinationsmöglichkeit (E5 in Abb. 6.3, unten) noch signifikante Abweichungen vor allem in den Gebirgslagen von Deutschland aufweist.

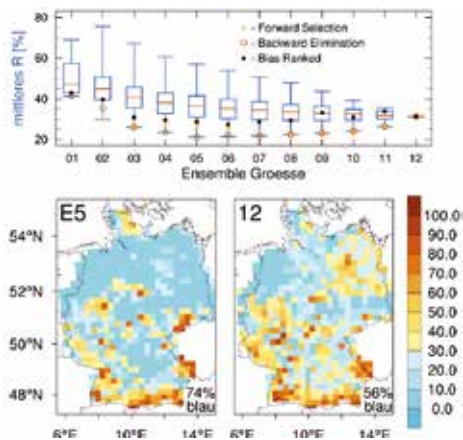


Abb. 6.3: Oben: Variabilität des mittleren Prozentsatzes an signifikanten Extrem-Indizes (5% Signifikanzlevel) in Abhängigkeit von der Ensemblegröße (Boxplots). Des Weiteren ist das „mittlere R“ der Kombinationen dargestellt, die durch verschiedene Auswahlmethoden gefunden wurden. Unten: Räumliche Variabilität des Prozentsatzes an Extrem-Indizes für die beste Kombination von fünf Modellen, welche durch die Rückwärts Eliminierung (E5) ausgewählt wurde, sowie das Ensemble aller Modelle (12). (Grafik: Stephan Thober, UFZ)

Entwicklung und Anwendung eines logistischen Hagelmodells

Um die zeitliche Variabilität von Hagelstürmen, die von operationellen Messungen nur unzureichend erfasst werden, statistisch zu analysieren, wurde am KIT ein logistisches Hagelmodell (multivariates Analyseverfahren) entwickelt. In dem Modellansatz werden verschiedene, für Konvektion relevante meteorologische Größen (z.B. Konvektionsenergie, Feuchtegehalt, großräumige Wetterlagen) in geeigneter Weise miteinander kombiniert. Das Ergebnis ist ein neuer Index, der das Potential der Atmosphäre für die Entstehung von Hagel beschreibt, und daher als potentieller Hagelindex (PHI) bezeichnet wird (Abb. 6.4). Basierend auf regionalisierten ERA-40 Reanalysen zeigt der PHI für Deutschland in der Vergangenheit einen deutlichen Nord-Süd-Gradienten mit größten Werten im Süden. Basierend auf Regressionsanalysen des PHI konnte damit erstmals gezeigt werden, dass zwischen 1971 und 2000 das Hagelpotential der Atmosphäre deutlich zugenommen hat. Angewendet auf ein Ensemble aus sieben RCMs wird deutlich, dass das Potential für Hagelereignisse in der Zukunft leicht zunehmen wird. Dies betrifft insbesondere den Nordwesten (ohne Nordsee) und den Süden von Deutschland.

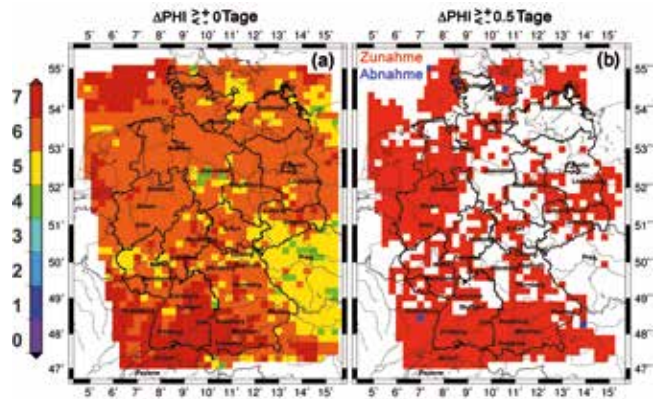


Abb. 6.4: Zusammenfassende Darstellung der Änderung des potentiellen Hagelindex PHI zwischen 2021-2050 und 1971-2000 anhand eines Ensembles aus sieben regionalen Klimasimulationen: (a) Anzahl der Läufe, die eine Zunahme zeigen, (b) nur Zu- oder Abnahme, wobei rot bedeutet, dass 5 bis 7 Modelle eine Zunahme bzw. 0 bis 2 Modelle eine Abnahme zeigen (blau invers). Hier wurden nur Änderungen berücksichtigt, die größer als 0,5 PHI in dem jeweiligen regionalen Klimalauf sind. (Grafik: Susanna Mohr und Michael Kunz, 2013)

7

Sozioökonomie und Management für regionale Klima-Anpassungs- und Vermeidungsstrategien

Integrierte Klimapolitik heißt Vermeidung (Mitigation) von Treibhausgasemissionen und Anpassung (Adaptation) an den Klimawandel. Gibt es dafür einen optimalen Weg?

Thema 7 nimmt sich der Fragen integrierter Klimapolitik im Rahmen einer kontinuierlichen wissenschaftlichen Begleitung und Analyse der klimapolitischen Verhandlungen auf internationaler Ebene an. Basierend auf den hieraus resultierenden Einsichten wurden zwei besonders drängende Forschungsfragen identifiziert und vertieft bearbeitet. Erstens besteht der Bedarf, die im Rahmen der COP17 (Durban) und COP18 (Doha) beschlossenen Klimafinanzierungsinstrumente zur Unterstützung von Entwicklungsländern kritisch hinsichtlich Anreizwirkungen und der Fähigkeit zur nachhaltigen Mittelbereitstellung zu hinterfragen. Zweitens gilt es zu prüfen, ob der derzeitige Trend zur Priorisierung anpassungspolitischer Maßnahmen dem Leitbild eines optimalen klimapolitischen Strategiemix gerecht wird.

Klimafonds im Post-Kyoto-Prozess – Spielt die Art der Finanzierung eine Rolle?

Mit den jüngsten UN-Klimakonferenzen wurde der Weg für eine neue Architektur der internationalen „Climate Finance“ bereitet. Diese umfasst Instrumente zur finanziellen Unterstützung klimapolitischer Maßnahmen in Entwicklungsländern durch Industrienationen, die im Wesentlichen vier unterschiedliche Zweckbindungen der bereitgestellten Mittel vorsehen. So sind die Instrumente auf eine Kompensation der Anpassungs-, Vermeidungs-, der potentiellen oder der tatsächlichen Schadenskosten der Entwicklungsländer ausgerichtet.

Bislang beschränkt sich die Diskussion jedoch überwiegend auf die Höhe der Transferzahlungen. Allerdings ist es angesichts der Tatsache, dass verbindliche Zahlungszusagen noch

ausstehen, von essentieller Bedeutung, die ökonomischen Anreize, die von den unterschiedlichen Finanzierungsarten ausgehen, zu analysieren. Schließlich erfolgt die Finanzierung auf freiwilliger Basis, weshalb die Länder nur zu einem effektiven Engagement bereit sind, wenn sie sich dadurch besserstellen.

Vor diesem Hintergrund hat das UFZ in Leipzig in Kooperation mit der Europa-Universität Viadrina in Frankfurt (Oder) im Rahmen einer spieltheoretischen Analyse die vier Finanzierungsansätze auf Minimalanforderungen für eine Besserstellung der Geber- und Nehmerländer geprüft – siehe Abbildung 7.1 für den Modellrahmen. Damit es zu einer Besserstellung kommt, müssen die Instrumente durch eine geschickte Kopplung der Transferzahlungen der Geberländer an bestimmte Gegenleistungen der Nehmer (wie z.B. erhöhte Anpassungs- oder Vermeidungsanstrengungen) Anreize für eine Anhebung der globalen Vermeidungsleistung schaffen, da diese bekanntlich in der gegenwärtig vorliegenden Situation ohne weltweites Klimaschutzabkommen unter Effizienzgesichtspunkten zu gering ausfällt. Zum anderen müssen insbesondere die Nehmerländer zu höheren Beiträgen zum globalen öffentlichen Gut der Vermeidung veranlasst werden. Anderenfalls erhalten die Geberländer keinerlei Gegenleistung für ihre Transferzahlung, womit ausgeschlossen ist, dass sie sich durch ihr finanzielles Engagement besserstellen.

Die Analyse zeigt, dass die Finanzierungsansätze, die auf eine Kompensation der tatsächlich angefallenen Schadenskosten bzw. der Anpassungskosten abstellen, die Minimalanforderung

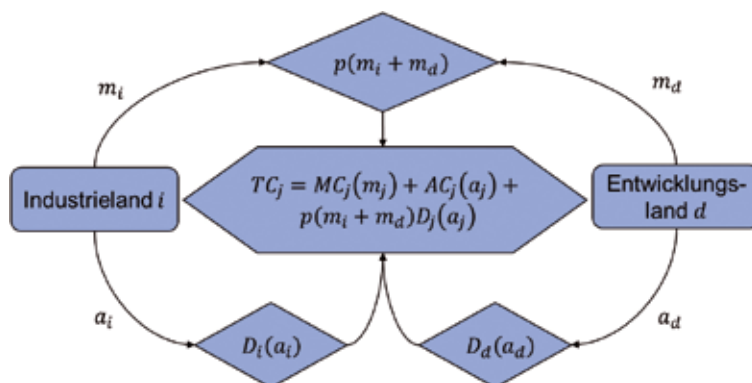


Abb. 7.1 : Spieltheoretischer Modellrahmen (Klimafinanzierung): Zwei Länder $j=i$ (Industrieland), $j=d$ (Entwicklungsland) können dem Klimawandel durch Mitigations- (m_j) oder Adaptationsanstrengungen (a_j) entgegenreten. Beide Strategien gehen mit Kosten $MC_j(m_j)$ bzw. $AC_j(a_j)$ einher. Aus Sicht der Länder handelt es sich bei der Mitigation um ein globales öffentliches Gut, das die globale Wahrscheinlichkeit klimawandelbedingter Schäden $p(m_i+m_d)$ schmälert. Hingegen ist der Nutzen der Adaptation rein privater Natur, d.h. durch die Anpassung eines Landes verringern sich ausschließlich dessen Schadenskosten $D_j(a_j)$, nicht aber die des Nachbarlandes. Beide Länder haben risikoneutrale Präferenzen und minimieren somit in dem für den Post-Kyoto-Prozess relevanten, nicht-kooperativen Fall, ihre nationalen Gesamtkosten TC_j . Diese setzen sich zusammen aus Vermeidungs-, Anpassungs- und erwarteten Schadenskosten. Da Emissionen essentiell sind für jegliche ökonomische Aktivität, werden diese – und somit notwendigerweise auch die Mitigation – in der ersten Spielstufe, d.h. vor der Adaptationsanstrengung (zweite Spielstufe) festgelegt. Das relevante Lösungskonzept ist somit das teilspielperfekte Gleichgewicht. (Grafik: UFZ)

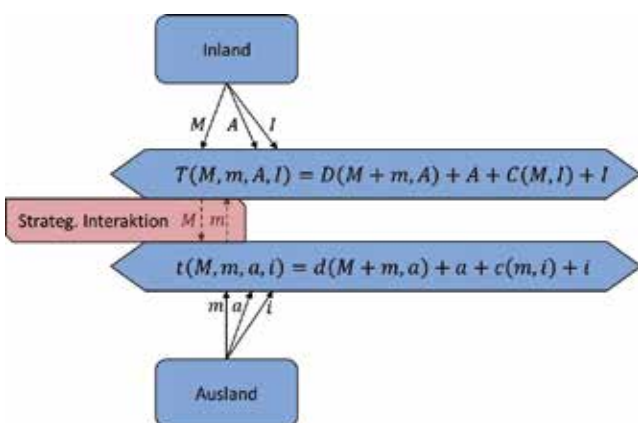


Abb. 7.2: Atomausstieg und Dekarbonisierung der Energieerzeugung in Deutschland gehen mit immensen (Investitions-) Kosten einher. Einerseits ist ein massiver Ausbau von Anlagen zur Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen erforderlich. Andererseits gilt es das Stromnetz an die veränderten Anforderungen anzupassen. So ist etwa durch den Ausbau des Übertragungsnetzes sicherzustellen, dass der vorrangig im Norden erzeugte Strom aus Windkraft in die Großverbrauchszentren im Westen und Süden der Republik transportiert werden kann. (Foto: picture-alliance, ZB)

für Finanzierungsbeiträge verfehlen und somit nicht imstande sind, eine nachhaltige Mittelbereitstellung zu gewährleisten. Entsprechend sollte im Rahmen zukünftiger Finanzierungsverhandlungen von diesen Ansätzen abgesehen werden. Als grundsätzlich geeignet für eine nachhaltige Klimafinanzierung erweisen sich dagegen Instrumente, welche die Vermeidungskosten bzw. die potentiellen Schadenskosten der Entwicklungsländer bzgl. Klimawirkungen adressieren, wie z.B. das NAMA-(Finanzierungs-)Programm der UNFCCC (Nationally Appropriate Mitigation Actions) bzw. der Fonds der GEF (Global Environmental Facility).

