

# REKLIM

Helmholtz-Verbund  
Regionale Klimaänderungen

Regionale Klimaänderungen – Ursachen und Folgen

## NEWSLETTER Nr. 2

| September 2012



HELMHOLTZ  
| GEMEINSCHAFT

HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL

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



# Herausforderung Klimawandel

## Klimaforschung im Verbund

In seiner nun 3-jährigen Laufzeit hat sich der Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen (REKLIM) eng zusammen gefunden und wichtige Erkenntnisse auf dem Gebiet der regionalen Klimaentwicklung erarbeitet. Bei einem weiterhin ungebrochenem weltweiten Trend in der Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen in die Atmosphäre und einer gleichzeitig steigenden globalen Mitteltemperatur ist es umso wichtiger, die Ursachen, Rückwirkungsprozesse und Folgen, insbesondere auf der regionalen Skala besser verstehen und beurteilen zu können, um verbesserte Projektionen kommunizieren und Anpassungsmaßnahmen ableiten zu können.

Themen wie eine Zunahme von Wetterextrema (Starkniederschläge, Hochwasser oder Dürren) oder die Veränderung in der Niederschlagsstatistik betreffen jeden Einzelnen und werden mit Besorgnis wahrgenommen. Was für den Einen eine beunruhigende Entwicklung ist, kann für den Anderen eine Existenzbedrohung darstellen (z.B. Landwirtschaft). Daher spielt das bessere Verständnis der vorherrschenden Prozesse und Wechselwirkungen und die Weiterentwicklung hochauflösender regionaler Modelle durch verbesserte Parametrisierungen eine wichtige Rolle im Verbund.

Hiermit verknüpft ist die genaue Kenntnis der atmosphärischen Prozesse, der physikalischen und chemischen Vorgänge in der Atmosphäre sowie der Wechselwirkungen auf der Mikroskala, insbesondere für die Landoberflächen. Denn erst durch die Ableitung besserer Parametrisierungen dieser Prozesse für

die Modellierung auf der globalen bis hin zur regionalen Skala können die Beobachtungen besser nachvollzogen werden und in einem nächsten Schritt auch die anthropogenen Veränderungen projiziert werden. Als Beispiele seien hier die Auswirkungen von Spurengasen sowie Aerosolen und Feinstäuben auf die Wolkenbildung und die Strahlungsbilanz sowie die hydro-meteorologischen Wechselwirkungen in der Bodenfeuchtedynamik als Voraussetzung für ein verbessertes Verständnis der Vegetationsrückwirkungen im Klimasystem genannt.

Auf der globalen Skala sind Prozesse in den polaren Breiten, insbesondere in der Arktis, ein wesentlicher Beitrag in der Detektion von Klimaveränderungen. Beobachtungen belegen, dass gerade die polaren Breiten verstärkt auf Veränderungen reagieren, was sich insbesondere in einem zunehmenden Meereisrückgang und einem verstärkten Abschmelzen von Grönland niederschlägt, mit Folgen für Ozean, Permafrostgebiete (auch submarin) und Ökosystem.

Um diese vielfältige Forschung zu leisten, vereint der REKLIM Verbund eine Vielzahl von Beobachtungen, angefangen von den Satellitenmessungen, über Flugzeug- bis hin zu *In-situ* Beobachtungen und kombiniert diese mit Weiterentwicklungen von Modellen auf globaler bis hin zu regionaler Skala. Im Newsletter 2012 werden einzelne Aspekte der im letzten Jahr erarbeiteten Ergebnisse exemplarisch präsentiert.

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



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

*Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft*

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

*Forschungszentrum Jülich*

*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

*Universität Bremen (UHB)*

*Universität Hamburg (UHH)*

*Universität Heidelberg (UHD)*

*KIT - Universitätsbereich (UKA)*

*Universität zu Köln (UK)*

*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 für Polar- und Meeresforschung  
in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Bussestraße 24, 27570 Bremerhaven

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, 2012

## 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  
für Polar- und Meeresforschung  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

## 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. Rolando di Primio (GFZ),  
Prof. Dr. Ursula Schauer (AWI)

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 (HZG/UFZ)  
Prof. Dr. Beate Ratter (HZG)

## Gestaltung:

© KLEMM BREMEN.DE

Koordinierungsstelle REKLIM

## Druck:

BerlinDruck, Achim



# Inhalt

<b>1</b>	Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme	4
<b>2</b>	Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz	6
<b>3</b>	Regionale Klimaänderungen in der Arktis: Steuerung und Langzeiteffekte am Übergang Land-Ozean	8
<b>4</b>	Die Landoberfläche im Klimasystem	10
<b>5</b>	Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala	12
<b>6</b>	Extreme Wetterereignisse – Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren	14
<b>7</b>	Sozioökonomie und Management für regionale Klima-Anpassungs- und Vermeidungsstrategien	16
<b>8</b>	Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten	18
<b>9</b>	Klimawandel und Luftqualität	20
<b>10</b>	Risikoabschätzungen und Risikomanagement für Klimaanpassungsstrategien	22
	Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg	24
	Norddeutsches Klimabüro	25
	Mitteldeutsches Klimabüro	26
	Süddeutsches Klimabüro	27

## 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

Im Rahmen von REKLIM werden räumlich hochaufgelöste regionale Klimasystemmodelle entwickelt, in denen Modelle für die verschiedenen Klimakomponenten Atmosphäre, Ozean, Meereis, Land und Aerosolchemie miteinander gekoppelt werden. Ziel ist es, die bisher vorliegenden globalen Klimaprojektionen, die nur in grober räumlicher Auflösung von teilweise mehreren 100 km existieren, für die regionale Skala aufzuarbeiten. Dies stellt eine Schwierigkeit dar, da mit steigender räumlicher Auflösung Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem detaillierter dargestellt und repräsentiert werden müssen, und nur so die lokalen Einflüsse auf das Klima erfasst und verlässliche Projektionen erstellt werden können.

Im REKLIM-Verbund fokussiert sich das Alfred-Wegener-Institut (AWI) mit regionalen Erdsystemmodellen (RESM) insbesondere auf das Gebiet der Arktis. Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) entwickelt diese RESM 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.

## Atmosphäre-, Ozean-, Meereis- und Permafrostfeedbacks

Die Meereisbedeckung in der Arktis ist ein wichtiger Indikator für Klimaveränderungen und löst darüber hinaus Rückkopplungsprozesse aus, die das Fortschreiten dieser Veränderung forcieren. Die Kenntnis dieser Prozesse ist daher wichtig, um zukünftige Veränderungen genauer projizieren zu können. Mit dem gekoppelten regionalen Klimamodell HIRHAM-NAOSIM,

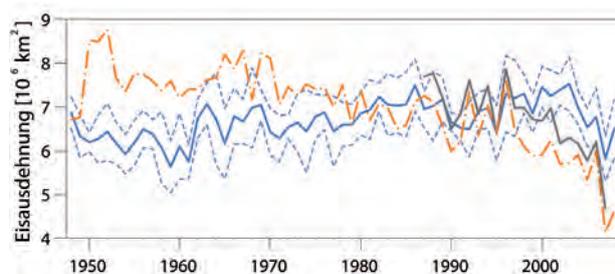


Abb. 1.1: Zeitliche Änderung der arktischen Meereisausdehnung für den Monat September in den Ensemblesimulationen, den NCEP Reanalyse- und SSM/I Satellitendaten. Die blaue Linie zeigt das Ensemblemittel, die gestrichelten blauen Linien stellen den Bereich der doppelten Standardabweichung dar. Die orange Linie stellt die NCEP Daten und die graue Linie die SSM/I Daten dar. (Grafik: AWI/Dorn et al., 2012)

das die räumliche Verteilung von dünnem und dickem Meereis recht gut wiedergibt, wurden 7 Ensemble-Simulationen für die Periode 1948–2008 durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die atmosphärische Zirkulation im Sommer die entscheidende Rolle für die Änderungen der Meereisausdehnung spielt. In Sommern mit Tiefdruckgebieten über dem Arktischen Ozean ist die Meereisabnahme deutlich geringer als in Sommern mit Hochdruckgebieten. Hochreichende warme Hochdruckgebiete und geringere Zyklonenaktivität führen somit zur Meereisreduktion in der Arktis. Die simulierte Eisvariabilität weist deutliche dekadische Variationen auf, deren Amplitude zwischen den Ensemblemitgliedern schwankt (Abb. 1.1). Die Variabilität im Winter wird im Gegensatz dazu vorwiegend durch externe Prozesse angetrieben, während sie im Sommer durch interne Rückkopplungsprozesse bestimmt wird.

Für Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis über der Nord- und Ostseeregion wurde das Modellsystem COSTRICE entwickelt. Die Komponenten dieses Systems sind das regionale Klimamodell der Atmosphäre CCLM (COSMO-CLM), das regionale Ozeanmodell TRIMNP und das Meereismodell CICE. Für den Austausch zwischen den Komponenten sorgt der Koppler OASIS (Abb. 1.2). In einer Teststudie wurde COSTRICE für Simulationen über der Nord- und Ostsee für Winter- und Sommermonate des Jahres 1997 angewendet. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung (13km x 13km) im Vergleich zu den Globaldaten (200km x 200km) und der Interaktion mit der Atmosphäre erzeugte das Ozeanmodell TRIMNP über eisfreien Gebieten in der gekoppelten Version bessere Monatsmittelwerte der Meeresoberflächentemperatur (SST) als in der ungekoppelten Version. Ohne Eisschema tendiert TRIMNP zu einer Unterschätzung der SST und Überschätzung der Oberflächentemperatur über den Meereisgebieten des Bottnischen Meerbusens. Ziel der Entwicklung ist eine verbesserte Simulation des regionalen Klimas über dem Nord- und Ostseegebiet durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis.

## Aerosol-, Wolken- und Spurengaseinflüsse auf das Klima Europas

Das Modellsystem COSMO-ART wurde bezüglich der Behandlung der Wechselwirkung zwischen Aerosolpartikeln und Wolken weiterentwickelt und beinhaltet derzeit 60 chemische Konstituenten und 111 Aerosoltracer sowie deren Kopplung über die Strahlung. Die Hitzewelle des Sommers 2003 mit extrem

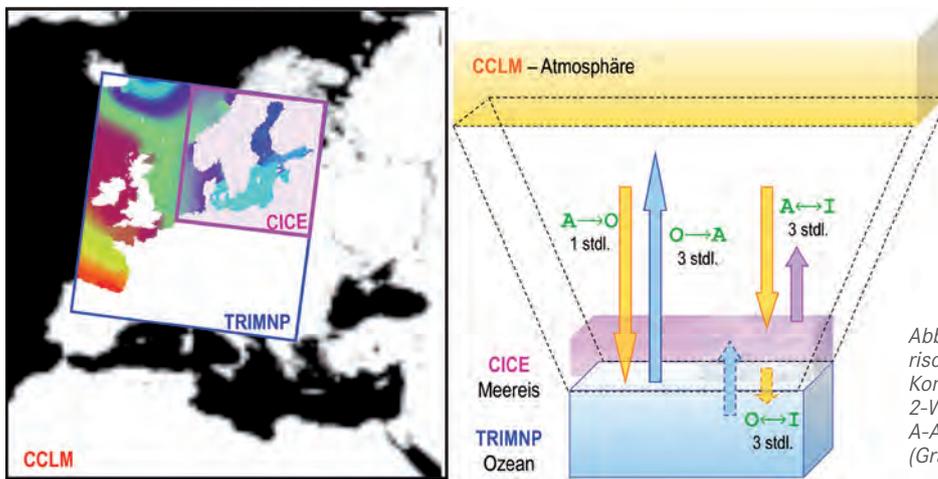
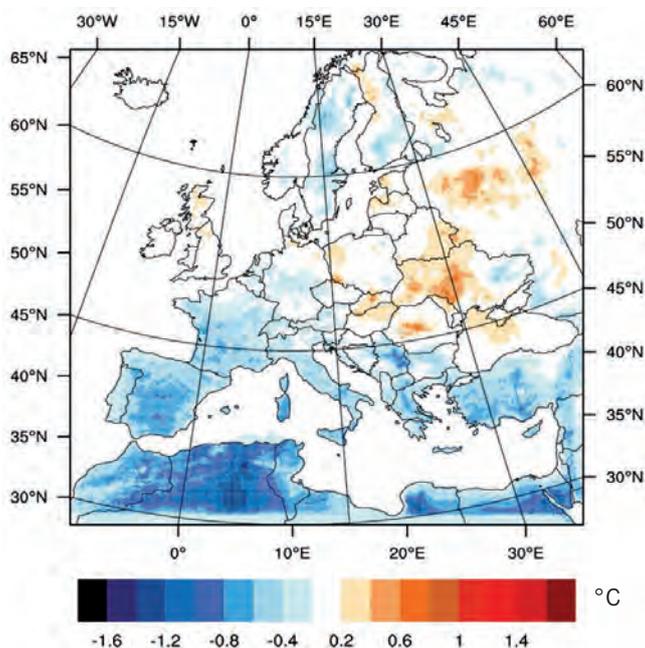


Abb. 1.2: Modellgebiete der atmosphärischen, ozeanischen und Meereis-Komponente (links) und das Schema der 2-Wege-Kopplung (rechts) in COSTRICE. A-Atmosphäre; O-Ozean; I-Meereis. (Grafik: HZG)

warmen Hochdruckgebieten über Europa wurde mit diesem Modellsystem nachsimuliert. Die extremen Temperaturen über Westeuropa wurden demnach durch den Aerosoleinfluss infolge mineralischen Staubeintrags aus der Sahara und dessen Wirkung auf die kurzwellige Strahlung um ca. 1°C reduziert. Im Gegensatz dazu trat eine Temperaturerhöhung über Osteuropa auf, die mit Absorptionseffekten durch Rußpartikel im langwelligen Strahlungsbereich und mit Wolkenprozessen verbunden sind (Abb. 1.3). Bisher wurde das Modellsystem COSMO-ART für Prozessstudien eingesetzt, die Episoden von wenigen Tagen überdecken. Durch die Simulation der Hitzewelle 2003 konnte gezeigt werden, dass das Modellsystem auch im Klimamodus betrieben werden kann. Die durchgeführten Untersuchungen bilden die Grundlage für längerfristige Simulationen über Zeiträume von mehreren Jahren. Die Ergebnisse dienen dabei als Bezugswert für notwendige Modellvereinfachungen, die aus Rechenzeitgründen erforderlich sind.