Der (optimale) klimapolitische Mix und die strategische Bedeutung von Klimaschutzinvestitionen und Anpassungsmaßnahmen

Die Option der Anpassung an den Klimawandel ist im Begriff, Klimaschutzbemühungen immer weiter in den Hintergrund zu drängen. Ein wesentlicher Grund für diese Prioritäten-Verschiebung ist die Auffassung, dass die Anpassung im klimapolitischen Strategiemix im Vergleich zur Vermeidung die deutlich kostengünstigere Option darstellt. Dieser Eindruck bestätigt sich durch die Erfahrungen mit der deutschen Energiewende. Hier wird deutlich, dass eine ambitionierte Klimaschutzpolitik massive Infrastrukturinvestitionen voraussetzt (Abb. 7.2).



Anpassungskosten des jeweiligen Landes. Die Vermeidungskosten werden durch die Funktionen $C(M, I)$ und $c(m, i)$ abgebildet. Diese können durch Investitionen in Vermeidungstechnologien I, i , verringert werden. Mit analoger Begründung zur Anpassung bezeichnen I, i gleichermaßen die Investitionskosten. Die Vermeidungsaktivität jedes Landes ist ein globales öffentliches Gut, d.h. sie reduziert nicht nur die Schadenskosten des Landes selbst, sondern auch die des Nachbarn und bietet somit Raum für strategische Interaktion. Im Gegensatz ist die schadenslindernde Wirkung der Anpassung rein privater bzw. nationaler Natur. Somit stellen sich die Schadenskostenfunktionen der Länder dar als $D(M+m, A)$, $d(M+m, a)$. Beide Länder minimieren im nicht-kooperativen Setting, das dem aktuellen klimapolitischen Prozess zugrunde liegt, ihre nationalen Gesamtkosten $T(M, m, A, I)$, $t(M, m, a, i)$, die sich aus Schadens-, Anpassungs-, Vermeidungs- und Investitionskosten zusammensetzen. Bzgl. der Entscheidungssequenz ist festzuhalten, dass die Länder aufgrund der langen Vorlaufzeit in einem ersten Schritt die Investitionen festlegen. Anschließend wird das Vermeidungs- vor dem Anpassungsniveau bestimmt oder umgekehrt. Das relevante Lösungskonzept ist das teilspielperfekte Gleichgewicht. (Grafik: UFZ)

Eine derartige Ausrichtung des klimapolitischen Strategiemix, die sich maßgeblich an den Kostenwirkungen der beiden Optionen orientiert, greift allerdings zu kurz. Die Priorisierung der Anpassungsoption sowie der genannte Investitionsbedarf bergen beträchtliche strategische Implikationen im Hinblick auf die globalen Vermeidungsanstrengungen in sich, die im politischen wie auch im wissenschaftlichen Diskurs bislang weitestgehend vernachlässigt wurden. In einem dazu konzipierten spieltheoretischen Modellrahmen hat das UFZ in Kooperation mit der Europa-Universität Viadrina untersucht, wie sich eine Berücksichtigung dieser beiden Aspekte auswirkt (siehe Abb. 7.3).

Die Analyse zeigt, dass eine Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen eine geringere Bereitschaft der Länder signalisiert, zum globalen öffentlichen Gut der Vermeidung beizutragen und so die globalen Klimaschutzanstrengungen hemmt. Ähnlich wirken sich die a priori vorzunehmenden Klimaschutzinvestitionen aus. Die einzelnen Länder investieren unter globalen Effizienzgesichtspunkten bewusst zu wenig, um sich so glaubhaft an geringere Klimaschutzbeiträge zu binden.

Vor diesem Hintergrund ist der gegenwärtige Trend, die Anpassungspriorisierung kritisch zu beurteilen. Um unvorhersehbare und irreversible klimawandelbedingte Schäden zu vermeiden, sollte dringend ein ausgewogener klimapolitischer Mix forciert werden, der primär auf ambitionierte Klimaschutzanstrengungen abstellt und ergänzend Anpassungsmaßnahmen vorsieht, um unvermeidliche negative Auswirkungen des Klimawandels abzufedern. Nur so kann verhindert werden, dass das strategische Verhalten der Länder in einer Abwärtsspirale hin zu immer geringeren Vermeidungsleistungen mündet.

Abb. 7.3: Spieltheoretischer Modellrahmen (klimapolitischer Strategiemix): Zwei Länder, Inland (Variablen und Funktionen in Großbuchstaben) und Ausland (Kleinbuchstaben) können dem Klimawandel durch Mitigation oder Adaptation im Umfang M, m bzw. A, a begegnen. Aufgrund der Heterogenität der Anpassung bezeichnen A, a gleichermaßen die

8

Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten

Welche Mechanismen, Prozesse und regionalen Klimamuster verstärken Klimasprünge in Warmzeiten und am Übergang von Eiszeiten in Warmzeiten? Wie unterschiedlich sind die Muster im Vergleich zur letzten Warmzeit, dem Eem, als es 1-2 °C wärmer war als heute?

Wechselwirkungen zwischen Ozean und Land: Tiefenwasserbildung im Nordatlantik und Desertifikation der Sahel

Das Wort „Sahel“ kommt aus dem Arabischen und bedeutet so viel wie Küste. Hier ist jedoch nicht die Meeresküste gemeint, sondern der Übergang von der spärlich bewachsenen Trockensavanne in eine der größten Wüsten unserer Erde, die Sahara. Das Leben in der Sahel wird entscheidend durch die Verfügbarkeit von Wasser geprägt; Niederschläge fallen in der Regel nur im Sommer. Bleiben die Sommerniederschläge aus, wird die Sahelzone zu einer lebensfeindlichen Umwelt. Mit Beginn der 1970er Jahre kam es in der Sahel zu einer katastrophalen, mehrere Jahrzehnte anhaltenden Dürre. In ersten Studien in den 1970er Jahren wurde die Trockenheit im Wesentlichen auf die Zerstörung der Vegetationsdecke durch die verstärkte Landnutzung in der Sahel zurückgeführt (die sogenannte Charney-Hypothese). Diese Hypothese besagt im Kern, dass durch die verschwindende Vegetation die Albedo der Erdoberfläche erhöht wird, was zu einer Stabilisierung der Atmosphäre und einer Reduktion der Niederschläge führt. Mitte der 1980er wurde jedoch klar, dass auch natürliche Faktoren zur Dürre beigetragen hatten. Tatsächlich zeigten Zeitreihen der Oberflächenwassertemperatur des Nordatlantiks eine Beziehung zur

zeitlichen Entwicklung des Niederschlags über der Sahel und damit einen möglichen Einfluss der Ozeanzirkulation auf die historische Dürre. Aufgrund der relativ kurzen instrumentellen Zeitreihen war bisher jedoch nicht eindeutig geklärt, inwieweit die Oberflächenwassertemperatur auch auf längeren Zeitskalen die Niederschläge und die Desertifikation der Sahelzone beeinflusst.

Die Desertifikationsgeschichte der Sahel

Tatsächlich deuten fossile, heute durch Vegetation bedeckte Dünenfelder in der Sahel darauf hin, dass es in der geologischen Vergangenheit langanhaltende Trockenperioden gegeben haben muss (Abb. 8.1a). Die Position der fossilen Dünenfelder legt nahe, dass sich die Sahara zeitweise sogar um bis zu 500 km nach Süden verlagert hat. Die genaue zeitliche Zuordnung der Dürre- und Desertifikationsperioden war bisher problematisch.

Um die Klimageschichte der Sahel und einen möglichen Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur des Nordatlantiks auf längeren Zeitskalen zu rekonstruieren, wurde im Rahmen von REKLIM ein Sedimentkernprofil entlang der Nordafrikanischen Westküste untersucht, das die Grenze zwischen Sahel und Sahara abdeckt. Die Ozeansedimente am Kontinentallhang vor Nordwest-Afrika sind ein ideales Umweltarchiv, um die Desertifikationsgeschichte der Sahel zu rekonstruieren. Während der Dürreperioden an Land werden große Mengen Mineralstaub mobilisiert und in westlicher Richtung transportiert (Abb. 8.1b). Dieser Staub wird am Meeresboden vor Nordwest-Afrika abgelagert und erlaubt Rückschlüsse auf die Aridität an Land und die Ausdehnung der Sahara.

Die Ergebnisse zeigen, dass das nordwestafrikanische Klima während der letzten 60.000 Jahre durch mehrere, bis zu einige tausend Jahre anhaltende Dürreperioden gekennzeichnet war (Abb. 8.2). Während dieser Trockenperioden wurden in den Meeressedimenten etwa 500 km südlich der heutigen Grenze zwischen Sahara und Sahel für Wüstengebiete charakteristische Staubgehalte erreicht und vermutlich auch die heute nur noch als Relikte vorhandenen Dünenfelder angelegt. Die Befunde legen nahe, dass sich die Sahel innerhalb nur weniger Jahrhunderte in einen wüstenähnlichen Zustand verwandeln kann und dass die heutige Grenze zwischen Sahel und Sahara mehrfach um einige hundert km nach Süden verschoben wurde (Abb. 8.3).

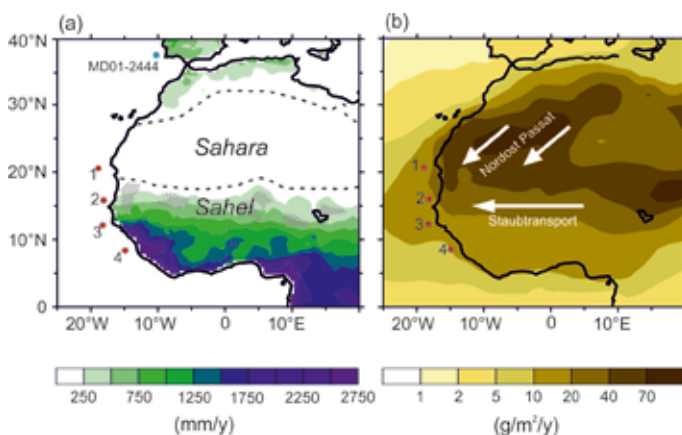


Abb. 8.1: a) Verteilung des Niederschlags über Nordwest-Afrika (in mm/y) und Kernlokalationen (rote Punkte). Die schraffierten Bereiche kennzeichnen fossile Sanddünen. b) Heutige Verteilung der Staubakkumulation ($\text{g}/\text{m}^2/\text{y}$). (Grafik: James Collins, AWI)

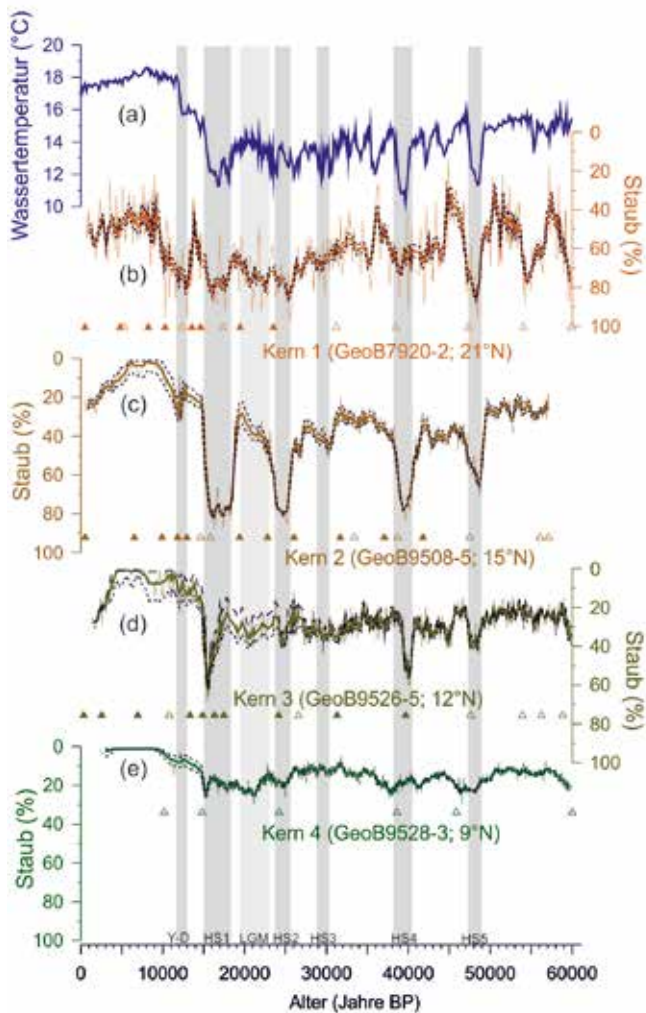


Abb. 8.2: a) Rekonstruierte Oberflächenwassertemperatur vom Kontinentalhang der Iberischen Halbinsel (Martrat et al., 2007). b-e) Staubgehalt der untersuchten Kerne vor Nordwest-Afrika. Kernlokationen siehe Abbildung 8.1. Die grauen Balken zeigen das Auftreten der Heinrich Stadiale (HS) 1-5 im Nordatlantik. (Grafik: James Collins, AWI)

Einfluss von Ozeanzirkulation und Oberflächenwassertemperatur

Welche Prozesse können derartig drastische Umweltveränderungen in der Sahel verursachen? Ein Vergleich mit Rekonstruktionen der Oberflächenwassertemperatur im zentralen Nordatlantik zeigt, dass sämtliche Trockenperioden in der Sahel mit extrem kalten Meeresoberflächentemperaturen im Nordatlantik einhergehen. Diese Kälteperioden werden den sogenannten Heinrich-Ereignissen zugeordnet, dem vermehrten Abbrechen von Eisbergen vom Laurentidischen Eisschild in Nord-Amerika während der letzten Eiszeit. Durch den massiven Süßwassereintrag durch die schmelzenden Eisberge kam es zu einer Abschwächung der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik sowie des damit einhergehenden nordwärtigen Wärmetransportes und damit zu einer Abkühlung im Nordatlantik. Es ist daher wahrscheinlich, dass auch die langanhaltenden Trockenperioden in der Sahel durch kalte Oberflächenwassertemperaturen im Nordatlantik verursacht wurden. Inwieweit Veränderungen der Meridionalzirkulation des Atlantiks auch die Trockenheit der Sahelzone in den 1970er Jahren ausgelöst haben, ist noch nicht eindeutig geklärt.

Abb. 8.4: Sanddüne am Gobabeb Forschungszentrum in der Namib, südliches Afrika. (Foto: James Collins, AWI)

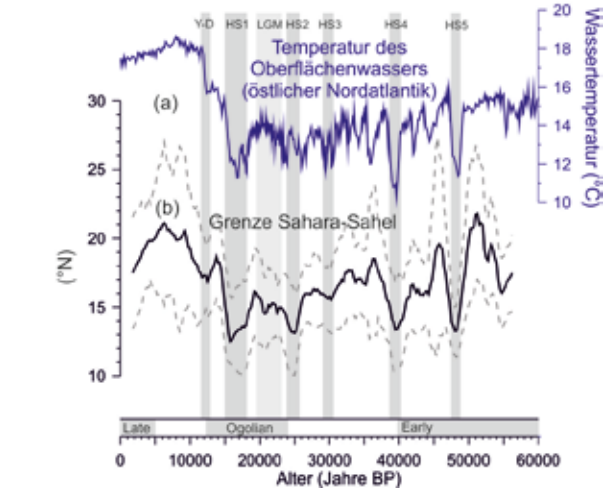


Abb. 8.3: a) Rekonstruierte Oberflächenwassertemperatur vom Kontinentalhang der Iberischen Halbinsel (Martrat et al. 2007). b) Aus den Staubgehalten der Sedimentkerne rekonstruierte Position der Grenze zwischen Sahara und Sahel. Zeiten der Dünenbildung (Ogolian) in der Sahel (Referenzen siehe Collins et al., 2013a) sind grau hinterlegt. Gestrichelte Linien geben Fehlergrenzen der Position an. (Grafik: James Collins, AWI)

Ausblick

Küstennahe Sedimente bieten ein oft kontinuierliches Archiv terrestrischer Klimaänderungen und erlauben es, insbesondere Wechselwirkungen zwischen Land und Ozean auf Zeitskalen zu untersuchen, die durch instrumentelle Daten nicht erfasst werden können. Wir planen, diesen erfolgreichen Ansatz im Rahmen von REKLIM auch in anderen Regionen weiterzuführen. Hierzu werden wir das von Nordwest-Afrika existierende Kernprofil weiter nach Süden verlängern, um auch die Reaktion der Namib auf Veränderungen der Ozeanzirkulation zu untersuchen. Hierbei werden wir neben etablierten Proxies auch die Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopenzusammensetzung von Pflanzenwachsen einsetzen, um Niederschlags- und Vegetationsänderungen an Land zu quantifizieren. Eine erste Zeitscheibenstudie (Collins et al. 2013b), die in einer Zusammenarbeit zwischen dem MARUM und dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung erstellt wurde, zeigt erste, sehr vielversprechende Ergebnisse. Die Verteilung von Wasserstoff-Isotopen kann am Alfred-Wegener-Institut in Klimamodellen simuliert werden. Dies eröffnet zukünftig die Möglichkeit, die Rekonstruktionen direkt mit den Ergebnissen von Modellexperimenten zu vergleichen, um die Prozesse, die zu abrupten Klimaänderungen führen, besser zu verstehen.



9

Klimawandel und Luftqualität

Wie beeinflusst der Klimawandel die Luftqualität in Europa? Welches sind die möglichen Auswirkungen von Klimawandel und einer veränderten Luftqualität auf die Gesundheit? Wie kann man die verschiedenen Kopplungen und Rückwirkungen in numerische Klima- und Luftqualitäts-Modelle integrieren? Was für Messdaten werden benötigt, um diese Effekte quantitativ zu charakterisieren?

Veränderungen des globalen und regionalen Klimas haben eine Vielzahl von direkten und indirekten Auswirkungen auf die Luftqualität und damit auf die Gesundheit der Menschen. Durch veränderte Temperatur- und Strahlungsfelder werden beispielsweise die durch Veränderungen bei der Pflanzenentwicklung für die Luftqualität relevanten Emissionen und die daraus unmittelbar folgenden chemischen Reaktionen beeinflusst. Darüber hinaus haben veränderte groß- und kleinräumige Windfelder Auswirkungen auf den Transport von Spurengasen, Aerosolen und Allergenträgern (Pollen). Im REKLIM Thema 9 werden die Zusammenhänge zwischen Regionalklima und Luftqualität untersucht, um verlässliche Vorhersagen darüber machen zu können, welche gesundheitlichen Folgen der regionale Klimawandel für die Bevölkerung - vor allem in Städten und Ballungsgebieten - hat.

Abschätzung potentieller Gesundheitsbelastungen durch Wetter und Luftschadstoffe in der Außenluft bei veränderten Klimabedingungen

Messungen regionaler Verteilung von Luftschadstoffen und meteorologischen Parametern

Im Rahmen des REKLIM-Projekts soll unter anderem eine Abschätzung potentieller Gesundheitsbelastungen durch Wetter und Luftschadstoffe in der Außenluft in der Region Augsburg durchgeführt werden. Dazu wurden im Jahr 2012 die Luftschadstoff-Verteilungen für Teilnehmer der KORA-Studie (Kooperative Gesundheitsforschung in der Region Augsburg) aus Augsburg und den zwei angrenzenden Landkreisen Augsburg Land und Aichach-Friedberg abgeschätzt. Als Basis dienten die zuvor im Rahmen des EU-Projekts ESCAPE entwickelten Landnutzungsmodelle (Beelen et al., 2013, Cyrus et al. 2012, Eeftens et al., 2012a und 2012b).

Für die Modellierung der räumlich-zeitlichen Ausprägung des Mikroklimas im Untersuchungsgebiet wurde eine Messkampagne zur Erfassung der kleinräumigen Verteilung der Temperatur und Feuchte im Stadtgebiet Augsburg im Dezember 2012 begonnen. Zum Stichtag 31.05.2013 wurden hierfür an 32 Standorten Messgeräte installiert (siehe Abb. 9.1). Die Messungen erfolgen mit wetterfesten Dataloggern Hobo Pro v2 der Firma Onset Computer Corporation (USA), die für einen langjährigen und zuverlässigen Einsatz in rauen Umgebungen konzipiert sind. Der Messbereich für die Temperatur erstreckt sich von -40 °C bis +70 °C und für die relative Feuchte von

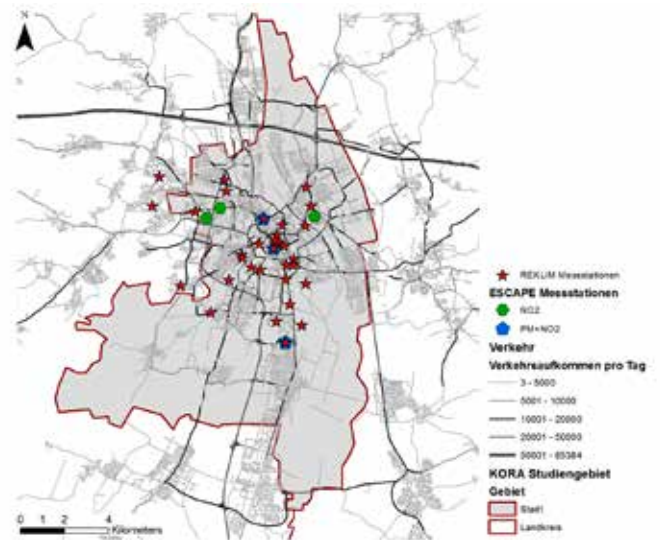


Abb. 9.1: Verteilung der REKLIM-Messstandorte über das Stadtgebiet Augsburg (Stichtag 31.05.2013). (Quelle: A. Peters, A. Schneider, S. Breitner, T. Kusch, C. Hald, J. Cyrus, HMGU)

0 % bis 100 %. Die angestrebte Messhöhe liegt etwa 2 m über Grund, kann aber je nach Gegebenheit abweichen; das Messintervall beträgt vier Minuten. Somit müssen die Datenlogger alle drei bis vier Wochen ausgelesen werden.

Die endgültige Auswahl der Standorte basierte auf 44 zuvor ausgewählten Standorten für die Temperatur- und Feuchtemessungen im Stadtgebiet Augsburg.

Abschätzung potentieller Gesundheitsbelastungen durch Wetter und Luftschadstoffe

Ein wichtiger Faktor im Zusammenwirken von Klimawandel und Luftqualität ist der Einfluss der Temperatur auf die Mortalität. Dieser wurde für Augsburg im Zeitraum 1990-2006 untersucht (Breitner et al., 2013). Dazu wurden die Anzahlen täglicher Sterbefälle aufgrund von natürlichen Todesursachen (ohne Unfälle, Suizide, etc.) sowie aufgrund von kardiovaskulären (Herz-Kreislauf) und respiratorischen (atmungsbedingten) Todesursachen mit Veränderungen in den 2- bzw. 15-Tage-Mitteln der Tagestemperatur in Verbindung gebracht. Darüber hinaus wurden Geschlecht und Alter, aber auch Luftschadstoffkonzentrationen als mögliche Effektmodifikatoren analysiert. Hierzu

wurden Konzentrationen von Partikeln mit einem Durchmesser kleiner oder gleich 10 µm (PM10) sowie Ozon in jeweils drei Kategorien (unterhalb des 25. Perzentil, zwischen 25. und 75. Perzentil und oberhalb des 75. Perzentils) unterteilt. Die Studie konnte zeigen, dass sowohl sehr kalte als auch sehr warme Temperaturen mit der Mortalität in Augsburg assoziiert sind. So führte ein Anstieg im 2-Tage-Mittel der Temperatur vom 90. Perzentil (19.4°C) zum 99. Perzentil (24.1°C) zu einem Anstieg von 14.6% in der Mortalität aufgrund von natürlichen Todesursachen sowie zu einem Anstieg von 8.7% bzw. 22.8% in der kardiovaskulären bzw. respiratorischen Mortalität. Des Weiteren führte ein Abfall im 15-Tage-Mittel der Temperatur vom 10. Perzentil (-1.4°C) zum 1. Perzentil (-8.5°C) zu einem Anstieg in der kardiovaskulären Mortalität von 14.1%. Sehr alte Leute (über 85 Jahre) zeigten eine besonders starke Hitzeempfindlichkeit. Außerdem zeigte sich ein etwas stärkerer Effekt sehr hoher Temperaturen, wenn zugleich die Ozonkonzentrationen erhöht waren.