### **Einfluss von Landoberflächen- und Bodenprozessen auf das Regionalklima**

Eine Sensitivitätsanalyse mit dem ungekoppelten Landoberflächenmodell Community Land Model (CLM) Version 3.5 wurde mit dem Ziel der Parameterreduzierung bei zukünftiger Anpassung zur Nutzung in atmosphärischen Modellen durchgeführt. Zielgrößen waren hierbei die Flüsse latenter und sensibler Wärme sowie die Photosynthese. Die Sensitivitätsanalyse



zeigt, dass zwei Drittel der Parameter in weiteren Schritten wie Parameterbestimmung oder Datenassimilation berücksichtigt werden müssen, wenn man 99% Genauigkeit im Vergleich zum Gesamtmodell erreichen will.

Mit Hilfe einer Sensitivitätsstudie mit dem CCLM wurde die Spannbreite von möglichen Klimaänderungen aufgrund von extremen Landnutzungsänderungen für Norddeutschland abgeschätzt. Deutlichste Änderungen traten infolge von starker Bodenversiegelung und der Zunahme der Bodenrauigkeit im Sommer auf.

Für die Arktis wurden gekoppelte Atmosphäre-Permafrost Simulationen mit dem HIRHAM-LSM durchgeführt und in Sensitivitätsstudien der Einfluss veränderter Vegetation und Landoberflächenparameter auf zukünftige projizierte arktische Klimaänderungen untersucht. Anhand der simulierten Temperaturänderung und abgeleiteter Indizes wurden so potentielle zukünftige Änderungen der Permafrostbedingungen abgeschätzt und es konnte gezeigt werden, dass dynamische Rückkopplungen zwischen Land und Atmosphäre großskalige Zirkulationsänderungen hervorrufen.

### **Einfluss von interner Variabilität und Emissionsszenarien auf das regionale Klima**

Mit dem CCLM wurden hochaufgelöste Ensemble-Klimasimulationen für Europa und Deutschland generiert, indem der großskalige atmosphärische Antrieb aus ERA40-Reanalysen in alle Himmelsrichtungen bezüglich der Orographie verschoben wurde. Ziel ist es hierbei, die mit großskaligen atmosphärischen Zirkulationsmustern und dem regionalen Klimamodell verbundenen Unsicherheiten zu erfassen. Die CCLM-Simulationen mit einer Auflösung von 50 km wurden für Mitteleuropa hinsichtlich des Effekts der Verschiebungen auf Temperatur- und Niederschlagsklimatologien bei unterschiedlichen Wetterlagen untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Mehrwert der Verschiebungsmethode insbesondere bei der verbesserten Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und Intensität von Extremereignissen liegt. Im nächsten Schritt werden auf Basis der Verschiebungen CCLM-Simulationen mit einer Auflösung von 7 km für vergangene und zukünftige Dekaden durchgeführt, um Klimaänderungssignale für Klimamittelwerte und Extremereignisse zu bestimmen.

Abb. 1.3: Differenz (15/06/2003 – 20/08/2003) der 2m-Temperatur über West-Europa: Temperaturreduktion über Nordafrika durch Staubeintrag aus der Sahara; Temperaturerhöhung über Osteuropa durch absorbierende Rußpartikel oder Wolkenrückkopplungen durch Atmosphärenchemie. (Grafik: 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?*

Die in den letzten Jahrzehnten beobachtete Klimaerwärmung auf der Erde führt nicht nur zu einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur, sondern hat langfristig auch Auswirkungen auf den mittleren Meeresspiegel. Hier spielen zwei Mechanismen eine wesentliche Rolle: Zum einen kommt es durch die Erwärmung der Ozeane zu einer thermischen Ausdehnung des Wassers, das folglich mehr Volumen einnimmt (sterischer Beitrag). Zum anderen führen gestiegene Luft- und Ozeantemperaturen zu einem verstärkten Schmelzen von Gletschern und Teilen der großen Eisschilde in Grönland und der Antarktis, die dadurch zusätzliches Süßwasser in die Ozeane eintragen (eustatischer Beitrag). Beide Prozesse zusammen tragen derzeit etwa mit gleicher Stärke zum Meeresspiegelanstieg bei. Beobachtungen der letzten Jahre lassen jedoch darauf schließen, dass sich insbesondere der Beitrag durch Schmelzprozesse auf Grönland verstärkt und mit einer beschleunigten Anstiegsrate für den Meeresspiegel gerechnet werden muss.

## Eismassenbilanz und globale Auswirkungen

Mithilfe von Satellitenbeobachtungen und insbesondere der Satellitenmission GRACE ist es seit dem Jahr 2002 möglich, die Massenbilanz der beiden Eisschilde regional zu quantifizieren. Bei dieser Mission messen zwei Satelliten im Tandemflug

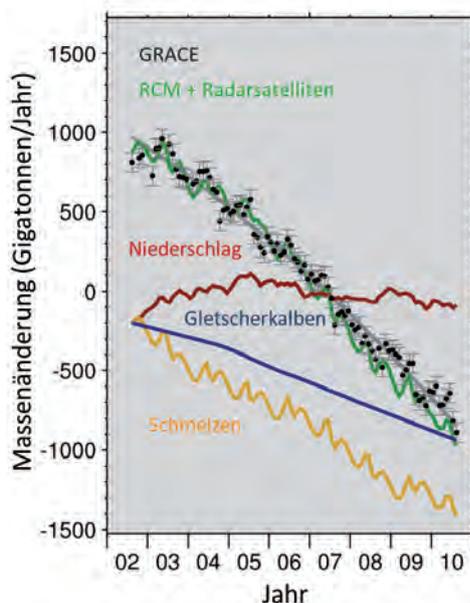


Abb. 2.1: Zeitliche Eismassenänderung in Grönland zwischen 2002 und 2011. GRACE-Daten (schwarz); Anomalien im Niederschlag (rot) und Schmelzen (gelb) von einem regionalen Klimamodell (RCM) und Anomalien im Ausfluss der Gletscher und Eisströme aus Daten der Radar-Interferometrie (blau), und deren Summe (grün); bezogen auf die Mittelwerte von 1961 bis 1990. (Grafik: Ingo Sasgen, GFZ)

kleinste Veränderungen der Erdanziehungskraft, die beispielsweise durch das Schmelzen von Eis auf den Kontinenten oder den Gletscherabfluss entstehen und entsprechend in eine Massenänderung umgerechnet werden können. Innerhalb von REKLIM wurden nun die GRACE-daten mit weiteren Beobachtungen verglichen, um aufzuzeigen, welchen Anteil Schmelzen, Eisbergkalben und Schwankungen im Niederschlag am gegenwärtigen Massenverlust von Grönland haben. So ist eine Zunahme des Massenverlustes im Nordwesten nach 2005 zum Teil auf starke Niederschläge in der Zeit davor zurückzuführen und auch in der Massenbilanz für das gesamte Eisschild sichtbar (Abb. 2.1). Dieser vorherige Massenzuwachs wurde in den folgenden Jahren abgebaut, was zu einer Beschleunigung des Nettomassenverlustes führt. Für alle untersuchten Regionen sind die Schmelz- und Kalbungsraten zwischen 2002 und 2011 außergewöhnlich hoch im Vergleich zu Abschätzungen über die letzten fünf Jahrzehnte.

Das Schmelzen der großen Eisschilde und insbesondere der beobachtete Massenverlust Grönlands erhöhen nicht nur den Meeresspiegel, sondern beeinflussen das gesamte Klimasystem. In einer Studie mit einem gekoppelten globalen Erdsystemmodell (Abb. 2.2) werden auf globaler Skala die Wechselwirkungsprozesse zukünftiger Klimaentwicklungen auf das Erdsystem untersucht. Hierzu wurde ein dynamisches Eisschildmodell in ein Erdsystemmodell integriert, das die Rückkopplungsprozesse wie beispielsweise Änderungen der Höhe und des Rückstrahlvermögens (Albedo) sowie Schmelzwasserabfluss auf die Atmosphäre und den Ozean beschreibt. Im letzten Klimastatusbericht (IPCC) 2007 wurden die Projektionen für die Klimaentwicklung bis zum Jahr 2100 mit einem Erdsystemmodell und einem fest vorgeschriebenen Eisschild berechnet, was die wichtigen Wechselwirkungsprozesse durch das Schmelzen von Inlandeis nicht beinhaltete. Derzeit werden daher Szenarienrechnungen für verschiedene CO<sub>2</sub>-Entwicklungen bis zum Jahr 2300 mit dem voll gekoppelten Erdsystemmodell durchgeführt. Die globalen Auswirkungen lassen sich damit besser beurteilen. Diese Berechnungen sollen Eingang in den nächsten Klimastatusbericht finden, der 2013 veröffentlicht wird.

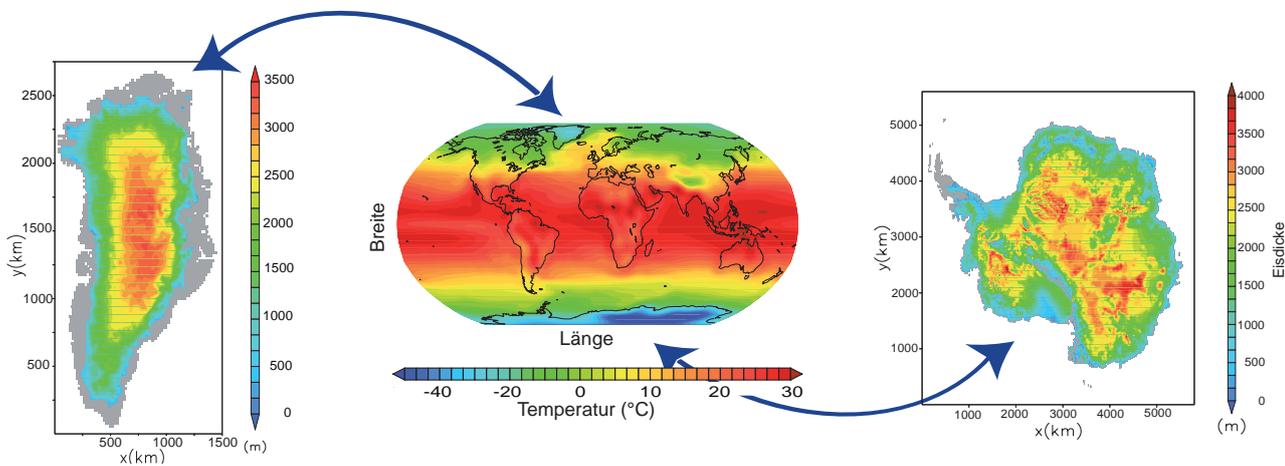


Abb. 2.2: Das gekoppelte Erdsystemmodell zur Untersuchung von langfristigen Klimaänderungen besteht aus einem Atmosphärenmodell (ECHAM5), einem Ozeanmodell (MPI-OM) mit MeereisKomponente sowie einem Eisdildmodell (RIMBAY). Die jeweiligen Antriebsdaten der verschiedenen Modelle werden gegenseitig ausgetauscht und so die Wechselwirkungsprozesse im Klimasystem berücksichtigt. (Grafik: AWI)

### Globale und regionale Meeresspiegeländerungen

Um den sterischen Meeresspiegelbeitrag genauer zu quantifizieren, wurden im Nordatlantik die Änderungen der lokalen Meeresspiegelhöhe, der Dichte des Meerwassers sowie die Verteilung der Ozeanmasse während der letzten 8 Jahre untersucht. Für den Zeitraum von Mitte 2002 bis Ende 2010 verzeichneten Altimetersatelliten im Nordatlantik keine Änderung der Meeresspiegelhöhe zwischen dem Äquator und 55°N. Mit Argo-Driftern (autonome Driftbojen zur Vermessung von Ozeantemperatur, -salzgehalt und -strömung) wurde für dieses Gebiet zeitgleich eine Zunahme der Dichte in den oberen 2000 m beobachtet, die einem Absinken des Meeresspiegels um ca. 1 mm/Jahr entspricht. Die GRACE-Satelliten registrierten im selben Zeitraum eine Zunahme der Ozeanmasse, äquivalent zu einem Anstieg um ca. 0,5 mm/Jahr. Inwieweit es sich bei den fehlenden 0,5 mm/Jahr um Messungenauigkeiten oder aber um ein reales Dichtesignal aus dem tiefen Ozean (z.B. Erwärmung des Tiefenwassers) handelt, muss weiter untersucht werden.

Zwar hat sich der mittlere Meeresspiegel im Nordatlantik seit 2002 nur wenig verändert, regional ergibt sich jedoch ein differenzierteres Bild. Im tropischen und subpolaren Nordatlantik stieg der Meeresspiegel um bis zu 5 mm/Jahr an, in den Subtropen sank er um ca. 5 mm/Jahr ab, was auf eine Abschwä-

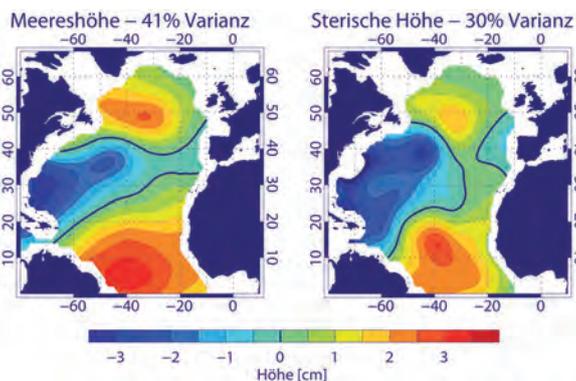


Abb. 2.3: Dominante Muster der Meeresspiegelhöhenänderung und der sterischen Komponente (oben) sowie deren zeitliche Entwicklung (EOF-Analyse) (rechts). Der Jahresgang wurde zuvor subtrahiert. (Grafik: Saskia Esselborn, GFZ)



chung der mittleren Zirkulation in den oberen 1000 m hinweist. Eine Analyse der Hauptkomponenten des Meeresspiegelsignals zeigt, dass es sich hierbei um das dominante Muster der Meereshöhen nach Abzug des jahreszeitlichen Signals handelt (vgl. Abb. 2.3). Neben einer Verstärkung dieses Musters über den Beobachtungszeitraum treten zusätzliche mehrjährige Schwankungen auf. Dieses Muster findet sich auch in den sterischen Höhen, d.h. es wird neben anderen Einflüssen durch Änderungen der Dichte verursacht.