Einfluss des Klimawandels und der Luftqualität auf die Allergenität von Birkenpollen

Klimawandel und Luftqualität nehmen nicht nur einen direkten Einfluss auf den Menschen, sondern ebenfalls einen indirekten Einfluss über die Wirkungen auf Pflanzen. Von besonderem Interesse sind hierbei die allergenen Pflanzen (Abb. 9.2). Epidemiologische Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen Urbanisierung und Zunahme von allergischen Erkrankungen. Dabei ist die wissenschaftliche Grundlage dieser Assoziation bis heute nur wenig verstanden. Einige Studien konnten einen pro-allergischen Effekt anthropogener Faktoren auf anfällige Individuen zeigen. Hingegen ist die Datenlage bezüglich des Effektes von Umweltfaktoren – natürlichen oder anthropogenen Ursprunges – auf den Allergenträger wie Pollen dünn und hauptsächlich aus Expositionsstudien unter Laborbedingungen bezogen. Hierbei konnte u. a. veränderte Allergengehalte unter dem Einfluss von Schadstoffen gezeigt werden. Behrendt et al. (2001) beschreiben eine reduzierte Bioverfügbarkeit von

Allergenen aus Gräserpollen durch Begasung mit NO₂ und SO₂ sowie morphologische Veränderungen der Pollenoberfläche mit vermehrtem Austritt allergenhaltiger Proteine durch Begasung mit wässrigen Schwebstaubextrakten. Studien von z. B. Eckl-Dorna et al. (2010) wiederum untersuchten den Effekt von Ozon auf Gräserpollen und konnten einen Anstieg der Allergengehalte durch Ozonbegasung zeigen. Weitere Studien zu Pollen des weißen Gänsefußes (*Chenopodium alba*) als auch der Canna Pollen (Guedes et al., 2009; Ahmad Majd et al., 2004) konnten unterschiedliche Expressionsmuster zwischen städtischen (urbanen) und ländlichen (ruralen) Pollen detektieren. Schlecht untersucht ist hingegen bislang, wie veränderte Polleneigenschaften wiederum Einfluss auf die Entwicklung als auch Symptomatik allergischer Erkrankungen nehmen.

Im REKLIM Thema 9 wird der Einfluss von Klimawandel und Luftqualität auf den wichtigen Allergenträger Birkenpollen mit dem Ziel untersucht, Zusammenhänge zwischen Schadstoffexposition, Allergenität von Birkenpollen sowie Gesundheitsparametern herzustellen. Es soll die Frage geklärt werden, inwieweit veränderte Umweltbedingungen die Allergenität von Birkenpollen beeinflussen und welche Auswirkungen dies wiederum auf die Initialisierung der Allergie sowie deren Symptomatik hat.

Die Allergenität der Birkenpollen wird hierbei in einem ganzheitlichen Ansatz untersucht, wobei sowohl die Allergenbioverfügbarkeit, die sogenannten Pollen assoziierten Lipidmediatoren (PALMs) als auch das erst kürzlich in Pollen identifizierte Adenosin miteinbezogen werden. In vitro (in künstlicher Umgebung, hier: Stimulation von humanen dendritischen Zellen und Granulozyten) und in vivo (im lebenden Organismus) Analysen (Prick-Test) vervollständigen die Untersuchungen und verbessern das Verständnis möglicher Mechanismen. Diese Daten werden zu verstehen helfen, wie Klimawandel und Urbanisierung auf die Allergenität von Birkenpollen und in Folge auf die Gesundheit Einfluss nehmen, um hieraus primäre Präventionsstrategien zu entwickeln.

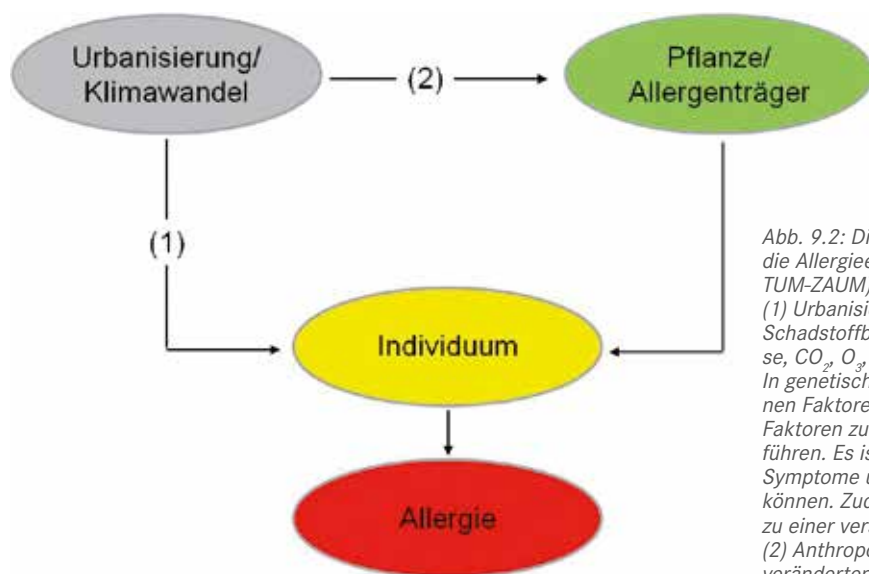


Abb. 9.2: Direkter und indirekter Einfluss der Urbanisierung auf die Allergieentwicklung. (Quelle: C. Traidl-Hoffmann, I. Beck, TUM-ZAUM)

(1) Urbanisierung steht im Zusammenhang mit einer erhöhten Schadstoffbelastung mit anthropogenen Faktoren (Dieselabgase, CO₂, O₃, flüchtige organische Verbindungen (VOC), Partikel). In genetisch vorbelasteten Individuen können diese anthropogenen Faktoren in Kombination mit einem Mangel an schützenden Faktoren zu einer Initialisierung oder Erschwerung der Allergie führen. Es ist bekannt, dass anthropogene Faktoren allergische Symptome über entzündungsfördernde Wirkungen verstärken können. Zudem können sie die Epithelbarriere beeinflussen, was zu einer verstärkten Allergenpenetration führen kann.

(2) Anthropogene Faktoren können hingegen ebenfalls zu einer veränderten Allergenität von Allergenträgern führen. Diese veränderte Wirkung kann sich in Form einer begünstigten Entwicklung allergischer Erkrankungen oder aber einer Erschwerung der Symptomatik äußern.

10

Risikoabschätzungen und Risikomanagement für Klimaanpassungsstrategien

Mit welchen Risiken geht der Klimawandel einher, und wie sind diese aus ökonomischer Sicht zu bewerten? Wie können politische Entscheidungsträger beim Umgang mit diesen Risiken von wissenschaftlicher Seite unterstützt werden?

Im Rahmen des REKLIM Themas 10, Risikoabschätzungen und Risikomanagement für Klimaanpassungsstrategien, verbinden die beteiligten Helmholtz-Zentren (GFZ, HZG, KIT, UFZ) natur- und sozialwissenschaftliche Ansätze, um dynamische Risikoanalysen des Klima- und sozioökonomischen Wandels durchzuführen. Die Abschätzung und Bewertung von zukünftigen Risiken und erforderlichen Maßnahmen in regionalen Bezügen ist für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel von enormer Bedeutung.

Gerade Stadträume sind besonders sensibel gegenüber Klimaänderungen. Starkregen, Hochwasser und Sturmfluten sowie hochsommerliche Hitzeperioden stellen große Klimarisiken dar, insbesondere in häufig dicht bebauten und wirtschaftlich intensiv genutzten urbanen Regionen. Deshalb forscht REKLIM Thema 10 unter anderem zu regionalen Risiken durch den Klimawandel, der Risikowahrnehmung und -kommunikation in verschiedenen Bevölkerungsgruppen, der lokalen Beteiligung von Akteuren im Anpassungsprozess sowie der Anpassung unter Unsicherheiten. Ziel ist eine Wissens- und Datengrundlage für die Risikokommunikation mit der breiten Öffentlichkeit und die Entwicklung von Strategien zur Klimaanpassung zu liefern.



Abb. 10.1: Überhitzungsgefährdung im Stadtzentrum Jena auf Basis von Versiegelungsgrad, Baustruktur, Globalstrahlung, lokalen und regionalen Windsystemen. (Quelle: BMVBS, 2013)

Bewertung und Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen - Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehrs, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) hat das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig (UFZ) zur Unterstützung klimaanpassungsbezogener Entscheidungsprozesse einen Leitfaden entwickelt, der ein einfaches Verfahren zur ökonomischen Bewertung und Priorisierung von Handlungsoptionen beschreibt. Der Leitfaden führt durch die Auswahl und Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen; zeigt relevante Fragen auf und strukturiert den Bewertungs- und Priorisierungsprozess; hilft, eine Datengrundlage für die Entscheidungsfindung zu schaffen und mit Datenunsicherheiten umzugehen; erklärt mögliche Bewertungsmethoden und hilft, diese anzuwenden. Er richtet sich damit an Entscheidungsträger in Kommunen und Unternehmen, die vor der Herausforderung stehen, unter Unsicherheit und angesichts limitierter finanzieller Ressourcen besonders vorteilhafte Maßnahmen zur Klimaanpassung auszuwählen.

Der Prozess der Bewertung von Anpassungsmaßnahmen erfolgt dabei in fünf Stufen:

1. Identifikation der Betroffenheit (Eingrenzung einer spezifischen Problemlage sowie Abschätzung vergangener und zukünftiger Schadensereignisse) (Bsp. Abb. 10.1)
2. Definition möglicher Maßnahmen (u.U. Bildung von Maßnahmenbündeln)
3. Definition von Bewertungskriterien und Wahl des Bewertungsverfahrens (u.U. Gewichtung von Bewertungskriterien)
4. Datenerhebung zur Maßnahmenbewertung (z.B. kommunale Anpassungskonzepte und Datenbanken)
5. Priorisierung von Handlungsoptionen (z.B. mit PRIMATE) (Bsp. Abb. 10.2)

Darüber hinaus bietet der Leitfaden eine Kurzanleitung für die drei Bewertungsverfahren Kosten-Nutzen-Analyse (KNA), Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA), Multikriterien-Analyse (MKA) sowie Beispiele für mögliche Datenquellen und Fallstudien aus dem Forschungsfeld (siehe auch BMVBS, 2013).

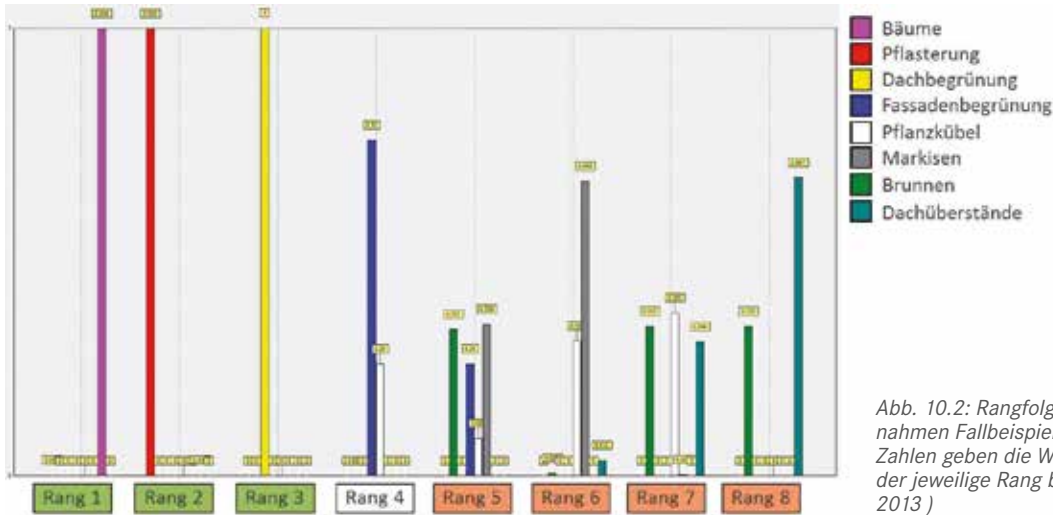


Abb. 10.2: Rangfolgen der bewerteten Maßnahmen Fallbeispiel Eichplatz (Anmerkung: Die Zahlen geben die Wahrscheinlichkeit an, mit der der jeweilige Rang belegt wird.). (Quelle: BMVBS, 2013)

Integraler Ansatz zur städtischen Klimaanpassung

Immer mehr Großstädte entwickeln breit angelegte Anpassungsstrategien an Auswirkungen des Klimawandels in der Stadt. In diesen wird entsprechend des integralen Ansatzes (Abb. 10.3) der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (www.bmu.de/N42783) versucht, alle relevanten Sektoren und Bereiche, Ebenen und Akteure einzubeziehen, z.B. Bauen/Wohnen, Wasser, Energie, Verkehr, Katastrophenschutz, Umwelt, Gesundheit, Wissenschaft, Wirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung, verschiedene kommunale und regionale Ämter und Behörden sowie Bürgerinnen und Bürger. Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird im Rahmen von REKLIM mit Hilfe von Experteninterviews am Beispiel von Karlsruhe untersucht, welche Faktoren und Effekte die Umsetzung solcher integraler Ansätze auf kommunaler Ebene begünstigen oder im negativen Fall behindern, und welche Lösungen sich für die Überwindung von Hemmnissen aufzeigen und entwickeln lassen. Im Fokus stehen hierbei besonders Risikomanagementstrategien für extreme Wetterereignisse in der Stadt (Stürme, Gewitter, Hagel, Hitzewellen, Hoch-/Niedrigwasser, Wintereinbruch).