### Einfluss auf die Ozeanzirkulation

Das beschleunigte Schmelzen von grönländischem Inlandeis und der zunehmende Eintrag von Süßwasser trägt einerseits durch den zusätzlichen Massenbeitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg bei (GMS), andererseits wird der lokale Meeresspiegel (LMS) zusätzlich durch Zirkulationsänderungen, durch die veränderte Schwereeinwirkungen auf den Ozean sowie die Auflaständerung in der Lithosphäre beeinflusst. Zwar kann der mittlere Meeresspiegelstand aus den Massenverlusten hinreichend genau abgeleitet werden, der Einfluss auf den lokalen Meeresspiegel ist jedoch Gegenstand intensiver Forschung.

In einer Modellstudie mit dem Finite Elemente Meereis-Ozean Modell (FESOM), das auf einem unstrukturierten Modellgitter mit lokaler Gitterverfeinerung basiert und das sich dadurch besonders für derartige Studien anbietet, wurde ein Frischwasser-Störungsexperiment durchgeführt, um die Veränderung im lokalen Meeresspiegel im Arktischen Ozean zu untersuchen (Abb. 2.4). Unter vorgeschriebenen atmosphärischen Antriebsbedingungen wurden Süßwasserabflüsse von 100.000 m<sup>3</sup>/s entlang der grönländischen Küste initiiert. Nach 120 Jahren ergibt sich allein durch den Schmelzwassereintrag ein räumlich differenziertes Bild mit Änderungen von bis zu 20 cm Meeresspiegelanstieg im Kanadischen Archipel und einigen Zentimetern entlang der Europäischen Küste und in der zentralen Arktis.

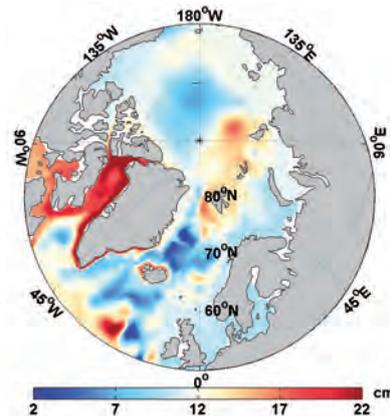


Abb. 2.4: Dynamische Meeresspiegeländerung (cm) durch den Schmelzwassereintrag von Grönland nach 120 Jahren Simulationszeit. (Grafik: AWI)

## 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?*

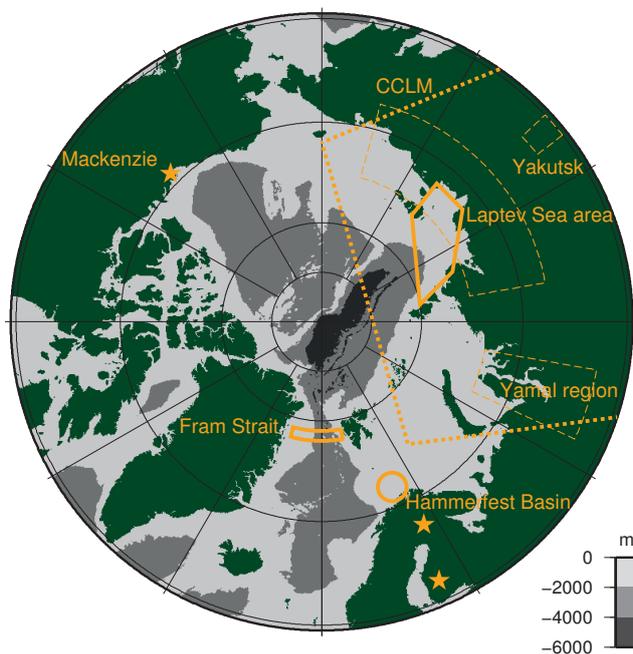


Abb. 3.1: Karte der Arktis mit allen Forschungsgebieten. Im Ozean: Studien zum Gasaustritt (gelber Kreis), ozeanographische Messungen (dicke Linien). Auf dem Land: Flugzeugkampagnen (Sterne), Permafrostuntersuchungen und Anwendungen der Fernerkundung (gestrichelte Linien), Simulationsgebiet des Atmosphärenmodells (gepunktete Linie). (Grafik: Florian Greil, AWI)

Ziel der Arbeiten in Thema 3 ist es, die Mechanismen und Effekte regionaler Klimaänderungen in Randgebieten des Arktischen Ozeans zu entschlüsseln. Hierfür werden *In-situ*-Beobachtungen, Flugzeug- und Satellitenmessungen und ein regionales Klimamodell verwendet, um die aktuellen und vergangenen Änderungen von Energie- und Stoffflüssen in Atmosphäre, Ozean, Meeresboden und an Land zu verstehen. (Abb. 3.1).

## Ozeanzirkulation in der Framstraße und in der Laptevsee

Durch die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen gelangt warmes und salzreiches Wasser atlantischen Ursprungs in den Arktischen Ozean. Im Einstrombereich zeigen unsere Langzeitmessungen eine Temperaturerhöhung von ca. 1°C über die letzte Dekade. Gleichzeitige Meereisbeobachtungen deuten darauf hin, dass die Ozeanerwärmung in der unmittelbaren Umgebung zu einer Verringerung der Eisbedeckung geführt hat.

Ein Teil des warmen atlantischen Wassers wird über den Randstrom entlang der Schelfkante ostwärts bis an den nördlichen

Rand der Laptevsee geführt, eines der breiten und flachen sibirischen Schelfmeere. Dort zeigen ozeanographische Daten aus ganzjährig verankerten Messgeräten und hydrographischen Messfahrten im Winter 2009/10, dass sich, ausgelöst durch ablandige Winde und die damit verknüpfte Drift des Meereises, warmes Bodenwasser weit südwärts auf den flachen Schelf ausgebreitet hat. Dieses warme Wasser stammt sehr wahrscheinlich aus der Fortsetzung des erwärmten Einstroms durch die Framstraße und ist durch Auftriebsprozesse auf den Schelf gelangt. Solche Warmwassereinschübe können weitreichende Auswirkungen auf die Meereisbedeckung, den submarinen Permafrost und die biologischen Prozesse haben.

## Methan in der Atmosphäre

Energie-, Wasser- und Kohlenstoffflüsse werden regelmäßig auf der russisch-deutschen Forschungsstation Samoylov im nord-ostsibirischen Lenadelta gemessen. Mit solchen kontinuierlichen Messungen wird die zeitliche Variabilität der Messgrößen gut erfasst, nicht aber die große räumliche Variabilität. Deshalb werden in naher Zukunft Messungen vom Flugzeug aus durchgeführt, um die lokalen Messungen zu ergänzen. Die flugzeuggestützten Wirbel-Kovarianzmessungen sowohl an Land als auch über dem Ozean werden regional integrierte Methan-Emissionsraten auf 100-km-Skalen liefern.

Die aktuelle und die nächste AIRMETH-Kampagne (Airborne measurements of methane, flugzeuggestützte Methan-Messungen) verwenden den Turbulenzsensor am Nasen-Ausleger und einen schnellen Methansensor an Bord des Flugzeugs Polar 5, um die Methanflüsse zu erfassen. Erste Testmessungen hierzu fanden im Juni 2011 in Deutschland und im subarktischen Finnland statt. Sie lieferten wichtige Erfahrungen für das Planen der ersten Expeditionen über Permafrostgebieten im Nordwesten Kanadas und im Norden Alaskas, die für Juli 2012 geplant sind.

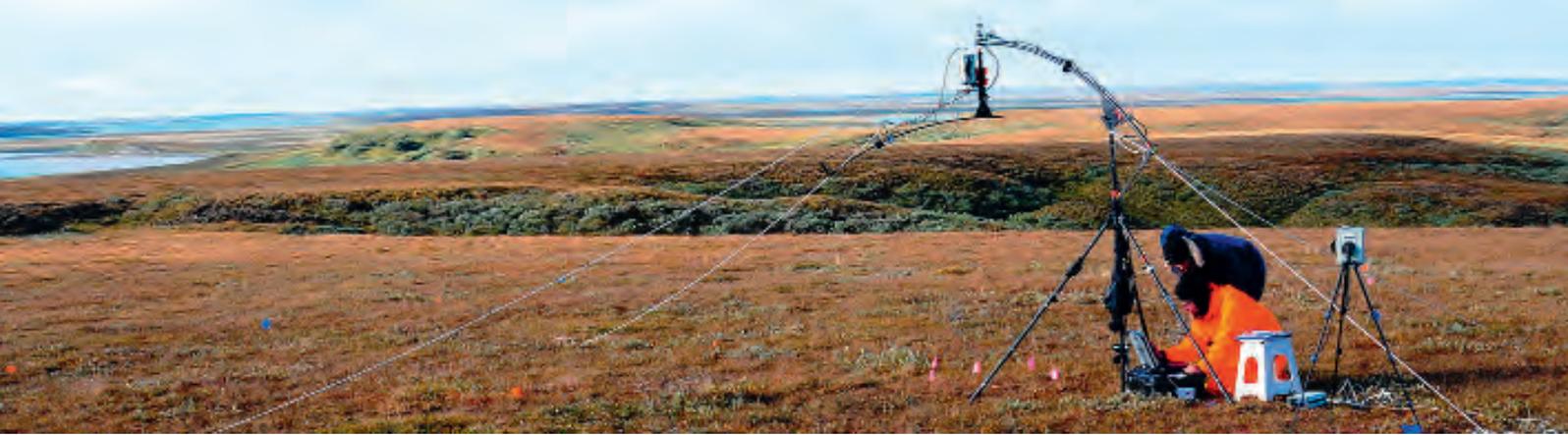


Abb. 3.2: Erhebung von Bodendaten für die Kalibration von Fernerkundungsparametern in Yamal (Sibirien) im August 2011. Das Foto zeigt Spektroniometermessungen für den sogenannten „Leaf Area Index“ (Blattflächenindex) der Tundra auf den Messflächen des internationalen Programms „Greening of the Arctic“. (Foto: Roman Ivanov, Yamal-Expedition 2011)

### Methan am Meeresboden

Um die temperaturgesteuerte Emission von Methan aus dem Arktischen Becken zu studieren, ist die geologische Entwicklung des Hammerfestbeckens in der südwestlichen Barentssee genauer untersucht worden. Unsere Beckenrekonstruktionen mit Hilfe einer 3D-Simulationssoftware für Erdöl- und Erdgaslagerstätten zeigen episodisches Ausgasen in den letzten 2,5 Millionen Jahren. Der Zugang zu hoch aufgelösten seismischen Daten eines Erdgas-Reservoirs erlaubt uns darüber hinaus die Gaswanderung durch Risse und Spalten detailliert zu untersuchen (Abb. 3.3). Austretendes Gas wird vermutlich während der Eiszeiten in Form von Gashydraten gespeichert und im Übergang zur folgenden Warmzeit freigesetzt. Bis zu 3 Gigatonnen Methan – eine Gigatonne ist das Gewicht eines Eisblocks mit 1 km Kantenlänge – haben innerhalb der letzten 1,1 Millionen Jahre den Meeresboden verlassen. Bio-geochemische Untersuchungen von Pockmarks (Kratern, die sich durch den Austritt von Gas aus dem Boden geformt haben) unterstützen diesen Befund. Biologische Marker legen nahe, dass auf Methan basierende Lebensgemeinschaften in der Vergangenheit vorkamen, aber heute nicht mehr vorhanden sind.

### Feldmessungen, operationelle Fernerkundung und regionale Klimamodellierung von Permafrost

Im Rahmen des Projektes Data User Element (DUE)-Permafrost wurde in Zusammenarbeit mit der Internationalen Permafrost Association (IPA) ein zirkum-arktischer Service für satellitengestützte Fernerkundung aufgebaut. Die Fernerkundungsprodukte „Oberflächen-Temperatur“, „Bodenfeuchte“, „Gefrorenen/ nicht gefrorenen Bodenzustand“ und „Landbedeckung“ werden mit Bodenmessungen aus internationalen Monitoring-Netzwerken evaluiert (Fig. 3.1) und zeigen ihre Eignung zur Beschreibung von Permafrostlandschaften der hohen Breiten. Die Fernerkundungsprodukte stehen den Anwendern jetzt frei zur Verfügung (<http://www.ipf.tuwien.ac.at/permafrost>) und werden zum Monitoring und für Parametrisierung und Evaluierung in der Permafrost- und Klimamodellierung eingesetzt.

Aufgrund der geringen meteorologischen Stationsdichte in der arktischen Region Sibiriens sind in-situ-Beobachtungsdaten nur begrenzt verfügbar. Mit Hilfe des regionalen Klimamodells COSMO-CLM wurde daher für den Zeitraum 1948-2010 eine Klimarekonstruktion für Sibirien durchgeführt, um einen meteorologischen Datensatz in guter räumlicher und zeitlicher Auflösung bereitzustellen. Das Modell wurde zuvor speziell für diese Region konfiguriert.