Rahmung des Klimawandels unter den Migranten: Barrieren und Chancen im Anpassungsprozess

Die Unterstützung der Klimaanpassungsmaßnahmen durch die lokale Bevölkerung ist von großer Bedeutung und zunehmendes Interesse besteht in der Frage, welchen Einfluss soziale Ungleichheiten auf die regionale Anpassungskapazität haben. In Deutschland ist jede achte Person ein(e) Migrant(in) und die Zahl der Einwanderer wird sich in den nächsten Jahren voraussichtlich noch erhöhen. Deshalb forscht das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) zur Wahrnehmung und Konzeptualisierung des Klimawandels unter Migranten. Es wird u.a. auch untersucht, welche Informationsquellen die mentalen Bilder von Klima und Klimawandel beeinflussen. Im Rahmen der Studie werden in Hamburg qualitative Interviews mit verschiedenen Migrantengruppen und offiziellen Organisation, die an der Integration von Migranten beteiligt sind, durchgeführt. Die Studie dient der Analyse von verschiedenen Faktoren, wie zeitliche, räumliche oder soziale Distanz und Unsicherheiten in Bezug zu den Themen Klimawandel und Anpassung, wahrgenommene Fähigkeit, sich selbst an die Veränderungen anzupassen und die Rolle von Erfahrung mit Naturgefahren, wie Hochwasser. Das Ziel besteht darin zu untersuchen, wie

sich diese Faktoren zwischen den Migrantengruppen unterscheiden und wie sich diese auf das Anpassungsverhalten von Migranten auswirken. Dadurch sollen Erkenntnisse gewonnen werden, welche Bedeutung dies für die regionale Anpassung in Deutschland hat.

Mittelfristige Synergien

Lernen vom regionalen Klimawandel kann nicht nur im städtischen Kontext stattfinden. Vergleichende Arbeiten zu unterschiedlichen Vorsorgementalitäten bei der Bevölkerung entlang von Flussläufen und entlang der norddeutschen Küste wurden am GFZ, HZG, und UFZ durchgeführt und dienen als Ausgangspunkt für eine Zusammenarbeit. Zu diesem Zweck fand ein erstes koordinierendes Redaktionstreffen in Hamburg statt. Hier soll insbesondere die zentrenübergreifende Zusammenarbeit für die nächste Förderperiode im Vordergrund stehen.



Abb. 10.3: Integraler Ansatz in der Anpassung an den Klimawandel. (Foto: KIT)

Nachwuchswissenschaftler im REKLIM-Verbund

Wer steht hinter dem Verbund? – „Wir geben REKLIM ein Gesicht“

Teresa Beck (KIT)

Schon während ihres Meteorologie-Studiums begeisterte sich Teresa Beck besonders für die numerische Simulation der Atmosphäre.



Nachdem sie ihr Diplom-Studium am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Juli 2012 abgeschlossen hat, arbeitet sie nun am **REKLIM Thema 9** „Klimawandel und Luftqualität“. Im Rahmen eines interdisziplinären Promotionsthemas zwischen numerischer Mathematik und Meteorologie beschäftigt sie sich mit adaptiven Verfahren der Modell-Reduktion für die Simulation der atmosphärischen Chemie. Diese zielen darauf ab, bestmögliche Ergebnisse unter minimaler Aufwendung numerischer Kosten zu erlangen.

„Am Projekt REKLIM fasziniert mich besonders, dass durch den Einsatz neuartiger numerischer Methoden eine bisher nicht realisierbare Detailtreue numerischer Simulationen ermöglicht werden soll. Dadurch können von Seiten der Meteorologie wichtige Rückschlüsse auf das Modell gezogen werden, was langfristig zu besseren Klimavorhersagen führen kann.“

Charlotte Hoppe (FZJ)

Charlotte Hoppe ist Diplom-Meteorologin und promoviert seit 2011 am Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-7, Stratosphäre) im Forschungszentrum Jülich. Während ihres Studiums an der Universität zu Köln arbeitete sie am Rheinischen Institut für Umweltforschung (RIU). Dort entdeckte sie ihr Interesse an der Arbeit mit meteorologischen Modellen. Heute arbeitet Charlotte Hoppe mit globalen Klimamodellen und baut im Rahmen ihrer Doktorarbeit in **REKLIM Thema 5** ein neues Transportschema in ein Chemie-Klima-Modell ein. Dieses Schema ist besonders gut geeignet, um den Tropopausenbereich darzustellen. Diese Region der Atmosphäre ist in Klimasimulationen von entscheidender Bedeutung, da hier schon kleine Änderungen in den Spurengaskonzentrationen große Auswirkungen auf den Strahlungsantrieb haben können.



„Ich finde es wichtig, dass im Rahmen von Projekten wie REKLIM wissenschaftlich fundierte Informationen über das Klima und den Klimawandel vermittelt werden.“

Daniel Klaus (AWI)

Die Faszination des arktischen Klimasystems und die spannenden Probleme bei seiner Modellierung entdeckte Daniel Klaus bereits während seines Diplom-Physikstudiums an der Universität Potsdam. Dieses schloss er im Februar 2010 mit sehr guten Noten ab und arbeitet seitdem am Alfred-Wegener-Institut in Potsdam. Im Rahmen seiner Dissertation im **REKLIM Thema 1** beschäftigt er sich mit der Simulation arktischer Wolken. Auf der Grundlage der Validierung des regionalen Atmosphärenmodells HIRHAM5 mit Satellitendaten in Zusammenarbeit mit NASA-JPL dienen Parameterstudien und Änderungen in der Wolkenparametrisierung dazu, eine verbesserte Simulation von Wolken-, Strahlungs- und Grenzschichtprozessen in der Arktis zu gewährleisten.



„Verbesserte Beobachtungen und glaubwürdigere Klimamodelle helfen uns dabei, die komplexen physikalischen Prozesse besser zu verstehen und die Auswirkungen einer sich ändernden Arktis auf das globale Klimasystem korrekt abschätzen zu können. Der interdisziplinäre Austausch bei REKLIM bündelt dafür notwendige Kompetenzen.“

Katharina Klehmet (HZG/Universität Hamburg)

Als Geographin hat sich Katharina schon immer für die regionale Darstellung des Klimawandels interessiert. Während ihrer Diplomarbeit konnte sie bereits Erfahrungen im Bereich der regionalen Klimamodellierung sammeln – einem Feld in dem sie auch ihre Doktorarbeit schreiben wollte. Im Rahmen von **REKLIM im Thema 3** „Regionale Klimaänderungen in der Arktis“ liegt der Fokus ihrer Doktorarbeit in der Bereitstellung von numerischen Simulationen gegenwärtiger und vergangener Klimabedingungen in Sibirien, um einen konsistenten historischen Datensatz verschiedenster meteorologischer Parameter für diese Region zu liefern. Diese Klimarekonstruktion basiert auf der Anwendung des regionalen Klimamodells CCLM, das zuvor noch eine spezielle Konfiguration für Sibirien benötigte. Neben der Bearbeitung der Modellkonfiguration und Modellevaluierung liegt ihr besonderes Forschungsinteresse in der Betrachtung von Schneecharakteristika in Sibirien und deren Veränderungen und Variabilitäten während der letzten Dekaden.



Susanna Mohr (KIT)

Susanna Mohr schloss ihr Studium sowie ihre Promotion am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO) an der Universität Karlsruhe bzw. dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ab. Während ihrer Diplomarbeit untersuchte sie anhand eines Ensembles regionaler Klimamodelle die zukünftigen Änderungen extremer Windgeschwindigkeiten für bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeiten im Winterhalbjahr. Als Mitglied im **Thema 6** lag der Fokus anschließend auf den Extremereignissen im Sommerhalbjahr. Ziel ihrer Doktorarbeit war zu untersuchen, inwieweit sich die Häufigkeit und Intensität von Hagelereignissen in den vergangenen Jahren verändert hat. Zusätzlich wurde abgeschätzt, mit welchen Änderungen – bedingt durch den



anthropogenen Klimawandel – in der Zukunft zu rechnen ist. *„An REKLIM reizt mich der Austausch zwischen interdisziplinären Forschungsbereichen und die daraus resultierende Gelegenheit, die eigene Arbeit aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten.“*

Lidia Romero (GFZ)

Lidia Romero ist studierte Biologin und promovierte über Paläoökologie an der Universität von Valencia, Spanien. In ihrer Dissertation untersuchte sie Pigmente von Algen in Seesedimenten auf der Iberischen Halbinsel und nutzte diese, um hydrologische Veränderungen während des Holozäns zu rekonstruieren. Innerhalb von REKLIM arbeitet sie als Postdoc in der Arbeitsgruppe Paläohydrologie an der Universität Potsdam und am GFZ Potsdam in der Sektion 5.2. (Klimadynamik und Landschaftsentwicklung). Ihre Forschung innerhalb des **REKLIM Themas 8** besteht aus zwei Grundpfeilern: Zum einen arbeitet sie an der Etablierung eines organisch-geochemischen Temperaturproxies, des Alkenon-Paläothermometers für Seen, zum anderen erstellt sie eine hochauflösende Klimarekonstruktion am Holozänen Sedimentkern des Tiefen Sees (Mecklenburg-Vorpommern) unter Nutzung organisch-geochemischer Methoden sowie substanzspezifischer Wasserstoffisotopenmessungen.



Ingo Sasgen (GFZ)

Sein Diplom-Geophysik Studium an der LMU München bereicherte Ingo Sasgen durch die unübliche Wahl des Nebenfachs Satellitengeodäsie an der TU München. Dieses starke Interesse für die Erdbeobachtung aus dem Weltraum führte ihn dann 2004 zur Promotion innerhalb des Helmholtz Integrated Earth Observing System Project (EOS) an das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ. Dort widmete er sich der Auswertung der damals noch ganz neuen GRACE-Schwerefelddaten hinsichtlich der Eismassenänderungen in den Polargebieten. Inzwischen liefern die GRACE-Daten seit über 10 Jahren kontinuierliche Messungen der polaren Eismassenbilanz, die in die numerischen Simu-



lationen des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs in **REKLIM Thema 2** „Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz“ Eingang finden. *„Mich fasziniert am REKLIM Projekt die enorme Fachexpertise der Beteiligten und wie diese gebündelt wird, um ganz gezielte Forschungsfragen zu beantworten. Für mich ist es wichtig zu sehen, dass die Datengrundlage, die ich liefere, in Simulationen eingeht und deren Qualität verbessert.“*

Gustavo Saiz (KIT)

Gustavo Saiz schloss sein Masterstudium und seine Promotion am University College in Dublin (Irland) ab, wo er die Dynamik von Kohlenstoffumsetzungen im Boden temperater Wälder studierte. In den vergangenen sieben Jahren untersuchte er als Nachwuchswissenschaftler an der St. Andrews University in Schottland und der James Cook University in Australien Bodenkohlenstoffumsetzungen unter tropischen Umweltbedingungen. Gustavo nahm an umfangreichen und langandauernden Feldkampagnen in mehr als einem Duzend tropischer Länder teil.



Sein Forschungsinteresse in **REKLIM Thema 4** umfasst die Anwendung stabiler Isotopen-Analytik zur Untersuchung vergangener und heutiger tropischer Vegetationsdynamik und deren Abhängigkeit von edaphischen Bedingungen auf globaler Skala. Darüber hinaus untersucht er mit Fraktionierungsmethoden, wie sich Vegetationsänderungen auf die Kohlenstoffdynamik im Boden auswirken.