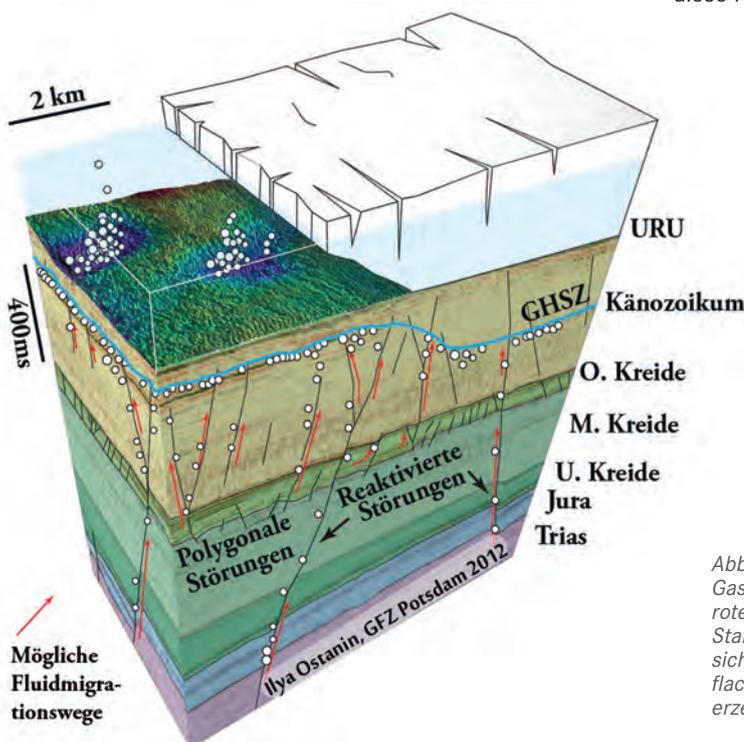


Abb. 3.3: Skizze des Leckage-Systems über einem Gasfeld. Pfade von möglichen Gasflüssen sind durch rote Pfeile angedeutet. Der Boden der Gashydrat-Stabilitätszone (GHSZ) ist blau hervorgehoben. Wenn sich die Gletscher zurückziehen, wird die GHSZ flacher, Gas tritt aus dem Meeresboden aus und erzeugt Pockmarks. (Grafik: Ilya Ostranin, 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?*

Mit Vegetation, Böden und Grundwasser bildet die Landoberfläche im Klimasystem die untere Randbedingung, durch die die Atmosphäre und das Klima wesentlich gestaltet werden und die umgekehrt auch von klimatischen Einflüssen abhängig ist. An der Landoberfläche konzentrieren sich Umsetzungs- und Transportprozesse der Kreisläufe von Energie (Strahlung, Wärme) und Wasser, von Treibhausgasen und anderen klimatisch wirksamen Spurenstoffen. Zusammen mit Topographie ist deshalb die Landoberfläche mit ihrer starken räumlichen Variabilität die hauptsächliche Ursache für regionale Prägungen des Klimas, das zudem anthropogenen Landnutzungsänderungen (Land-, Forstwirtschaft, Städtebau, Brandrodung) ausgesetzt ist. REKLIM hat zum Ziel, die Interaktionen von Böden, Biosphäre und Atmosphäre besser zu verstehen und mit mechanistischen Modellen quantitativ zu beschreiben. Langfristig angelegte und integrierte Mess- und Modellieraktivitäten im TERENO (TERrestrial ENvironmental Observatories) Netzwerk spielen dabei eine wesentliche Rolle.

## Validierung hydrometeorologischer Simulationen mit TERENO Beobachtungen

Zum Verständnis der Wechselwirkungen von Wasser- und Energiehaushalt kommen hydrometeorologische Modellsysteme zum Einsatz. Sie ermöglichen z. B. die Analyse der Austauschprozesse zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre. Für die Validierung dieser Modelle ist es daher wichtig, dass eine große Bandbreite an Beobachtungsgrößen zur Verfügung steht, die über die TERENO Initiative ermöglicht wird. In einem ersten Schritt wurden vom KIT/IMK-IFU täglich regionale 72-Stunden Wettervorhersagen mit dem regionalen hydrometeorologischen

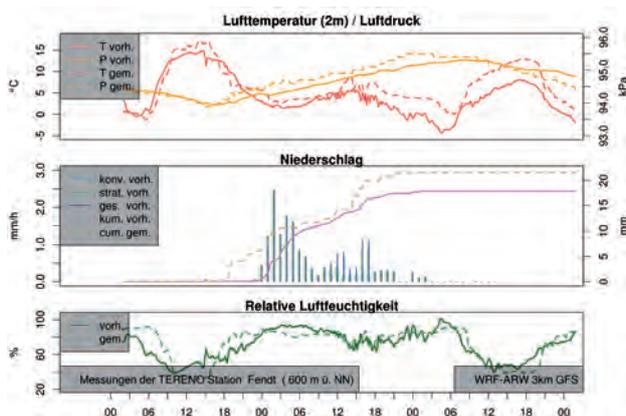


Abb. 4.1: Vergleich einer ausgewählten 72-h WRF Vorhersage ab dem 15.05.2012 (durchgängige Linien) mit Messungen (gestrichelt) der TERENO Voralpenstation Fendt. (Grafik: Benjamin Fersch)

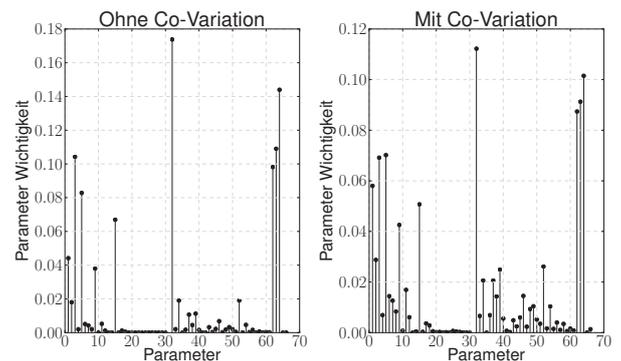


Abb. 4.2: Die linke Seite zeigt einen klassischen Parameter-Wichtigkeitsindex, der keine Korrelationen zwischen Parametern berücksichtigt. Die rechte Seite zeigt den neu entwickelten Index, welcher Parameterinteraktionen berücksichtigt. Man erkennt, dass beispielsweise die Gruppe der Parameter 6-9, welche die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens beschreiben, und die Gruppe 35-50, in der viele biochemische Parameter der Photosynthese vorkommen, stärker hervortreten, wenn Korrelationen berücksichtigt werden. (Grafik: Matthias Cuntz)

Modell WRF und Beobachtungen des Voralpenobservatoriums TERENO Pre-Alpine verglichen (Abb. 4.1). Hierbei wurden verschiedene räumliche Auflösungen des Modells (60, 20, 3km) an drei verschiedenen TERENO Standorten (Fendt, Rottenbuch und Graswang) über ein halbes Jahr ausgewertet. Während die Güte der Vorhersage für alle Standorte erwartungsgemäß mit der Vorhersagezeit abnimmt, ist ein positiver Effekt der Auflösung zunächst nur für die Standorte Rottenbuch und Fendt zu erkennen. Für das in einem engen Gebirgstal liegende Graswang zeigt das Modell unstrukturierte Abweichungen für alle untersuchten Auflösungen. Insgesamt kann das Modell die Dynamik der atmosphärischen Prozesse gut darstellen. Im nächsten Schritt erfolgt die Validierung für die Umsätze von Wasser und Energie in der Bodenzone.

## Sensitivität eines Landoberflächenmodells auf seine Eingangsparameter

Die Untersuchung der Sensitivität berechneter Flussgrößen, wie beispielsweise der fühlbare Wärmestrom oder die Photosynthese, von Parametern in Landoberflächenmodellen ist ein wichtiger Schritt während der Modellentwicklung und -evaluierung. Unter Parametern versteht man hier Größen in den Modellgleichungen, die durch empirische Daten bestimmt wurden und daher keine Konstanten sind, sondern Unsicherheiten beinhalten. Eine der Schwierigkeiten in Sensitivitätsanalysen sind bestehende Korrelationen zwischen den Parametern. Das UFZ führte deshalb eine komplexe Sensitivitätsanalyse mit einem weit verbreiteten Landoberflächenmodell durch, welche



Abb. 4.3: Im TERENO Observatorium „Norddeutsches Tiefland“ (Koordination: GFZ) wird die Beprobung von schwer zugänglichen Feuchtgebieten und Baumkronen durch Krananlagen ermöglicht. (Fotos: Markus Reich, GFZ)

die Korrelationen zwischen unterschiedlichen Parametern berücksichtigt. Hierfür wurden die Sensitivität der fühlbaren und latenten Wärme sowie der Photosynthese in Bezug auf die fast 70 identifizierten Parameter des Landoberflächenmodells bestimmt, indem die Ableitungen der Flussgrößen nach diesen Parametern mit einer Eigenwertzerlegung untersucht wurden. Aus der Hauptkomponentenanalyse kann so ein Index entwickelt werden, der die Wichtigkeit eines jeden Parameters für die Modellvariabilität angibt. Des Weiteren kann ein Schwellwert nach einem benutzerdefinierten Konfidenzintervall berechnet werden, der es zusammen mit dem neuen Index ermöglicht, die wichtigsten Parameter bei einer gewünschten Modellgenauigkeit auszusuchen (Abb. 4.2). Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wurden den anderen Gruppen in REKLIM, z. B. als Leitlinie bei der Anpassung der gekoppelten, regionalen Klimamodelle zur Verfügung gestellt.

#### Assimilation von Eddy-Kovarianz- und Bodenfeuchtemessungen in Landoberflächenmodellen

Um die Vorhersagen des Landoberflächenmodelles HYDRUS-1D zu verbessern, wurde am Institut Agrosphäre des FZJ analysiert, wie die Assimilierung von Eddy-Kovarianz- und/oder Bodenfeuchtemessungen das Modellergebnis beeinflusst. Die Datenassimilierung wurde mithilfe eines sogenannten Partikelfilters in Kombination mit Methoden des „Sequential Importance Sampling“ (SIS) oder des „Sequential Importance Resampling“ (SIR) implementiert, wobei 6.000 Partikel verwendet wurden. Die Datenassimilierung wurde mithilfe eines synthetischen Experiments getestet, in dem lehmiger Sand der Referenzbodentyp war und ein Wachstumszyklus einer landwirtschaftlichen Pflanze simuliert wurde. Als untere Randbedingung war der Grundwasserpegel auf 4m Tiefe fixiert. Die atmosphärischen Eingabedaten stammen vom Flughafen Maastricht, Niederlande (2007). Bodenhydraulische Parameter (Mualem-van Genuchten Parameter  $\alpha$ ,  $n$  und  $K_s$ ) wurden im ersten Zeitschritt mit „Latin Hypercube Sampling“ (LHS) zufällig gezogen und im Falle des Resampling mit 10% für  $\alpha$  und 2.5% für  $n$  und  $K_s$  gestört.

Das Modellverhalten wurde durch (1) die Charakterisierung der Bodenfeuchtigkeit in verschiedenen Tiefen, (2) die aktuelle Evapotranspiration der Pflanzen und (3) die Charakterisierung bodenhydraulischer Parameter evaluiert. Die Resultate zeigen, dass Vorhersagen der Bodenfeuchte und die Charakterisierung der bodenhydraulischen Parameter durch die Assimilierung von gemessener Bodenfeuchte stark verbessert werden können (Abb. 4.4). Die Assimilierung von Eddy-Kovarianz-Daten hingegen verbessert die Vorhersage der Verdunstung und der dazugehörigen Parameter kaum. Die besten Resultate wurden erzielt, wenn Bodenfeuchte- und Eddy-Kovarianz-Daten zusammen assimiliert wurden, was zu verbesserten Vorhersagen der Bodenfeuchte, der Verdunstung sowie der bodenhydraulischen Parameter führt.

#### Etablierung des neuen Forschungsgebiets TERENO-Nordost

Das Helmholtz-Zentrum Potsdam (GFZ) hat Anfang 2011 mit der Instrumentierung des TERrestrialENvironmentalObservatories (TERENO) Nordost-Deutsches Tiefland (NO) begonnen. Ein substantieller Teil der Instrumentierung wurden bereits in den Testgebieten Müritz Nationalpark (Großer Fürstenseer-See) und DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network) in Betrieb genommen.

Die wesentlichsten realisierten Instrumentierungen des letzten Jahres waren: i) die Aufstellung eines Krans im Wald in der Nähe von Demmin (siehe Abb 4.3), der als universelle Forschungs-Plattform z.B. für neuartige Fernerkundungstechniken und dendrologische Untersuchungen dient; ii) die Installation von 15 Klimastationen auf dem DLR-Neustrelitz Testfeld DEMMIN für Kalibrierungs- und Validierungszwecke von Satelliten-Datenprodukten (z.B. Evapotranspiration, Bodenfeuchte); iii) die hydrologische Instrumentierung am Großen Fürstenseer-See (Müritz Nationalpark) zur Untersuchung der Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser, sowie der Wasserverfügbarkeit von Bäumen; iv) die Feldinstrumentierung für dendrologische Untersuchungen am Großen Fürstenseer-See zur Untersuchung des Transfers des Klimasignals in repräsentative Baumarten.

TERENO-NO wird stark unterstützt durch zwei weitere Helmholtz-Projekte: i) das Helmholtz Virtuelle Institute ICLEA (Virtual Institute of Integrated Climate and Landscape Evolution Analyses) und der Helmholtz Nachwuchsgruppe TEAM (Trace Gas Exchange in the Earth - Atmosphere System on Multiple Scales) mit insgesamt 16 Wissenschaftlern und 5 Technikern.

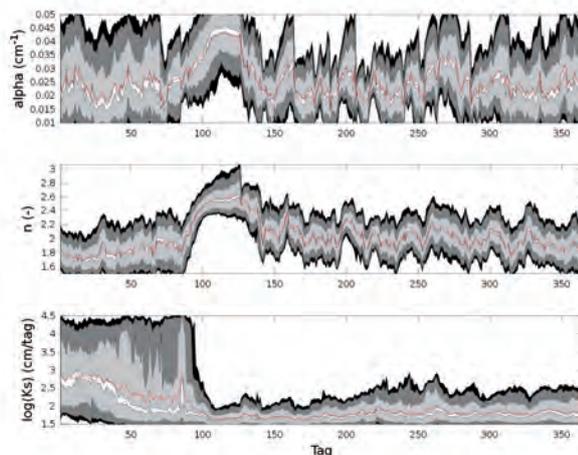


Abb. 4.4: Evolution der geschätzten bodenhydraulischen Parameter ( $\alpha$ ,  $n$ , und  $K_s$ ) für das Jahr 2007 für den Fall, daß Bodenfeuchte- und Eddy-Kovarianzmessungen assimiliert werden. Die rote Linie ist die mittlere Vorhersage mit Hilfe des Partikelfilters und der rote Stern ist der Referenzwert. Die schattierten Gebiete sind von weiss zu schwarz das 10%, 68%, 90%, und 95% Signifikanzlevel. (Grafik: Wittaya Kessomkiat, FZJ)

## 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 möglichen Einfluss verschiedener physikalischer und chemischer Vorgänge in der Atmosphäre auf das Klimasystem und leisten einen Beitrag zur Entwicklung gekoppelter Chemie-Klimamodelle, die dann auch zur Untersuchung regionaler Klimaänderungen eingesetzt werden können. Einer der Themenschwerpunkte ist die genauere Untersuchung der chemischen und thermischen Struktur der Tropopausenregion (Grenzhöhe zwischen dem unteren Atmosphärenbereich, der Troposphäre, und der darüber liegenden Stratosphäre). Davon soll in dieser Ausgabe berichtet werden.