Diana Süsser (HZG)

Diana Süsser beschäftigte sich schon während ihres Masterstudiums in Klimawissenschaften am KlimaCampus der Universität Hamburg mit interdisziplinären Fragen der Klimawandelvermeidung und Klimaanpassung. Seit Dezember 2012 promoviert sie am Institut für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrum Geesthachts (HZG) im Rahmen des **REKLIM Themas 10** „Risikoabschätzungen und Risikomanagement für Klimaanpassungsstrategien“. In ihrer Doktorarbeit untersucht sie mit Hilfe von agenten-basierten Simulationen individuelle Entscheidungsprozesse, sich vor Klimarisiken zu schützen, und analysiert, wie diese durch soziale Netzwerke in den Küstengemeinden geprägt werden. Die Forschung soll ein besseres Verständnis für die Verbreitung von Wissen, Wahrnehmungen und Anpassungsmaßnahmen schaffen, um Erkenntnisse für ein verbessertes Anpassungsmanagement zu liefern. *„Am Projekt REKLIM sehe ich vor allem die interdisziplinäre und institutsübergreifende Forschung als großen Gewinn.“*



Anna-Katharina Topp (EUV)

Anna-Katharina Topp absolvierte ihr Master-Studium der Volkswirtschaftslehre an der Universität Regensburg. In ihrer Abschlussarbeit beschäftigte sie sich mit der Frage, inwieweit verhaltensökonomische Ansätze zur Erklärung von Kooperationsbereitschaft in der internationalen Umweltpolitik beitragen. Seit Beginn 2012 promoviert sie an der Europa-Universität Viadrina in Frankfurt (Oder) und ist im vom BMBF geförderten Forschungsprojekt RECAP15 tätig, in dem sie die strategische Wechselwirkung von Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen in der internationalen Klimapolitik mithilfe spieltheoretischer Modelle untersucht. In enger Kooperation mit dem Department Ökonomie vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) entstanden gemeinsame Arbeiten für **REKLIM Thema 7**, die Anna-Katharina Topp beim vergangenen REKLIM-Workshop in Bad Honnef präsentierte. *„An REKLIM reizt mich der rege Wissensaustausch zwischen Forschern aus Natur- und Sozialwissenschaften, welcher das gegenseitige Verständnis fördert und die Entwicklung solider klimapolitischer Empfehlungen ermöglicht.“*



Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg

Klimaberatung am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

Aktuelle Problemstellungen wie zum Beispiel die Umweltzerstörung und der anthropogen bedingte Klimawandel besitzen eine enorme gesellschaftliche Bedeutung, die eine Zusammenarbeit zwischen Natur- und Sozialwissenschaften mehr als je zuvor sinnvoll und notwendig erscheinen lassen. Um die „zwei Wissenschaftskulturen“ zusammenzuführen, konzipierte und organisierte das Klimabüro den deutsch-französischen Workshop „Gateway to the Arctic“ (Abb. K.1). Unterstützt wurde das Projekt von den französischen Partnerinstituten Institut Polaire Français - Paul Emile Victor (IPEV), dem Centre Européen Arctique (CEARC) sowie dem AWI. Ziel des Workshops war es, den jungen Wissenschaftler/-innen aus den unterschiedlichsten Disziplinen eine Plattform zu bieten, die es ermöglicht, über die eigene Disziplin hinaus einen Blick für die Arbeit anderer Disziplinen zu erhalten. Die aus dem Workshop erarbeiteten und abgeleiteten Empfehlungen für die Fortführung des Dialogs werden in eine Nachfolgeveranstaltung im November 2013 in Brest integriert werden.

Das Klimabüro begleitete darüber hinaus die Auftaktveranstaltung zur Bildung eines Jugendklimarats im Kontext des Prozesses „Klimastadt Bremerhaven“ (Abb. K.2). Ziel dieser politisch verankerten Plattform ist es, den Jugendlichen eine Stimme zu verleihen und ihnen die Möglichkeit zu geben, sich mit ihren Ideen in Sachen Klimaschutz in den politischen Pro-



Abb. K.1: Insgesamt haben 33 Wissenschaftler/-innen an dem Workshop „Gateway to the Arctic“ teilgenommen. Sie kamen aus Frankreich, Finnland, Schweden, Russland, den Niederlanden und den USA. (Foto: Julia Bär, AWI)



Abb. K.2: Auftaktveranstaltung zur Bildung eines Jugendklimarats in Bremerhaven am 10.11.2012 am AWI. Sprecherin zur Eröffnung Stadträtin im Umweltschutzamt Anke Krein. (Foto: Susanne Lincke, ecolo)

zess einzubringen. Um Ideen zur Struktur und zu den Aufgaben des zukünftigen Klimarates zusammenzutragen, fand am 10. November 2012 am AWI in Bremerhaven eine Jugendklimakonferenz statt. Ende August 2013 konnten die Jugendlichen in einem nächsten Schritt über die konkrete Ausgestaltung des Rates abstimmen.

Zu den weiteren Projekten des Klimabüros gehört das langfristig angelegte Kooperationsvorhaben „Maritimes Zentrum Elbinseln“ (MZE) an der Stadtteilschule Wilhelmsburg in Hamburg. Dieses Projekt wurde vom AWI, dem Internationalen Maritimen Museum Hamburg, der IBA Hamburg GmbH sowie dem Verband Schiffbau Meerestechnik initiiert. Dabei wird im Neubau der Schule auf circa 4.000 Quadratmetern ein einzigartiger Lern- und Forschungsraum geschaffen, in dem Schüler mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Kunst und Industrie zusammenkommen, um „forschend zu lernen und lernend zu forschen“. Die Schule liegt in einer Region mit einer schwierigen Bildungssituation, circa 18 Prozent der Schüler eines Jahrgangs verlassen die Schulen ohne Bildungsabschluss und nur 10 Prozent der Schüler gelingt nach dem Schulabschluss ein direkter Übergang in die duale berufliche Erstausbildung. Seit Anfang des Jahres 2012 wird das Projekt daher von der Hamburger Behörde für Schule und Berufsbildung unterstützt. Momentan ist die Gebäudemanagement GmbH Hamburg durch den Schulbau Hamburg mit dem Auftrag ausgestattet, die Ausschreibung für einen internationalen Architektenwettbewerb vorzubereiten.

Partner für Klimafragen in Norddeutschland

Unser Ziel ist es, wissenschaftliche Ergebnisse in entscheidungsrelevante Informationsangebote zu transformieren. Deshalb stehen wir in engem Austausch mit Entscheidungsträgern in Norddeutschland. Dieser Dialog findet vor allem auf Veranstaltungen und in persönlichen Gesprächen statt. Durchschnittlich einmal pro Woche sind wir zu Gast bei verschiedensten gesellschaftlichen Gruppen aus Unternehmen, Verbänden, Behörden und Bildungseinrichtungen, um uns vor Ort mit Menschen aus der Region auszutauschen und über Chancen und Risiken des Klimawandels zu diskutieren. Außerdem erreichen uns zahlreiche Anfragen mit fachspezifischen Fragestellungen zum Klimawandel in Norddeutschland. Durch den engen Kontakt zu unseren Nutzern erfahren wir über bestehende Informationsbedürfnisse und häufige Missverständnisse. Aus diesen Erkenntnissen optimieren und erweitern wir unser Informationsangebot.

Übereinstimmungskarten im Klimaatlas

„Welches ist die wahrscheinlichste Klimavorhersage?“ – Diese Frage wurde uns in den vergangenen Jahren immer wieder gestellt. Die Hintergründe, warum wir das Klima der Zukunft nicht wie das Wetter von morgen vorhersagen können und deshalb mit Szenarien arbeiten müssen, liefern nur einen kleinen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage. Tatsächlich deutet die Frage aber auf eine wesentliche Barriere hin, die bei der Nutzung wissenschaftlicher Ergebnisse in Planungsprozessen besteht. Noch immer sind viele Planungsprozesse auf eine definierte Zahl, einen bestimmten Schwellenwert oder ein Jahrhundertereignis ausgelegt. Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel erfordern vielmehr Planungen, die auf ein größeres Spektrum unterschiedlicher Klimaentwicklungen ausgelegt sind. Für solche Planungen zeigen unsere Klimaatlanten nun, worin alle zugrunde liegenden Klimaszenarien übereinstimmen und für welche Größen in welchen Regionen die Aussagen (noch) unklar sind (Abb. K.3).

Schon für die nächsten 30 Jahre stimmen beispielsweise alle betrachteten regionalen Klimaszenarien darin überein, dass es wärmer werden kann. Diese Übereinstimmung trifft ebenfalls auf die Änderung abgeleiteter thermischer Größen zu, wie Sommertage, heiße Tage, Frosttage und Eistage. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Änderung der jahreszeitlichen Niederschlagsmengen innerhalb der nächsten dreißig Jahre: Einige Szenarien zeigen beispielsweise eine Zunahme der sommerlichen Niederschlagsmenge von bis zu 5%, andere eine

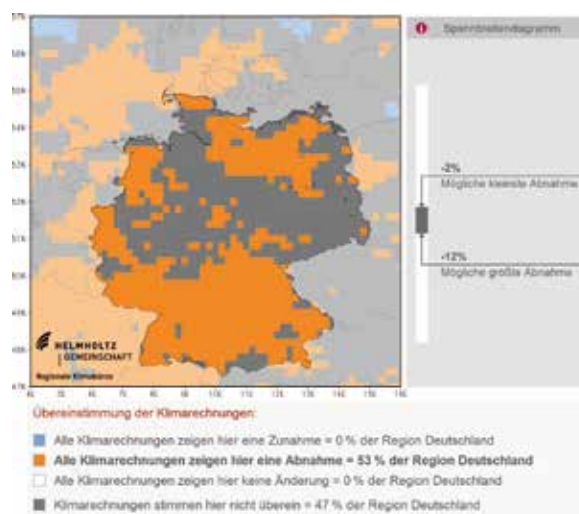


Abb. K.3: Mögliche Änderung des Niederschlags im Sommer bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2041-2070) im Vergleich zu heute (1961-1990). (www.norddeutscher-klimaatlas.de, www.regionaler-klimaatlas.de)

Abnahme bis zu -5%. Ab Mitte des Jahrhunderts (2041-2070) weisen jedoch alle Szenarien für Deutschland größtenteils auf eine Abnahme des Sommerniederschlags und eine Zunahme des Winterniederschlags hin. Für Entscheidungsträger wird somit deutlich, wie robust eine Aussage für ein bestimmtes Zeitfenster ist, wann die Aussage robust wird oder ob sie unklar bleibt. Ein Planungsbeispiel, das mögliche Spannbreiten des Klimawandels berücksichtigt, ist das Schleswig-Holsteinische Küstenschutzkonzept mit Baureserve. Alle vom IPCC (2007) veröffentlichten Szenarien zur globalen Änderung des Meeresspiegels weisen auf einen weiteren Anstieg in einer Spannbreite von 20-80 cm bis 2100 hin. Bei der Planung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel wurde daher für die Errichtung von Küstenschutzbauwerken ein Meeresspiegelanstieg von 0,5 m zugrunde gelegt (sog. Klimazuschlag). Sollte der Meeresspiegel diesen Wert überschreiten, haben nachfolgende Generationen die Möglichkeit, mit geringem Aufwand dem Deich eine Deichkappe aufzusetzen. Anpassungsmaßnahmen auf unsicheren Grundlagen werden also vor allem dann mit hoher Wahrscheinlichkeit wirksam, wenn Möglichkeiten eingeräumt werden, auf spätere Änderungen flexibel zu reagieren. Die neuen Übereinstimmungskarten können hierfür eine wichtige Informationsbasis liefern und möglichen Handlungsbedarf aufzeigen.

Mitteldeutsches Klimabüro

Dialog mit regionalen Akteuren zu Klimafolgen und Anpassung

Das Mitteldeutsche Klimabüro am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) gestaltet den regionalen Dialog zwischen der Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern auf der einen und der Wissenschaft auf der anderen Seite. Dabei fokussieren wir auf Klimafolgen für den Wasserhaushalt sowie für die Biodiversität. Darüber hinaus ist die Anpassung an positive und negative Folgen des Klimawandels ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf Planungszeiträume und die Identifikation von relevanten Treibern des globalen Wandels und seiner regionalen Auswirkungen gelegt.

Die Übersetzung des überwiegend naturwissenschaftlichen Wissens in die Gesellschaft wird am Klimabüro durch öffentliche Veranstaltungen wie z.B. der Filmreihe „Globale in Halle“ umgesetzt. In der von mohio e.V. und Greenpeace organisierten Veranstaltung wurde der Dokumentarfilm „Der Zerbrochene Mond“ gezeigt. Im Anschluss gab es eine lebhafteste Diskussion mit Dr. Andreas Marx vom Mitteldeutschen Klimabüro zum Klimawandel, aber auch zu wirtschaftlichen und demographischen Veränderungen sowie dem Landnutzungswandel. Ein Schwerpunktthema für die Medien war das Hochwasserereignis im Frühsommer 2013 in Mitteleuropa (Abb. K.4), das unter anderem durch die Kombination von hoher Bodenfeuchte vor dem Ereignis und den teilweise folgenden Extremniederschlägen zu schweren Überschwemmungen führte.