## Quantifizierung der Eisknucleationsfähigkeit von Aerosolpartikeln

Ein sehr kleiner Anteil der in der Atmosphäre vorhanden Aerosolpartikel hat die besondere Fähigkeit, Wolkentropfen zum Gefrieren zu bringen und dadurch Niederschlagsbildung auszulösen. Auch die Anzahl von Eiskristallen in Zirruswolken in der oberen Troposphäre wird durch Aerosolpartikel beeinflusst. Die physikalischen und chemischen Voraussetzungen für dieses Phänomen werden in zahlreichen Laborexperimenten getestet. Im REKLIM Thema 5 arbeiten Wissenschaftler des KIT daran, diese Messungen zusammenzufassen und daraus Parametrisierungen für Wetter- und Klimamodelle abzuleiten. Ein entscheidender Faktor ist die Oberflächengröße der Par-

tikel. Messungen mit verschiedenen Methoden konvergieren, wenn die Eiskeimanzahl mit der Partikeloberfläche normiert wird (Abb. 5.1). Dies trifft insbesondere auf Mineralstäube zu, die oft bis in die obere Troposphäre transportiert werden.

## Die Tropopause als Klimaindikator

Die Tropopause ist eine Schlüsselregion für das Verständnis vielfältiger atmosphärischer Prozesse. Sie ist durch den Übergang des Temperaturprofils von nach oben hin abnehmenden Temperaturen zu nach oben hin zunehmenden Temperaturen gekennzeichnet. Die Tropopausenhöhe variiert mit der geografischen Breite, wobei die größten Höhen in den Tropen auftreten (17-18 km) und dann ein nahezu kontinuierlicher Abfall zu den Polen hin zu beobachten ist (7-8 km).

Änderungen der Tropopausenhöhe sind ein Anzeichen für den Klimawandel. Zwei grundlegende Mechanismen, die zu einem Anstieg der Tropopausenhöhe führen, sind eine Erwärmung der Troposphäre und eine Abkühlung der unteren Stratosphäre. Beide Prozesse wurden in den vergangenen Jahren durch die Analyse verschiedener Datensätze (Satelliten, Wetteranalysen, Radiosonden) nachgewiesen und mit numerischen Simulationen gekoppelter Chemie-Klimamodelle reproduziert.

Zur globalen Beobachtung der Tropopausenhöhe eignen sich vor allem Satellitenmessungen mit der GPS Radiookkultationsmethode, die über eine geeignete vertikale Auflösung (<1 km) für die Temperaturmessungen verfügen und den Höhenbereich der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre abdecken. Seit 2001 werden die Daten von drei GPS Instrumenten (CHAMP, GRACE, TerraSAR-X) kontinuierlich am GFZ Potsdam gewonnen und analysiert.

Abb. 5.2 zeigt Temperaturtrends im Höhenbereich von 5 bis 25 km zwischen 85°N und 85°S. Man erkennt deutlich den positiven Temperaturtrend in der Troposphäre, d.h. unterhalb der Tropopause, deren mittlere Höhe als weiße Linie dargestellt ist. Oberhalb der Tropopause, also in der unteren Stratosphäre

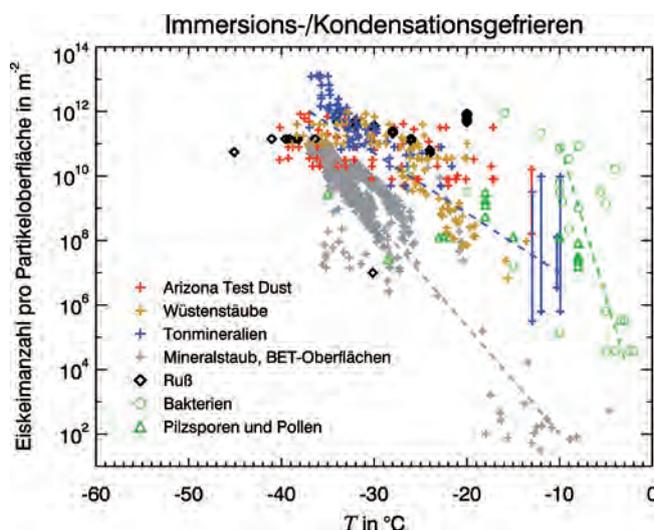


Abb. 5.1: Eiskeimanzahl pro Partikeloberfläche als Funktion der Temperatur für das Gefrieren von unterkühlten Tropfen mit darin enthaltenen Aerosolpartikeln. Ohne Aerosolpartikel gefrieren Wolkentropfen bei ca.  $-38^{\circ}\text{C}$ . Die Daten basieren auf einer großen Anzahl von Labormessungen. (Grafik: Hoose und Möhler, 2012)

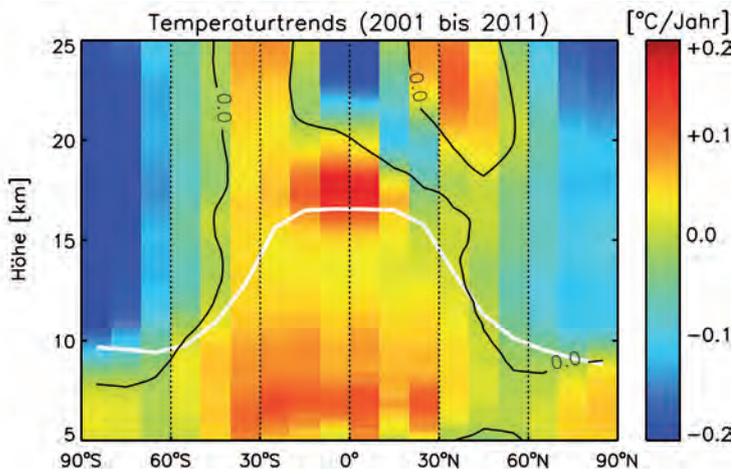


Abb. 5.2: Mittlerer jährlicher Temperaturtrend in °C für den Höhenbereich 5-25 km. Die durchgezogene weiße Linie markiert die mittlere Tropopausenhöhe. Die Ergebnisse basieren auf Messungen von CHAMP (Mai 2001 bis September 2008), GRACE (April 2006 bis Dezember 2011) und TerraSAR-X (März 2009 bis Dezember 2011). (Grafik: nach Schmidt et al., 2010)

wird in großen Teilen eine Abkühlung beobachtet. Ausnahmen finden sich lediglich in den Tropen knapp oberhalb der Tropopause und im Bereich der Subtropen auf beiden Hemisphären.

### Mischungsprozesse in der unteren Stratosphäre

Natürliche und anthropogene Treibhausgase sind im Bereich der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre besonders klimawirksam. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Einfluss von Transport- und Mischungsprozessen quantitativ zu verstehen. Mit Hilfe des Chemie-Transportmodells CLaMS (Chemical Lagrangian Model of the Stratosphere) haben Jülicher Wissenschaftler untersucht, wie sich Unsicherheiten bezüglich der atmosphärischen Mischungsstärke auf die Simulation von Treibhausgasen und die zugehörigen Strahlungseffekte auswirken.

Der Mischungsprozess wird im Modell im Wesentlichen anhand der horizontalen und vertikalen Deformation des Windfeldes parametrisiert. Vor allem Wasserdampf- und Ozonkonzentrationen weisen starke Gradienten in der unteren Stratosphäre auf und reagieren daher besonders empfindlich auf Unsicherheiten der Mischungsstärke. Die Modellrechnungen zeigen, dass entsprechende Unsicherheiten bei der Berechnung des Strahlungsantriebes bis zu  $0,72 \text{ W/m}^2$  für Wasserdampf und  $0,17 \text{ W/m}^2$  für Ozon betragen können. Diese Werte sind vergleichbar mit den gegenwärtigen Abschätzungen des gesamten Treibhauseffektes durch langlebige Treibhausgase seit 1980 und belegen die Wichtigkeit einer möglichst exakten Wiedergabe atmosphärischer Spurenstofftransporte und der zugrundeliegenden Prozesse im Bereich der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre bei Klimasimulationen.

### Nutzung von Satellitendaten für die Validierung von Chemie-Klimamodellen

In einer Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Jülich und dem KIT wird untersucht, wie sich Satellitendaten mit Modellsimulationen der chemischen Zusammensetzung in der oberen Troposphäre vergleichen lassen. Die Algorithmen zur Bestimmung der Konzentrationsprofile verschiedener Spurengase aus den Infrarotspektren des MIPAS Instruments (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) wurden am KIT entwickelt. Die Profile werden mit den Ergebnissen diverser globaler Chemie-Klimamodelle verglichen, die im Jülicher Archiv des TFHTAP (Task Force Hemispheric Transport of Air Pollution) gespeichert sind. Die Wissenschaftler interessieren hierbei insbesondere, welche Rückschlüsse die Daten auf die Quellen und Senken von reaktiven Stickoxiden in der oberen Troposphäre erlauben und wie die Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre von den Stickoxidkonzentrationen beeinflusst wird. Abb. 5.3 zeigt einen Vergleich der monatlich gemittelten MIPAS Konzentrationen von Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) über dem Osten Chinas mit den berechneten Konzentrationen aus 16 verschiedenen Modellen. Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich voneinander. Die MIPAS Daten weisen an der Tropopause generell einen stärkeren vertikalen Gradienten als die Modelldaten auf. Dies deutet auf Unzulänglichkeiten bei der Parametrisierung des Transportes in der unteren Stratosphäre hin. Weitere Arbeiten zur Nutzung von Satellitendaten finden in der DFG-Forscherguppe SHARP („Stratospheric Change and its Role for Climate Prediction“) unter Beteiligung von HGF-Instituten statt.

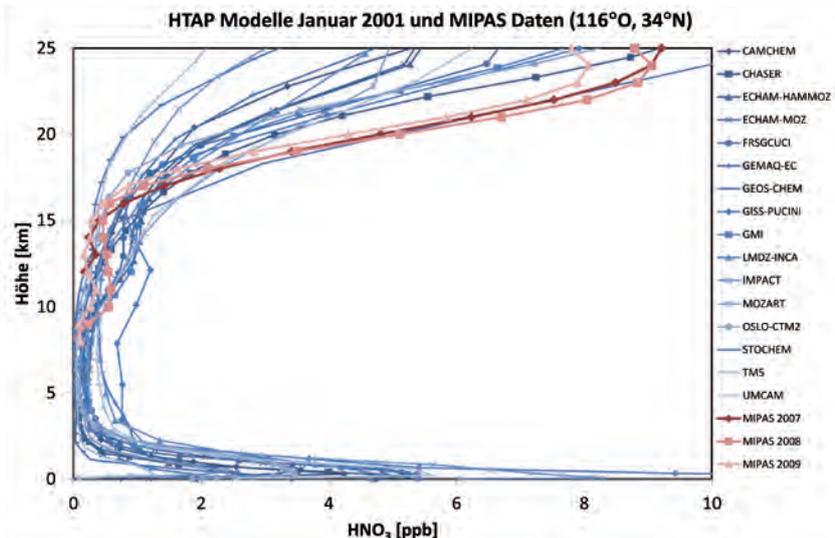


Abb. 5.3: Vertikalprofile des  $\text{HNO}_3$  Mischungsverhältnisses über China aus MIPAS-Satellitenmessungen im Januar 2007, 2008 und 2009 im Vergleich zu berechneten Mischungsverhältnissen aus 16 Modellen des internationalen TFHTAP Modellvergleichs. (Grafik: K. Sahu, FZJ)

# 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 haben Schäden durch meteorologische Extremereignisse weltweit erheblich zugenommen. Dabei stellt sich die Frage, inwieweit diese Zunahme auch durch den Klimawandel bedingt ist und mit welchen Extremereignissen in der Zukunft zu rechnen ist. Zu diesen Fragestellungen werden im Rahmen von Thema 6 verschiedene Untersuchungen zu Polartiefs, Starkniederschlägen und damit verbundenen Überschwemmungen sowie Hagelstürmen durchgeführt. Die Kombination von Ergebnissen hoch aufgelöster regionaler Klimamodelle mit verschiedenen Beobachtungsdatensätzen erlaubt es, die Häufigkeit und Intensität meteorologischer Extremereignisse besser als bisher zu quantifizieren und statistisch zu analysieren.

## Eine Polartiefklimatologie für den Nordpazifik

Mit Hilfe eines regionalen Klimamodells (CCLM) wurde erstmals am HZG eine Klimatologie für Polartiefs im Nordpazifik der letzten rund 60 Jahre berechnet. Polartiefs sind kleinräumige, intensive Wirbelstürme, die eine Gefährdung für Küstengebiete, Seefahrt und Infrastrukturen darstellen können. Eine ähnliche Studie wurde im Rahmen von REKLIM bereits für den Nordatlantik durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das Regionalmodell in der Lage ist, Polartiefs zu simulieren, auch wenn sie nicht in den antreibenden Reanalysedaten vorhanden sind. Das Modell wurde nun anhand von einzelnen Fallstudien auf seine Eignung für die Simulation von Polartiefs im Nordpazifik überprüft. Anschließend wurde eine Polartiefklimatologie von 1948 bis 2010 berechnet (Abb. 6.1 links). Die Anzahl der Polartiefs zeigt eine große Variabilität von Jahr zu Jahr. Allerdings kann kein langfristiger Trend für die letzten Jahrzehnte abgeleitet werden, was sich mit den Ergebnissen für den Nordatlantik deckt. Die räumliche Verteilung der Polar-

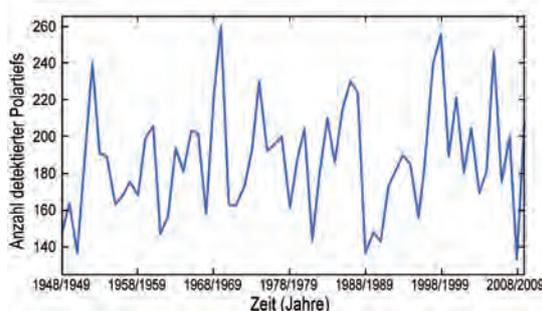


Abb. 6.1 links: Klimatologie von Polartiefs für den subpolaren Nordpazifik von 1948-2010, abgeleitet aus einer multi-dekadischen COSMO-CLM Simulation. Die Klimatologie zeigt eine große interannuale Variabilität der Polartiefanzahl, aber nur eine geringe dekadische Variabilität und keine langfristigen Änderungen im Nordpazifik. Rechts: Räumliche Verteilung der Polartiefs im Nordpazifik, dargestellt ist die Anzahl detektierter Polartiefs pro  $0.4^\circ$  Modellzelle. (Grafik: Frauke Feser, HZG)

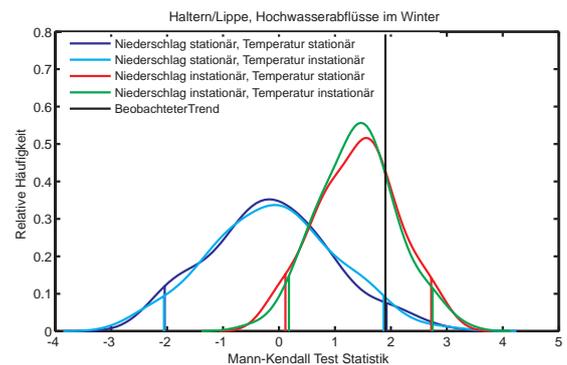
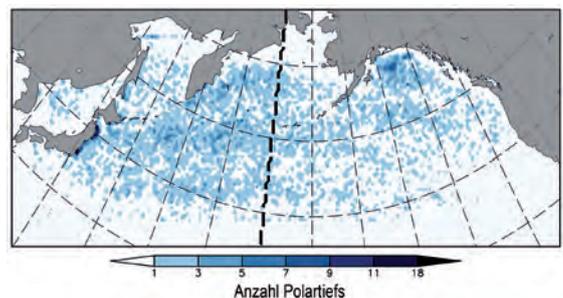


Abb. 6.2: Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Hochwassertrends am Pegel Haltern/Lippe. (Grafik: Sergiy Vorogushyn, GFZ)

tiefs im Nordpazifik ist recht gleichmäßig (Abb. 6.1 rechts), es zeigen sich nur einzelne Häufungen wie z.B. an der Küste von Japan. Analog zur Studie für den Nordatlantik ist geplant, eine Abschätzung der Entwicklung der Polartiefhäufigkeit bis Ende des Jahrhunderts für verschiedene mögliche Zukunftsszenarien mit dem CCLM zu berechnen.