Im letzten Jahr hat sich insbesondere der Dialog mit der Stadt Leipzig weiter intensiviert. Der Austausch wurde vom Amt für Umweltschutz zum Thema Anpassung an den Klimawandel angeregt. Auf zahlreichen Treffen wurden Bereiche wie Wasserwirtschaft, Naturschutz, Gesundheit oder Infrastruktur vor dem Hintergrund des Klimawandels beleuchtet und Lösungsstrategien diskutiert. Zusätzlich wurden Forschungslücken identifiziert, die durch Kooperationen unter anderem mit dem UFZ zum Thema „Hitze in der Stadt“ geschlossen werden sollen.

Im Rahmen eines Projektes für die Europäische Umweltagentur (EEA) hat das UFZ zum Bericht „Klimawandel, Auswirkungen und Gefährdung in Europa 2012“ beigetragen. Die sorgfältige Auswahl und Bewertung der zugrunde liegenden Indikatoren von Extremniederschlägen über Bodenfeuchte und Dürren bis hin zur Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten war in dem insgesamt über zwei Jahre dauernden Prozess bis zur Fertigstellung des Berichts eine große Herausforderung. Im Klimabüro lag zudem die Verantwortung und Leitautorenschaft für das Kapitel zu Terrestrischen Ökosystemen.

Des Weiteren wurde die Vernetzung von Wissenschaftlern im Rahmen der DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) Science Tour 2012 vorangetrieben, die im November in Leipzig Station gemacht hat. Auf der vom Klimabüro organisierten Veranstaltung konnten sich dabei über 30 internationale Gäste mit Forschern des UFZ zum Thema „Klimawandel und Biodiversität“ austauschen.



Abb. K.4: Hochwasser am 04.06.2013 in Collmen an der Mulde. Zahlreiche Medienanfragen drehten sich im Juni um das Extremereignis und seine Auswirkungen. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

Süddeutsches Klimabüro

Brücke zwischen Forschung und Gesellschaft im Süddeutschen Raum

Das Süddeutsche Klimabüro am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist seit 2007 Ansprechpartner für die Vermittlung von Informationen über Klima und Klimawandel und stellt für Medien, öffentliche Organisationen, Entscheidungsträger und Bürger verständlich aufbereitetes, fundiertes und nutzerorientiertes Wissen zum Klima und den Auswirkungen des regionalen Klimawandels bereit. Dabei wird auf Forschungsergebnisse und auf die Expertise des KIT-Zentrums „Klima und Umwelt“, dem das Süddeutsche Klimabüro zugehörig ist, weiterer Institute des KIT und anderer Einrichtungen im süddeutschen Raum zurückgegriffen. Zudem initiiert und begleitet das Süddeutsche Klimabüro wissenschaftliche Projekte.

Im Jahr 2012 wurden zwei Konzeptstudien erfolgreich durchgeführt. In einem einjährigen Projekt wurde ein statistisches Verfahren zur Bestimmung der urbanen Luftqualität entwickelt. Hierzu wurden zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messdaten einer mit Messgeräten ausgestatteten Stadtbahn in der Region Karlsruhe ausgewertet. An der Schnittstelle von Klimaforschung und Bauwesen wurden für ein Projekt zur Klassifizierung der Schadenswirkung von Frostperioden auf Beton die Häufigkeit des Auftretens und die regional differenzierte Verteilung von für die Frostschädigung kritischen Temperaturbereichen analysiert. In der Abschlussphase befindet sich das dreijährige Projekt „Bodenabtrag durch Wassererosion als Folge von Klimaveränderungen“.

Daneben war das Süddeutsche Klimabüro in vielfältiger Weise für die Vermittlung von Expertise in Wissenschaft und Gesellschaft aktiv. Das Süddeutsche Klimabüro war Unterstützer einer Ideen- und Kooperationsbörse zu „Hitze in der Stadt“ und vertrat mehrere Kooperationsangebote zu Kompetenzen der Klimaforschung am KIT. Die vom Umweltbundesamt (UBA) initiierte Ideen- und Kooperationsbörse zur Klimaanpassung fand im Juni 2013 in Karlsruhe als einer von drei bundesweiten Pilotregionen statt.



Abb. K.6: Tag der offenen Tür des Süddeutschen Klimabüros beim Wissenschaftsfestival EFFEKTE 2013. (Foto: Andreas Lang, KIT)

In Zusammenarbeit mit dem Norddeutschen Klimabüro und dem niederländischen Wetterdienst (KNMI) organisierte das Süddeutsche Klimabüro auf der General Assembly der European Geosciences Union (EGU) im April 2013 in Wien eine Vortragsitzung „Regional and National Climate Services - Experiences and New Ideas“, bei der Teilnehmer aus aller Welt Erfahrungen und bewährte Ansätze im Bereich der Klimakommunikation intensiv diskutierten.

Um den Transfer von Klimawissen in die Öffentlichkeit zu stärken, erstellte das Süddeutsche Klimabüro für insgesamt sechs Themenschwerpunkte Flyer (Abb. K.5), darunter „Klima und Extremereignisse“ und „Klima und Klimamodellierung“, die in allgemein verständlicher Form Wissen zu Klimathemen und zur Klimaforschung vermitteln.

Ein weiteres neues Informationsangebot ist die Broschüre „Dein Standpunkt zum Klima – Orte in Karlsruhe“. Die Zusammenschau stellt eine Anregung für die Bürger dar, Orte ihrer Stadt in Zusammenhang mit Klimainformationen zu sehen.

Die Informationsmaterialien wurden bei Auftritten des Süddeutschen Klimabüros bei unterschiedlichen Veranstaltungen verteilt, wie beim Jubiläum „25 Jahre Umweltministerium Baden-Württemberg“, bei der Ideen- und Kooperationsbörse „Hitze in der Stadt“ in Karlsruhe und bei einem Tag der offenen Tür im Rahmen des Karlsruher Wissenschaftsfestivals EFFEKTE 2013 (Abb. K.6).



Abb. K.5: Die Broschüren und Flyer zu verschiedenen Klimathemen sind unter www.sueddeutsches-klimabuero.de/schriften.php erhältlich. (Foto: Lydia Albrecht, KIT)

Die neue Wissensplattform zum Thema Meereis

Ein wichtiges Ziel von REKLIM ist es, die in den verschiedenen Arbeitsprozessen gewonnenen Ergebnisse als wissenschaftliche Basis für Entscheidungsträger aller gesellschaftlichen Ebenen und für die breite Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Ein solcher Wissenstransfer wird mit der neuen Internet-Plattform „meereisportal.de“ verfolgt. Sie ist die erste umfassende, deutschsprachige Wissensplattform rund um das Thema Meereis in der Arktis und Antarktis. Entwickelt wurde sie im Rahmen von REKLIM als Gemeinschaftsprojekt der Universität Bremen (Institut für Umweltphysik) und des Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, unter der Federführung der regionalen Helmholtz Klimabüros. Hintergrundinformationen, Expertenwissen und ein Karten- und Datenarchiv bilden die drei tragenden Säulen der Wissensplattform (Abb. M.1).

Bisher standen viele Informationen rund um das Thema Meereis nur in englischer Sprache zur Verfügung. Die erste Säule der neuen Webplattform verfolgt daher vorrangig das Ziel, umfangreiche und verständlich aufbereitete Informationen über das Thema Meereis in deutscher Sprache anzubieten. Fragen wie „Wie entsteht Meereis?“, „Wie wird es erforscht?“ oder „Welche Rolle spielt es für das Klima unserer Erde?“ werden auf der neuen Wissensplattform beantwortet. Die einzelnen Themen werden dabei in unterschiedlichen Vertiefungs- und Detaillierungsgraden vorgestellt.

Eine weitere Säule stellt das umfangreiche Karten- und Datenarchiv dar, in dem momentan für die vergangenen zehn Jahre bereits mehr als 7000 grafisch aufbereitete Meereiskarten und



Abb. M.1: Die wissenschaftliche Expertise wird durch die Meereisforschergruppen am AWI und an der Universität Bremen (IUP) getragen. Zusätzlich unterstützt das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg des AWI die Betreuung des Portals. (Grafik: AWI)



Abb. M.2: Die Eingangsseite der Internet-Plattform meereisportal.de (Grafik: AWI)

die dazugehörigen Daten für die eigene Weiterverarbeitung heruntergeladen werden können. In naher Zukunft werden in diesem Portal auch die weltweit ersten Karten zur Meereisdicke als Datenprodukte des ESA-Satelliten CryoSat-2 veröffentlicht werden.

Die dritte wichtige Säule von meereisportal.de stellt das herausragende Expertenwissen beider Partnerinstitutionen zu unterschiedlichen Themenbereichen des Meereises dar. Dieses bildet das Fundament der Wissensplattform und fließt in alle Bereiche des Portals ein. Daraus ergeben sich verschiedene maßgebliche Qualitätsmerkmale für die Plattform. So werden beispielsweise die Meereismessungen begleitenden Bewertungen und Einschätzungen direkt durch die Experten vorgenommen und diese stehen auch als Ansprechpartner für Fragen zur Verfügung. Zusätzlich wird durch die direkte Anknüpfung an wissenschaftliche Fragestellungen bei den in meereisportal.de dargestellten Themen eine hohe Aktualität gewährleistet. Von Meereisphysikern über Ozeanographen bis hin zu Meereismodellieren – sie alle werden auf meereisportal.de zu Wort kommen und verdeutlichen, auf welcher vielfältigen Art und Weise die Wissenschaft das Meereis untersucht und zu welchen Themen sie Auskunft geben können (Abb. M.2).

Auf meereisportal.de finden darüber hinaus auch die am AWI zum Thema Meereis durchgeführten Expeditionen eine berichtserstattende Heimat. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde bereits realisiert. Die zweimonatige Winterexpedition der „FS Polarstern“, die am 8. Juni 2013 startete, wurde mit aktuellen Bildern, Berichten und Hintergrundinformationen auf meereisportal.de dokumentiert und so einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Synthese

In seiner vierjährigen Laufzeit hat der Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen REKLIM seine wissenschaftlichen Ergebnisse in ca. 200 Publikationen, darunter einer Vielzahl von zentrenübergreifenden Arbeiten niedergelegt, die ohne den Verbund so nicht hätten erarbeitet werden können. Zum Ende des Jahres 2013 läuft die erste Förderperiode des Verbundes aus und wird ab 2014 als Querschnittsverbund der Helmholtz-Gemeinschaft parallel zu den einzelnen Forschungsprogrammen der verschiedenen Zentren weiter gefördert. Bis jetzt lassen sich schon folgende generelle Ergebnisse zusammenfassen, die in den einzelnen Themengebieten erzielt worden sind:

1. Die regionale Modellierung für die arktische Atmosphäre wurde erfolgreich weiter entwickelt und durch effiziente Wolkenschemata erweitert, die durch Vergleich mit Satellitendaten angepasst wurden. Der Einfluss interner Modellvariabilität auf die arktische Meereisausdehnung wurde in einem gekoppelten regionalen Klimasystemmodell der Arktis untersucht. Die beobachtete Meereisabnahme wird in den regionalen Modellsimulationen wesentlich durch Änderungen im seitlichen atmosphärischen Randantrieb bestimmt. Arktische Klimaprozesse beeinflussen zudem die polaren Strahlströme und Telekonnectionsmuster mittlerer Breiten. Spezielle Weiterentwicklungen in Bezug auf Kopplungen mit Landoberflächenmodellen und Modellen der Atmosphärenchemie zur Verbesserung der regionalen Vorhersage wurden erfolgreich implementiert.

2. Die Massenbilanzen für Grönland und die Antarktis wurden aus Schwerefeldern der GRACE-Mission abgeleitet sowie Modellentwicklungen vorangetrieben, die in einem voll gekoppelten Erdsystem-Modell-Ansatz mit Eisschild und viskoelastischer Lithosphärenresponse zur Untersuchung langfristiger Klimaänderung dienen. Diagnostische Meeresspiegeländerungen auf globaler Skala bis hin zur Analyse von Pegeldaten in der Deutschen Bucht wurden untersucht und charakteristische Muster abgeleitet. Diese dienen zur Verifikation hochaufgelöster Modellierungen ozeanischer Zirkulationsmuster in Schlüsselregionen.

3. Langzeitbeobachtungen im arktischen Ein- und Ausstromgebiet der Framstraße wurden fortgesetzt und die Rolle des warmen Einstroms aus dem Atlantik für die Meereisentwicklung untersucht. Darüber hinaus konnten weitere Fortschritte im Monitoring des arktischen Permafrost und der assoziierten Methanflüsse erzielt werden, die auch zur Verifikation und Entwicklung von verbesserten Klimamodellen beitragen.