## Hochwasseränderungen besser verstehen

Die Entstehung von Hochwasserereignissen wird von einer Reihe natürlicher und anthropogener Faktoren bestimmt. Am GFZ Potsdam wird ein Konzept zur Zuordnung von Hochwasseränderungen entwickelt, das als Grundlage für die Bestimmung von Ursachen der Änderungen dienen soll. Mit Hilfe von Trendtests und nicht-stationärer Extremwertstatistik können so die Änderungen im Hochwasserverhalten detektiert werden. Gleichzeitig wird mit Simulationsmodellen überprüft, ob die vermuteten Ursachen (z.B. Klima, Landnutzungsänderungen, Flussbau) die Hochwasseränderungen erklären können.



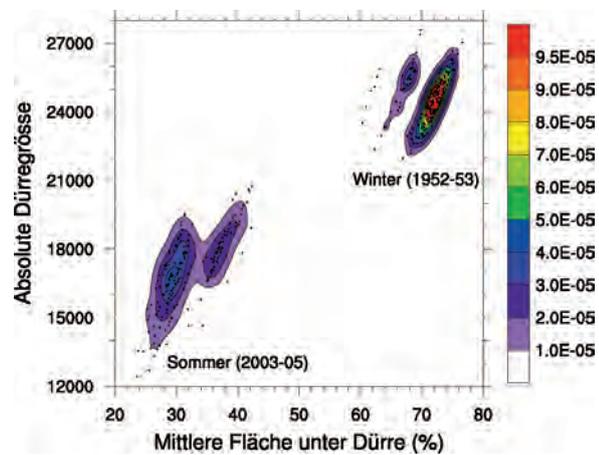
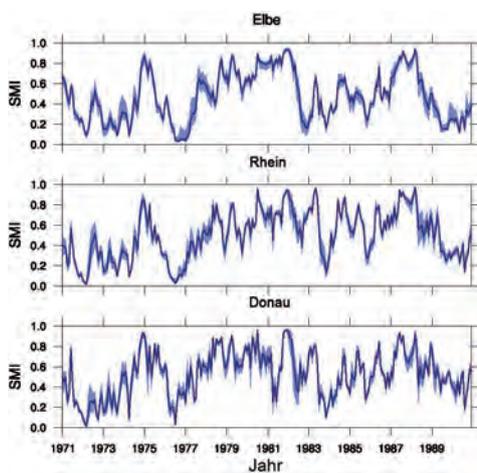


Abb. 6.3 links: Unsicherheiten des Bodenfeuchteindex SMI (Indikator des verfügbaren Wassers in der Wurzelzone) für bedeutende Flusseinzugsgebiete in Deutschland. Die dunkelblaue Linie stellt den Mittelwert des Ensembles dar, der Unsicherheitsbereich des SMI ist in hellblau dargestellt. Rechts: Dürrestärke als Integral des SMI über die Dauer eines Trockenereignisses; je höher der Wert, umso länger und stärker ist ein Dürreereignis (Einheit: Monate  $\times$  prozentualer Flächenanteil bezogen auf Deutschland). Jeder Punkt steht für eine Ensemblesimulation. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Dürregröße und Fläche unter Dürre ( $SMI < 0.2$ ) für diese Simulationen ist für zwei der zehn größten Ereignisse in Deutschland seit 1951 farbige dargestellt. (Grafik: Luis Samaniego, UFZ)

Es wurde untersucht, inwieweit die beobachteten Hochwassertrends im Zeitraum von 1951 bis 2003 in ausgewählten Einzugsgebieten in Deutschland durch Änderungen von Niederschlag und Temperatur hervorgerufen wurden. Dabei wurde ein hydrologisches Modell mit vielen synthetischen Klimazeitreihen angetrieben. Diese wurden mit einem multivariaten Wettergenerator unter Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität von Niederschlag und Temperatur erzeugt (Abb. 6.2). Es zeigte sich hierdurch beispielsweise im Fall des Pegels Haltern/Lippe, dass sich der beobachtete Hochwassertrend fast vollständig durch die Veränderungen des Niederschlags erklären lässt. Für andere untersuchte Pegel können die klimatischen Veränderungen dagegen den Trend nur teilweise erklären. Dies deutet darauf hin, dass es im Einzugsgebiet weitere hochwasserverschärfende Einflüsse gegeben hat, wie z.B. Änderungen der Landnutzung oder Flussausbau. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Einflussfaktoren einzuzengen.

### Vorhersage extremer Dürren verursacht durch Bodenfeuchtedefizite

Die Hauptursachen für die unbefriedigende Leistungsfähigkeit von Vorhersagemodellen sind Unsicherheiten in den meteorologischen Antriebsgrößen, die Konzeptualisierung dominanter Prozesse und deren Parametrisierung auf der gewünschten räumlichen und zeitlichen Skala. Um Parameterunsicherheiten bei der Vorhersage von Bodenfeuchte und Dürreereignissen abzubilden, wurden am Umweltforschungszentrum Leipzig mit dem mesoskaligen hydrologischen Modell (mHM) Bodenfeuchtefelder für den Zeitraum 1950-2010 aus 100 verschiedenen Parametersätzen erzeugt (Ensemble). Jedes der 100 Ensemble Mitglieder wurde mit den gleichen täglichen meteorologischen Bedingungen (Niederschlag und Temperatur) mit einer räumlichen Auflösung von  $4 \times 4 \text{ km}^2$  angetrieben. Weiterhin wurde das Modell am 01.01.1951 mit klimatologischen Mittelwerten eines 15-Tage Fensters um den ersten Januar initialisiert. Die Simulationen zeigen eine hohe Variabilität des Bodenfeuchteindex, erkennbar an der großen Schwankungsbreite des SMI (Abb. 6.3, links). Des Weiteren ist der Einfluss der Parameterunsicherheit auf Dürrestatistiken nicht zu vernachlässigen, welches durch die weite Streuung ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit (Abb. 6.3, rechts) gezeigt wird. Dies belegt, dass einzelne Modellsimulationen nicht geeignet sind, um daraus schlüssige Ergebnisse bezüglich extremer Dürren abzuleiten.

### Sommerliche Gewitterstürme und Hagel

Auf der Grundlage von dreidimensionalen Radardaten in Kombination mit Blitzdaten und Versicherungsdaten konnte für Deutschland erstmalig eine „Klimatologie“ schwerer Hagelereignisse erstellt werden. Danach nimmt aufgrund der mittleren Schichtungsstabilität der Atmosphäre die Hagelwahrscheinlichkeit von Norden nach Süden stark zu. In vielen Regionen liegt außerdem das Maximum im Lee der Mittelgebirge. COSMO Modellstudien zufolge ist diese Verteilung auf die Ausbildung von Konvergenzzonen bei einem teilweisen Umströmen der Gebirge zurückzuführen.

Um langzeitliche Änderungen der Konvektionsbedingungen in der Vergangenheit zu analysieren, wurden Radiosondendaten und verschiedene, mit dem regionalen Klimamodell CCLM herunterskalierte Reanalysen von Wetterdaten statistisch ausgewertet. Insgesamt zeigen alle betrachteten Datensätze in der Vergangenheit eine Zunahme des Konvektionspotentials über Europa (Abb. 6.4). Mittels eines Bayesschen Modells (statistisches Analyseverfahren) konnte gezeigt werden, dass die Häufigkeit hagel-relevanter Großwetterlagen in der Zukunft nur leicht zunehmen wird. Derzeit wird mit Hilfe von multivariaten Regressionsanalysen (logistische Regression) die bestmögliche Kombination verschiedener Proxydaten ermittelt, die für Hagel relevant sind. Dieses Verfahren wird im nächsten Schritt auf ein Ensemble regionaler Klimamodelle angewendet, um daraus Änderungen der Hagelwahrscheinlichkeit in der Zukunft zu bestimmen.

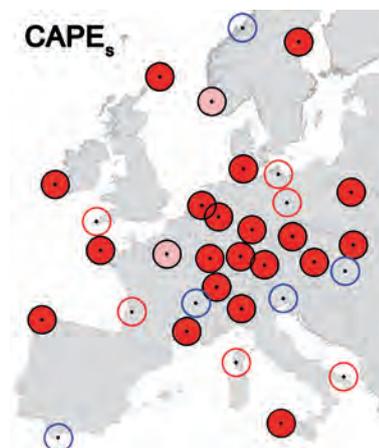


Abb. 6.4: Lineare Trends der 90. Perzentile der jährlichen Verteilungsfunktion (1978-2009) für die konvektive verfügbare potentielle Energie CAPE über West-Europa (Rot: Zunahme, blau: Abnahme; dunkle Farben: > 90% Signifikanz, helle Farben > 80%, ohne Füllung: keine Signifikanz). (Grafik: Susanna Mohr, KIT)

# 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?*

Die Verhandlungen zur Fortschreibung des Kyoto-Protokolls in Durban Ende 2011 haben gezeigt, dass kurz- bis mittelfristig mit keinem verbindlichen und ambitionierten globalen Abkommen zur Treibhausgasreduktion zu rechnen ist. Vor diesem Hintergrund gewinnt die klimapolitische Strategie der Anpassung zunehmend an Bedeutung und wurde folgerichtig in der klimapolitischen „Post-Kyoto-Architektur“ als essentielle Ergänzung zur Vermeidungsstrategie verankert. (Abb. 7.2). Dies erfordert in der Konsequenz gezielte wissenschaftliche Analysen, um die Wirksamkeit und Konsistenz von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen. Zudem brauchen wir verbesserte Datengrundlagen sowie innovative Methoden und Instrumente für die Umsetzung dieser neuen integrierten Klimapolitik in nationalen, regionalen und lokalen Kontexten. Thema 7 enthält sozioökonomische Forschungsarbeiten von UFZ und HZG zur Adaptations- und integrierten Klimapolitik. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der wissenschaftlichen Begleitung und Analyse der neueren Entwicklungen und Verhandlungsprozesse im Post-Kyoto-Regime. Des Weiteren wurde untersucht, welche Herausforderungen bzgl. der Interaktion zwischen Klimaforschung und -politik gegeben sind. Schließlich wurden Methoden zur Unterstützung regionaler Anpassungsentscheidungen entwickelt und angewendet.

## Neue Entwicklungen in der Post-Kyoto-Architektur

Mit den UN-Klimakonferenzen in Cancun (COP16) und Durban (COP 17) in den Jahren 2010 bzw. 2011 ist das Ende der politischen Architektur von Kyoto besiegelt. Die neue „Post-Kyoto-Architektur“ unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht vom bisherigen Kyoto-Regime. Die weltweite Adaptation ist zentraler Bestandteil der internationalen Klimapolitik, da die bereits eingetretenen klimatischen Veränderungen selbst im Falle erfolgreicher zukünftiger Klimaschutzabkommen kurz- bis mittelfristig nicht mehr umkehrbar sind. Ferner wird diese integrierte Vermeidungs- und Anpassungs-Strategie durch die Etablierung eines umfassenden, weltweiten, einheitlichen Systems zur Überwachung, Berichterstattung und Verifikation von Treibhausgasemissionen unterstützt – auch in den neuen Industrieländern wie China und Indien. Ein weiteres zentrales Element der Post-Kyoto-Architektur ist ein neu entstehendes internationales System der „Climate Finance“. Dieses sieht Transferzahlungen von den Industrie- an die Entwicklungsländer vor, um deren Anpassungs- und Vermeidungsanstrengungen, die für den globalen klimapolitischen Erfolg unerlässlich sind, zu befördern. Dabei sind im Wesentlichen vier Anknüpfungspunkte der Zahlungen zu unterscheiden (Abb. 7.1). Diese werden entweder zur Reduktion der potentiellen Schadenskosten bzw. der Vulnerabilität, der tatsächlichen Schadenskosten sowie der Vermeidungs- oder Anpassungskosten der Entwicklungsländer herangezogen. Im Gegensatz zur bisherigen Diskussion in der wissenschaftlichen und politischen Arena sollte

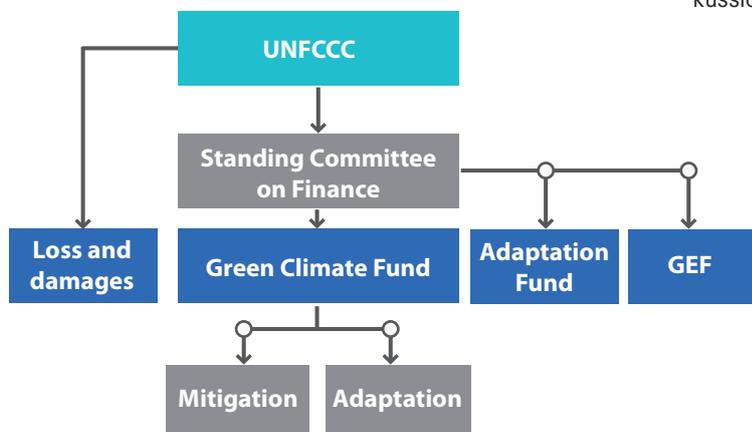


Abb. 7.1 : Das System der „Climate Finance“ innerhalb der neuen Post-Kyoto-Architektur sieht im Wesentlichen vier Anknüpfungspunkte für die Instrumente zur finanziellen Unterstützung klimapolitischer Maßnahmen in Entwicklungsländern vor, die unter dem Dach der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) implementiert werden. Im Mittelpunkt steht der Green Climate Fund, der eine Finanzierung von 1) Anpassungs- und 2) Vermeidungsinvestitionen vorsieht und damit den reinen Anpassungsfonds erweitert. Ein weiteres Finanzierungsprogramm zielt auf die Linderung der 3) klimawandelbedingten Residualschäden (loss and damages) ab. Zu den UNFCCC-bezogenen Finanzierungsströmen gesellt sich die Global Environmental Facility (GEF) der Weltbank, deren Transferzahlungen sich im Sinne einer Entwicklungshilfe an der 4) Vulnerabilität, sprich den potentiellen Schadenskosten orientieren. (Quelle: Glemarec, 2011 )



Abb. 7.2: Vor dem Hintergrund stockender internationaler Klimaschutzverhandlungen gewinnt die klimapolitische Strategie der Anpassung zunehmend an Bedeutung. Besonders drängend zeigt sich der Anpassungsbedarf in Entwicklungsländern, die bereits heute massiv von negativen Folgen des Klimawandels, wie z.B. Hitzestress bzw. Dürren, betroffen sind, aber nicht die nötige Finanzkraft aufweisen, um ihre Vulnerabilität zu lindern. Die Abbildung zeigt eine unter Trockenheit leidende Nomadensiedlung im Westjordanland. Im Rahmen des Projektes „S.M.A.R.T.“ (Sustainable Management of Available Water Resources with Innovative Technologies) wurde dort ein Wasserverteilungsgraben errichtet. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

neben der Transferhöhe ein verstärktes Augenmerk auf die von den unterschiedlichen Transfertypen ausgehenden strategischen Effekte, Anreize und Wohlfahrtsimplikationen, und damit auf die Frage nach der Art der Finanzierung, gerichtet werden.

### Interaktionen zwischen Klimapolitik und -forschung und die Rolle des IPCC

Obwohl in der Literatur oftmals von der „hegemonialen Rolle“ des Weltklimarats (IPCC) die Rede ist, liegen bislang nur wenige Studien vor, die die Wechselwirkungen seiner Berichte mit der Forschung auf der nationalen Ebene untersuchen. Diese Thematik wird im Rahmen des Forschungsprojekts NESNET vom UFZ aufgegriffen. Das Projekt kommt zum Ergebnis, dass der IPCC, wenn er auch nicht direkt versucht Einfluss auf nationale Forschungsanstrengungen auszuüben, wichtige Impulse und neue Rahmenbedingungen für Forschung und Forschungspolitik geschaffen hat. Obwohl transnationale Expertengremien wie der IPCC nicht über ein offizielles Mandat für „Forschungspolitik“ verfügen, besteht doch eine seiner Aufgaben darin zu ermitteln, wo Informationsbedarf seitens politischer Entscheidungsträger besteht und demzufolge entsprechende Forschungsprioritäten zu identifizieren. IPCC-Berichte werden in den deutschen Forschungsprogrammen in der Regel als Standardreferenz verwendet und verfügen damit über eine generische Funktion, um die Relevanz der Klimaproblematik in Politik und Forschung zu belegen. Zudem wird deutlich, dass das vom IPCC zur Verfügung gestellte Wissen sowie seine Konzepte für Forschung und Politikberatung nicht unmittelbar anschlussfähig sind. Vielmehr besteht Bedarf, Konzepte, wie

das der Klimaanpassung, auf die Erfordernisse der nationalen und regionalen Ebene sowie der einzelnen Forschungsfelder (wie Biodiversität und Hochwasserschutz) anzupassen und mit den bereits bestehenden Ansätzen und Wissensbeständen zu integrieren. (Hulme et al., 2011; Beck, 2012).

### Ökonomische Bewertung und Auswahl von Anpassungsmaßnahmen

Entscheidungen im Rahmen einer integrierten Klimapolitik führen zu komplexen Risikoabwägungen, die letztlich nur in Diskursen mit Betroffenen getroffen werden können. Brauchen wir angesichts zunehmender Winterniederschläge neue Bemessungsgrundlagen für kommunale Entwässerungsinfrastrukturen? Wie können Frischluftkorridore in hitzegefährdeten Städten sozialverträglich gestaltet werden ohne gewachsene Nachbarschaften zu zerstören? Die sozioökonomische Forschung kann diese Diskurse durch dynamische, an die lokalen Bedingungen anpassbare Entscheidungshilfen stützen (Abb.3). In diesem Zusammenhang wurde am UFZ das softwarebasierte, partizipative Entscheidungsunterstützungstool PRIMATE (Probabilistic Multi-Attribute Evaluation) entwickelt. Dieses ermöglicht es, in Kooperation mit betroffenen Akteuren und Interessensvertretern geeignete Anpassungsmaßnahmen zu konzipieren sowie Bewertungskriterien zu identifizieren und zu gewichten. Je nach Wunsch und Datenlage kann die Bewertung anhand des Nutzen-Kosten-Kriteriums oder multikriteriell vorgenommen werden. Das Tool wurde bereits erfolgreich zur Priorisierung von urbanen Anpassungsmaßnahmen im Rahmen einer Fallstudie angewendet (Gebhard et al., 2011).

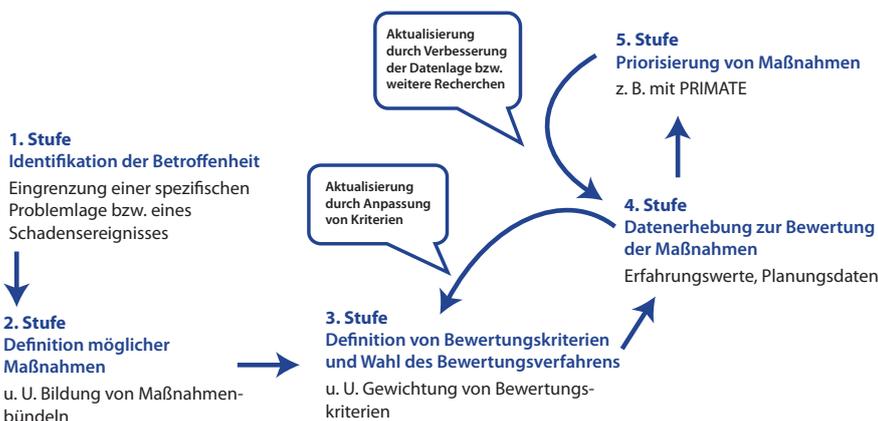


Abb. 7.3: Prozess der Bewertung und Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen unter Nutzung des softwarebasierten Entscheidungsunterstützungstools PRIMATE. (Grafik: UFZ)

## 8

# Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten

*Welche Mechanismen, Prozesse und regionalen Klimamuster verstärken Klimamasprünge 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?*

Klimaarchive der Vergangenheit belegen, dass abrupte Änderungen des Klimas mit globalen Konsequenzen innerhalb von wenigen Jahren oder Jahrzehnten stattgefunden haben. Potentiell sind solche abrupten Übergänge auch für die Zukunft nicht auszuschließen. Ein tieferes Verständnis der Klimaarchive liefert daher die Grundlage zum besseren Verständnis derjenigen Prozesse und Mechanismen, die solchen schnellen Klimaänderungen zugrunde liegen.

## Modellierung abrupter Änderungen der Tiefenwasserzirkulation im Atlantik

Im Bereich des Atlantischen Ozeans zeigt das Klima einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Wechsel von Warm- und Kaltphasen in hohen Breiten und Veränderungen der meridionalen Tiefenwasserzirkulation. Geologische Archive aus marinen Sediment- und Eisbohrkernen zeigen, dass diese Veränderungen relativ plötzlich innerhalb nur weniger Dekaden abgelaufen sein könnten.

Um die Ursachen solcher abrupten Übergänge des vergangenen Klimas besser verstehen zu können, wurden derartige Prozesse mit Hilfe eines komplexen numerischen Erdsystemmodells untersucht. Während der letzten Eiszeit in der Zeit von ca. 70.000 bis 11.500 Jahren vor heute sind große Mengen von kontinentalem Eis auf Nordamerika und Skandinavien gespeichert und episodisch in den Nordatlantik als Frischwasser gelangt. Unsere numerischen Experimente simulieren daher den zeitlichen Verlauf des Klimas als Antwort auf Süßwasser-Einträge im Nordatlantik für drei Zeitabschnitte: das präindustrielle Klima und die glazialen Klimata vor 21.000 bzw. 32.000 Jahren. Die jeweiligen Grundzustände für unsere Experimente basieren auf Gleichgewichtssimulationen von jeweils 2.000 Jahren Dauer, daran anschließend wurde ein verstärkter Süßwassereintrag von 0.2 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) über einen Zeitraum von 150 Jahren im Nordatlantik simuliert. Am Ende dieser Zeitperiode zeigen alle drei Simulationen eine ähnliche Reaktion in Form einer stark reduzierten meridionalen Tiefenwasserzirkulation (Abb. 1a, b, c). Die anschließende Wiederherstellung der Zirkulation ist jedoch stark abhängig vom Klimagrundzustand. Dabei finden wir ein schnelleres und stärker ausgeprägtes Ansprungsverhalten der Zirkulation für die Klimabedingungen vor 32.000 Jahren (Abb. 1b) im Vergleich zu 21.000 Jahren (Abb. 1c). Für das präindustrielle Klima (Abb. 1a) beobachten wir einen vergleichsweise langsamen und graduellen Anstieg zum Ausgangszustand.

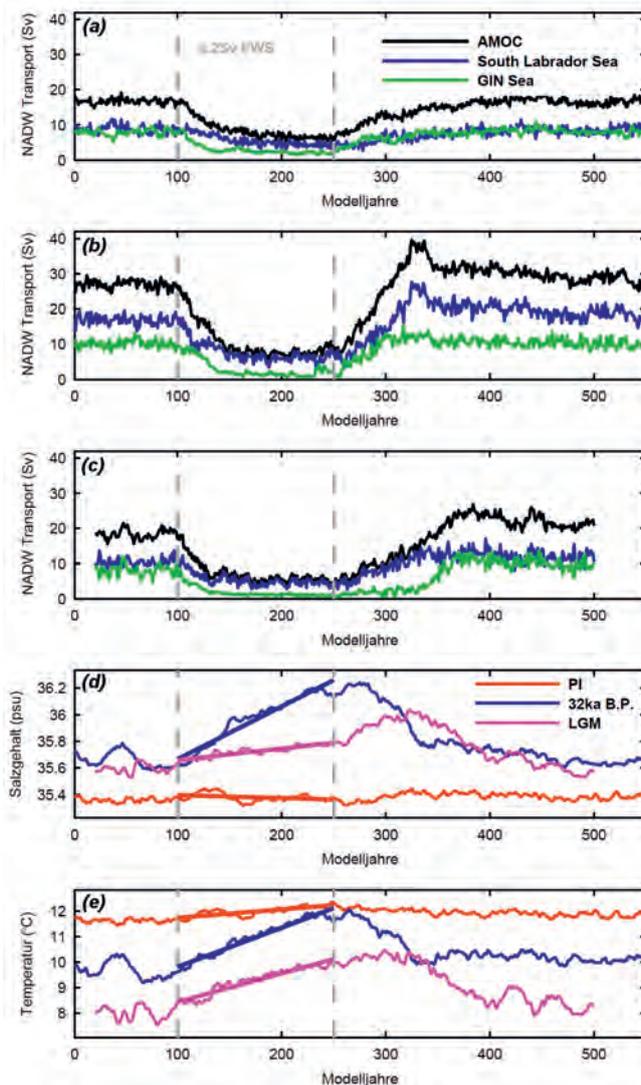


Abb. 8.1 : Änderungen der Tiefenwasserbildung in der Labrador-See und der Grönländisch-Isländisch-Norwegischen See (GIN) sowie im Nordatlantik (AMOC) für das a) präindustrielle Klima und für das Klima vor b) 32.000 bzw. c) 21.000 Jahren. Die gestrichelten grauen Linien bei Modelljahr 100 und 250 kennzeichnen das Zeitfenster der Frischwasserstörung (FWS). Die Kurven in d) und e) zeigen den Simulationsverlauf der Temperatur bzw. des Salzgehalts im tropischen Atlantik ( $20^{\circ}\text{S}$ - $30^{\circ}\text{N}$ ) in 500 m Tiefe. (Grafik: AWI)



Abb. 8.2: Der Meerfelder Maarsee während des Aufbruchs der winterlichen Eisdecke. (Foto: Martin Koziol, Maarmuseum Manderscheid)

Der Schlüssel für diese unterschiedlichen Klimaantworten liegt in der veränderten vertikalen Temperaturschichtung im Nordatlantik, die durch eine besonders stark zunehmende Temperaturinversion (Zunahme der Temperatur mit der Tiefe) im Experiment für das Klima vor 32.000 Jahren gekennzeichnet ist. Der plötzliche Zusammenbruch dieser vertikalen Schichtung wird durch das Ende der Frischwasserstörung ausgelöst und führt zu einer Verstärkung der Tiefenwasserzirkulation durch das Aufströmen relativ warmer und salziger Zwischenwassermassen an die Meeresoberfläche. Einen ähnlichen Einfluss hat der tropische Atlantik, der durch die Ansammlung von warmem und salzigem Wasser während der Süßwasserstörung zur anschließenden Anfachung der Tiefenwasserzirkulation als positive Rückkopplung beiträgt (Abb. 1d-e). Diese Vorgänge führen temporär zu einem stärkeren Volumentransport, der den des Ausgangszustands übertrifft (Abb. 1b, c). Diese mit Daten im Einklang stehenden Resultate liefern eine Erklärung für das unterschiedliche Verhalten von Änderungen der Tiefenwasserzirkulation während abrupter Klimaübergänge in der letzten Eiszeit.