4. Messungen, Modellierung und Instrumentierungen von Landoberflächenobservatorien wurden vorangetrieben. Insbesondere konnten Parametrisierungen der regionalen Energie- und Wasserflüsse zwischen Biosphäre und Atmosphäre verbessert sowie der Einfluss bo-

denhydraulischer Eigenschaften und die Beschreibung der Vegetation auf die Modellierung von Flüssen an der Landoberfläche untersucht werden. TERENO Observatorien liefern damit die Datengrundlage für die Entwicklung neuer Parametrisierungsmethoden für modellgetriebene regionale Klimaimpaktanalysen.

5. Mit der Weiterentwicklung gekoppelter Chemie-Klimamodelle zu physikalischen und chemischen Vorgängen in der Atmosphäre bis in die Stratosphäre konnten wichtige Erkenntnisse zum Einfluss von Aerosolen und Spurengasen auf die Klimaentwicklung erzielt werden. Insbesondere die Kombination von Satellitenbeobachtungen, Flugzeugmessungen bis hin zu Experimenten in einer Aerosolkammer zur Wolkenkondensation trugen dazu bei, die Modelle zu verbessern und verlässlichere Vorhersagen machen zu können.

6. Die Ursachen und langzeitlichen Änderungen von Extremereignissen wie Stürme, Hagel, Hochwasser oder Dürre konnten durch Verbesserungen in Analysemethoden sowie durch Repräsentation kleinskaliger Prozesse in regionalen Modellen genauer erfasst und quantifiziert werden.

7. Die Unterstützung integrierter Klimapolitik im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitung lieferte innovative Argumente für eine ökonomisch optimale Wahl klimapolitischer Maßnahmen und trug dazu bei, die strategische Ausrichtung von Klimaschutz-Investitionen und Anpassungsmaßnahmen in internationalen Verhandlungen besser zu steuern.

8. Durch die Entwicklung neuer Klimaproxies in lakustrinen und marinen Sedimenten und die Weiterentwicklung und Anwendung von Modellsimulationen der Tiefenwasserzirkulation im Nordatlantik und Nordpazifik konnten neue Erkenntnisse über die Mechanismen gewonnen werden, mit denen äußere (Solaraktivität) und interne (Schmelzwasserzufluss in nordhemisphärischen Ozeanen) Faktoren auf das Klimasystem einwirken und welche Rolle dabei die jeweils vorherrschenden Klimagrundzustände spielen.

9. Die Übertragung klimainduzierter Umweltveränderungen auf die Luftqualität und Gesundheit bildet eine Brücke zwischen Klima- und Gesundheitsforschung mit gesellschaftlich höchster Relevanz. Erste Ergebnisse zu aktuellen Entwicklungen lassen klare Rückschlüsse für die Bevölkerung vor allem in Ballungsräumen zu. Klimaszenarien werden entsprechend implementiert.

10. Für Risikoabschätzungen und -management ist die Weiterentwicklung der Anpassungsforschung unabdingbar. Es wurden Wissenslücken geschlossen, bzw. fehlendes Wissen und damit verbundene Risiken an die breite Öffentlichkeit kommuniziert, um dadurch Anpassungsstrategien auf wissenschaftlicher Basis entwickeln zu können.

Ausblick

Im September 2013 wird der Zwischenstaatliche Sachverständigenrat für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) den 5. Sachstandsbericht (Assessment Report 5, AR5) vorlegen. Mehr als 250 Wissenschaftler aus 44 Nationen haben den ersten Teil, die „Wissenschaftliche Grundlage“, aus dem aktuellen Wissensstand begutachteter Veröffentlichungen nach 2007 in einem mehrstufigen Verfahren zusammengefasst. Die Ergebnisse werden in Stockholm vorgestellt.

Im Gegensatz zu 2007, als der IPCC-Bericht durch seine Aussage, dass der Klimawandel in den letzten 50 Jahren sehr wahrscheinlich durch den Menschen verursacht worden ist, eine große Aufmerksamkeit erzielte und sich eine große Diskussion zum Thema Klimawandel und Klimafolgen entwickelte, ist das Thema heute in der öffentlichen Wahrnehmung leider eher wieder in den Hintergrund gerückt. Insgesamt fünf große UN-Klimakonferenzen (Posen 2008, Kopenhagen 2009, Cancun 2010, Durban 2011, Doha 2012) wurden abgehalten, ohne dass ein Durchbruch auf internationaler Basis erzielt wurde, oder eine Perspektive für das im Jahr 2012 ausgelaufene völkerrechtlich verbindliche Klimaabkommen (Kyoto-Protokoll) zu entwickeln. Bis 2015 soll nun eine Post-Kyoto-Regelung erarbeitet werden.

Ungeachtet der politischen Schwierigkeiten im internationalen Rahmen und einzelner Fortschritte im Bemühen, den CO₂-Ausstoß grundlegend zu reduzieren, schreitet

der Klimawandel ungebremst voran: Die sommerliche Meereisausdehnung in der Arktis hat im Jahr 2012 ein historisches Minimum erreicht, weltweit nehmen Extremereignisse wie Hurricanes und Stürme in ihrer Häufigkeit zu, die letzte Dekade war die wärmste Epoche seit der Temperaturaufzeichnung.

Die im REKLIM-Verbund erforschten Erkenntnisse auf dem Gebiet der regionalen Auswirkungen füllen hier aber eine entscheidende Lücke, in dem die wissenschaftliche Basis regionsspezifisch erweitert, die Prozesse detaillierter untersucht und durch Modellierungen auf die Regionalskala projiziert werden. So wird durch die breite Kompetenz der Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Gebiet der Erd- und Umweltwissenschaften und im Verbund mit universitären Partnern das Prozessverständnis erweitert und im Dialog mit den Betroffenen und Entscheidungsträgern vor Ort Hilfestellung und Beratung geschaffen. Hier sind insbesondere die vier Klimabüros, das Climate Service Center, sowie wissenschaftliche Workshops und Konferenzen als Multiplikatoren unserer Forschungsergebnisse am Puls der Zeit.

Für Oktober 2014 ist es geplant, in einer ersten Synthese die Ergebnisse des Verbunds in einer internationalen Konferenz in Berlin zur Diskussion zu stellen und in einem Tag für die Öffentlichkeit zu präsentieren.

Fotonachweise und Referenzen

Fotonachweise:

Foto Umschlag Innenseite: Alfred-Wegener-Institut, Foto Seite 1 waagrecht von links oben nach rechts unten: Foto 1: Peter Lemke, Foto 2: André Künzelmann, Foto 3: Heidi Kassens, Foto 4: Johannes Käbbohrer, Foto 5: Matthias Mauder, Foto 6: AeroArt, Foto 7: Hannes Grobe, Foto 8: © dpa, Foto 9: André Künzelmann, Foto 10: AWI Rechenzentrum, Foto 11: Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Foto 12: Torsten Sachs, Foto 13: Hand Oerter, Foto 14: © VGMeril/PIXELIO, Foto 15: realnature.tv, Foto 16: © Georg Müller, Foto 17: ESA, Foto 18: Forschungszentrum Jülich, Foto 19: IMK-IFU, Foto 20: © picture-alliance/dpa, Foto Seite 32: Markus Rex.

Referenzen:

- Ahmad Majd, A.C., M. Moin, M. Gholami, S. Kohno, T. Nabe, and M.A. Shariatzade, 2004: The effects of air pollution on structures, proteins and allergenicity of pollen grain, *Aerobiologia*, 20(2), 111-118.
- Beelen, R., and 48 co-authors, 2013: Development of NO₂ and NO_x land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe - The ESCAPE project. *Atmospheric Environment* 72, 10-23.
- Behrendt, H. and W.M. Becker, 2001: Localization, release and bioavailability of pollen allergens: the influence of environmental factors. *Current Opinion in Immunology*, 13(6), 709-715.
- BMVBS (Hrsg.): Bewertung und Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung. BMVBS-Online-Publikation 11/2013: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Ablage_Meldungen/BMVBSOnline11.html.
- Bond, T. C., and 30 co-authors, 2013: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 118, doi:10.1002/jgrd.50171.
- Breitner, S., Wolf, K., Devlin, R.B., Diaz-Sanchez, D., Peters, and A., Schneider, 2013: A. Short-term associations of air temperature and mortality in three cities of Bavaria, Germany: a time-series analysis (submitted).
- Collins, J. A., A. Govin, S. Mulitza, D. Heslop, M. Zabel, J. Hartmann, U. Röhl, and G. Wefer, 2013a: Abrupt shifts of the Sahara-Sahel boundary during Heinrich stadials. *Climate of the Past* 9, 1181-1191, doi:10.5194/cp-9-1181-2013.
- Collins, J. A., E. Schefuß, S. Mulitza, M. Prange, M. Werner, T. Tharammal, A. Paul, G. Wefer, and G. 2013b: Estimating the hydrogen isotopic composition of past precipitation using leaf-waxes from western Africa. *Quaternary Science Reviews* 65, 88-101, doi:10.1016/j.quascirev.2013.01.007.
- Cyrus, J., and 52 co-authors, 2012: Variation of NO₂ and NO concentrations between and within 38 European study areas: results from the ESCAPE study. *Atmospheric Environment*. 62, 374-390, 2012.
- Eckl-Dorna J., B. Klein, T. G. Reichenauer, V. Niederberger, and R. Valenta, 2010: Exposure of rye (*Secale cereale*) cultivars to elevated ozone levels increases the allergen content in pollen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 126(6), 1315-1317.
- Eeftens, M., and 44 co-authors, 2012a: Variation of PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5} absorbance and PM_{coarse} concentrations between and within 20 European study areas - results of the ESCAPE project. *Atmospheric Environment*. 62, 303-317.
- Eeftens, M., and 44 co-authors, 2012b: Development of land use regression models for PM_{2.5}, PM_{2.5} absorbance, PM₁₀ and PM_{coarse} in 20 European Study Areas; Results of the ESCAPE Project. *Environmental Science Technology* 46, 11195-11205.
- Faber, A., P. Llamedo, T. Schmidt, A. de la Torre, and J. Wickert, 2013: A new approach to global gravity wave momentum flux determination from GPS radio occultation data, *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, 6, 2907-2933, www.atmos-meas-tech-discuss.net/6/2907/2013/, doi:10.5194/amtd-6-2907-2013.
- Fadnavis, S., K. Semeniuk, L. Pozzoli, M. G. Schultz, S. D. Ghude, and S. Das, 2013: Transport of aerosol pollution in the UTLS during Asian summer monsoon as simulated by ECHAM5-HAMMOZ model, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 12, 30081-30117, 2012. (quasi "in press" 2013)
- Glatthor, N. and 12 co-authors, 2013: The Australian bushfires of February 2009: MIPAS observations and GEM-AQ model results, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1637-1658, doi:10.5194/acp-13-1637-2013.
- Grewe, V., K. Dahmann, S. Matthes, and W. Steinbrecht, 2012: Attributing ozone to NO_x emissions: Implications for climate mitigation measures, *Atmospheric Environment*, 59, 102-107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.002>.
- Guedes A, R.N., H. Ribeiro, M. Oliveira, F. Noronha, and I. Abreu, 2009: Comparison between urban and rural pollen of *Chenopodium alba* and characterization of adhered pollutant aerosol particles. *Aerosol Science*, 40, 81-86.
- Kerkweg, A., and P. Jöckel, 2012: The 1-way on-line coupled atmospheric chemistry model system MECO(n) Part 1: Description of the limited-area atmospheric chemistry model COSMO/MESy, *Geoscientific Model Development*, 5, 87-110, doi:10.5194/gmd-5-87-2012.
- Klaus, D., 2013: Validierung und Verbesserung der arktischen Wolkenparametrisierung im regionalen Atmosphärenmodell HIRHAM5, *Dissertationsschrift, Universität Potsdam*, (vor Einreichung).
- Martrat, B., J. O. Grimalt, N. J. Shackleton, L. de Abreu, M. A. Hutterli, and T. F. Stocker, 2007: Four climate cycles of recurring deep and surface water destabilizations on the Iberian Margin, *Science*, 317, 5837, 502-507, doi: 10.1126/science.1139994.
- Mohr, S., and M. Kunz, 2013: Changes in the hail potential over past and future decades: using a logistic hail model. *Journal of Geophysical Research* (submitted).
- Semenov, V., and M. Latif, 2012: The early twentieth century warming and winter Arctic Sea ice. *The Cryosphere*, 6, 1231-1237, doi:10.5194/tc-6-1231-2012.

AWI | DLR | FZJ | GEOMAR | GFZ | HMGU | HZG | KIT | UFZ

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungszentrum Jülich

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum

Helmholtz Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Helmholtz -Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung

Karlsruher Institut für Technologie

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

www.reklim.de