### Klimainformationen aus Seesedimenten

Jahreszeitlich geschichtete Seesedimente (Abb. 8.3) liefern Informationen über abrupte und kurzfristige Klimaschwankungen in Zeiten vor instrumentellen Aufzeichnungen, ihre möglichen Ursachen sowie ihre regionalen Auswirkungen im Lebensraum des Menschen. In einer Studie an Sedimenten aus dem Meerfelder Maarsee in der Westeifel (Abb. 8.2) konnten neue Kenntnisse über eine Phase der Abkühlung zu Beginn der vorrömischen Eisenzeit in Mitteleuropa gewonnen werden. Vor 2.760 Jahren verdoppelte sich plötzlich die Dicke der Jahreslagen für einen Zeitraum von 200 Jahren. Mikroskopische Analysen der Jahresschichten zeigen, dass vor allem das stark vermehrte Auftreten von Schalenresten von Kieselalgen diese Zunahme der Lagendicke bewirkte. Grund dafür waren starke Algenblüten im Frühjahr nach dem Aufbruch der winterlichen Eisbedeckung des Sees. Diese Algenblüten wurden durch Freisetzung von Nährstoffen aus dem Sediment durch windinduzierte, verstärkte Wasserzirkulation ausgelöst. Damit ist die Zunahme der Lagendicke ein deutlicher Hinweis auf häufig stürmische Bedingungen im Frühjahr. Parallele geochemische Analysen ergaben genau für diesen Sedimentabschnitt mit dickeren Lagen eine Zunahme des Elementflusses von Beryllium-10, der als Anzeiger (Proxy) für Sonnenaktivität

gilt. Erhöhte Beryllium-10 Werte sind Indikatoren für eine geringe Sonnenaktivität und zeigen hier das als Homerisches Minimum bekannte große Sonnenminimum an. Damit kann erstmalig an einem Sedimentprofil gleichzeitig gezeigt werden, dass sich zeitgleich mit einer deutlichen und etwa 200 Jahre andauernden Verringerung der Sonnenaktivität die atmosphärische Zirkulation in Mitteleuropa geändert hat. Dies lässt auf einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und atmosphärischer Zirkulation schließen. Die Ergebnisse stützen zudem Beobachtungen aus Satellitendaten, dass der im Vergleich zur Gesamtstrahlung deutlich stärker variierende UV-Anteil der Solarstrahlung, der für Ozonproduktion und Erwärmung in der Stratosphäre verantwortlich ist, ein Schlüssel zum Verständnis der Verstärkungsmechanismen ist, durch die sich Änderungen der Solaraktivität auf das Klima auswirken. Auch wenn die komplexe Prozesskette der Übertragung stratosphärischer Änderungen auf troposphärische Windsysteme noch nicht im Detail bekannt ist, zeigen die Ergebnisse aus dem Meerfelder Maar, dass neue Proxydaten wesentlich zum Verständnis regionalen Klimawandels beitragen können. Zudem kann mit einer präzisen Chronologie durch Auszählung der Jahreslagen festgestellt werden, dass die Änderung von ruhigen zu windigen Verhältnissen im Frühjahr innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne von nur 8 Jahren stattgefunden hat. Die Gründe für solche kurzfristigen Änderungen und mögliche Schwellenwerte sind nicht bekannt. Die Daten dieser Studie stehen REKLIM Partnern zu Verfügung, um sie mit Proxydaten aus anderen Geoarchiven und Regionen zu vergleichen und in Klimamodellen zu testen.



Abb. 8.3: Jahreszeitlich geschichtete Sedimente aus dem Meerfelder Maarsee aus dem ersten Jahrtausend vor Christi. Die auffällige, helle Lage bei ca. 33 cm zeigt eine Eintragslage nach einem starken Abflussereignis, dass durch einen Starkregen verursacht wurde. (Grafik: GFZ)

## 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?*

## Überblick

Das Thema „Klimawandel und Luftqualität“ wird seit Mitte 2011 an den beteiligten Zentren (Karlsruher Institut für Technologie, Forschungszentrum Jülich, Helmholtz-Zentrum München) und den assoziierten Partnern (Zentrum Allergie und Umwelt an der TU München, Institut für Physik der Atmosphäre am DLR, Rheinisches Institut für Umweltforschung an der Universität Köln, Engineering Mathematics and Computing Lab am KIT) umgesetzt.

Hauptziel dieses Themas ist die Vernetzung und koordinierte Weiterentwicklung der bereits existierenden Arbeiten und Kompetenzen im Bereich der Forschungen auf dem Gebiet von Klimawandel und Luftqualität, insbesondere mit den Bereichen Gesundheit und Allergologie, sowie eine bessere Integration der klimarelevanten Aspekte der Luftqualität in die Entwicklung von regionalen Klimavorhersagen. Dies erfolgt vor allem durch die thematische Ausrichtung und Abstimmung von neuen Arbeiten in den verschiedenen Zentren.

Schwerpunkte der bisherigen Arbeiten lagen in der Untersuchung des Einflusses von Aerosolen und Feinstaub auf Klima

und Luftqualität, in der Auswirkung lokaler Luftreinhaltemaßnahmen in Abluffahnen sauberer Kohlekraftwerke auf Wolken und Niederschlagshäufigkeit, sowie in der Entwicklung neuer Satellitenmissionen zur Überwachung der Luftqualität über Europa.

## Einfluss von Aerosolen und Feinstaub auf Klima und Luftqualität

Basierend auf Messungen und Modellsimulationen konzentrierte sich der Schwerpunkt der Arbeiten auf die direkte und indirekte Auswirkung von Aerosolen und Feinstaub auf Klima und Luftqualität. Zum einen wurden die Auswirkungen des Eyjafjallajökull-Vulkanausbruchs auf Island auf die Luftqualität und auf die Gesundheit untersucht (Schäfer et al. 2011). Zum anderen wurden Modellsimulationen mit dem gekoppelten Klima-Chemie-Modellsystem WRF/chem über direkte und indirekte Feedbackmechanismen von Aerosolen und Feinstaub auf die Meteorologie (Strahlung, Temperatur, Niederschlag, Grenzschichthöhe, Wolken) und auf die Luftqualität (Ozon, PM<sub>10</sub>) in Europa durchgeführt (Abb. 9.1). Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass der sogenannte semi-direkte Effekt, der den Einfluss von Temperatur, Mischungsschichthöhe und Wolken auf den Strahlungshaushalt beschreibt, den direkten Effekt der Absorption durch Aerosole auf die Strahlung dominiert. Die Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen und die PM<sub>10</sub> Verteilung (Feinstaub mit einer Größe kleiner 10 µm) ergab Veränderungen von ±10 % bzw. bis zu -50 %, in Abhängigkeit von der Bewölkung, dem Niederschlag und von der Stärke der Feinstaub-Emissionen.

## Auswirkungen lokaler Luftreinhaltemaßnahmen in Abluffahnen sauberer Kohlekraftwerke auf Wolken und Niederschlagshäufigkeit

Die Auswirkungen lokaler Luftreinhaltemaßnahmen in Abluffahnen sauberer Kohlekraftwerke in Deutschland, China und Australien auf das regionale Klima wurden durch Junkermann et al. (2011) mit einem Ultraleichtflugzeug (das kleinste bemannte Umweltforschungsflugzeug der Welt) untersucht, mit

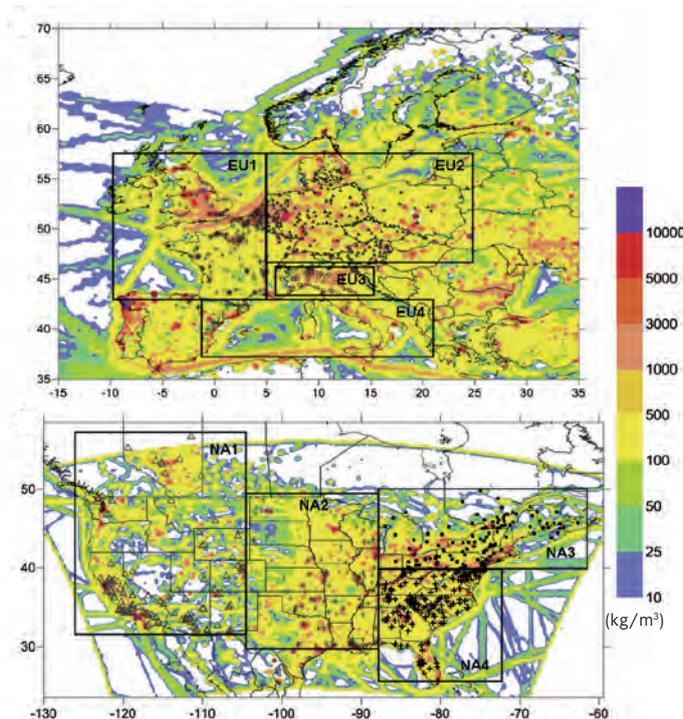


Abb. 9.1: Überblick über die mit zehn verschiedenen aktuellen regionalen Luftqualitäts-Modellsystemen untersuchten Gebiete über Europa (oben) und Nordamerika (unten) (Solazzo et al. 2012). Die Farben zeigen die anthropogenen Sommeremissionen von NO<sub>x</sub> (in kg m<sup>-3</sup>) aus Standardinventoren. Die Punkte und anderen Symbole sind die Positionen von städtischen Ozonmessstationen, die für die Analyse genutzt wurden. (Grafik: aus Solazzo et al., 2012)

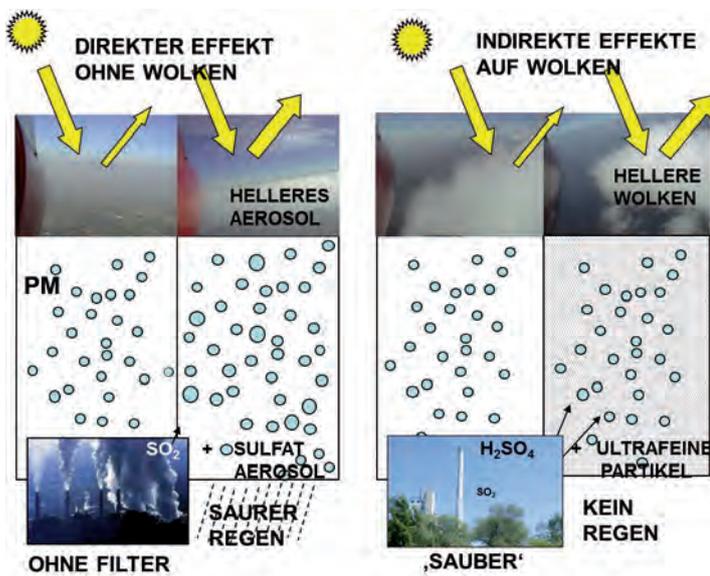


Abb. 9.2: Schematische Darstellung des Einflusses von Abluftreinigungsmethoden auf die Niederschlagsstatistik (Junkermann et al., 2011). Links (altes Kraftwerk): die SO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflussen die Größe und Streuung der Aerosole, aber nicht die Anzahl von emittierten Teilchen. Rechts (neues Kraftwerk): direkt emittiertes H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> erhöht die Dichte von Wolkenkondensationskeimen und beeinflusst dadurch massiv die Wolken-Mikrophysik (hellere Wolken, reduzierter Niederschlag). (Grafik: aus Junkermann et al., 2011)

dem die Emissionen und das Anwachsen der Aerosole direkt in Höhe der Abluftfahnen verfolgt werden kann.

Die derzeit übliche Abgasreinigung durch sogenannte Rauchgaswäsche und selektive katalytische Reduktion (SCR) führt zu einer massiven Erhöhung der Emission ultrafeiner Schwefelaeosole und macht Kohlekraftwerke zu den wichtigsten Quellen für ultrafeines Aerosol (Abb. 9.2). Diese Partikel wachsen in der Atmosphäre in wenigen Stunden zu Wolkenkondensationskernen an und beeinflussen damit auf regionaler Skala die Wolken-Mikrophysik sowie die Niederschlagsintensität und -häufigkeit.

Eine weitere Messkampagne ist für den Sommer 2012 in Australien geplant, um dort die regionalen Auswirkungen dieser Technologien genauer zu untersuchen.

### Entwicklung neuer Satellitenmissionen zur Überwachung der Luftreinheit über Europa

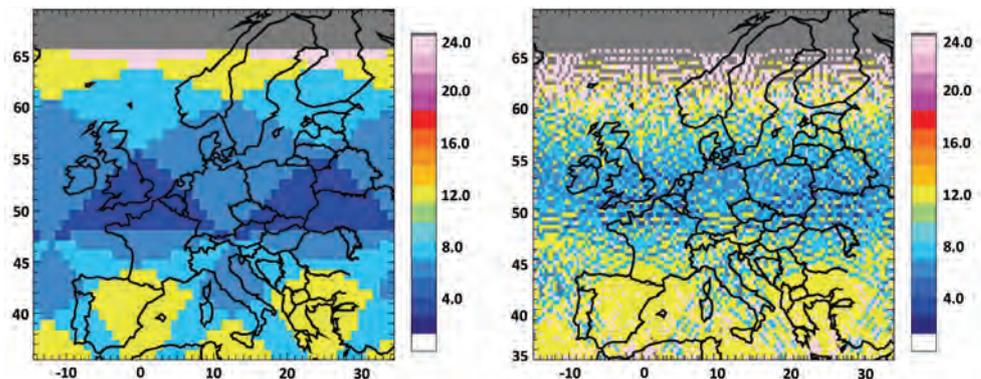
Die Überwachung der Luftreinheit über Europa durch Satelliten ist ein wichtiges Thema, dem seit einigen Jahren sehr viel Aufmerksamkeit gilt. Messungen von troposphärischem NO<sub>2</sub> mit den Instrumenten GOME (auf ERS-2) und SCIAMACHY (auf ENVISAT) haben wichtige Impulse für die Bestimmung von regionalen Emissionen und der Verteilung von Luftschadstoffen gesetzt. Diese Messungen werden nun mit operationellen Sensoren (GOME-2) auf den MetOp-Satelliten fortgesetzt. In den vergangenen Jahren wurden erstmals Messungen von troposphärischem Ozon aus Daten des IASI-Instruments (ebenefalls auf MetOp) abgeleitet, die für die Validierung von Chemie-

Klima-Modellen und Verbesserung von Emissions-Inventorien von großem Interesse sind. Satellitendaten von troposphärischem CO sind ebenfalls durch IASI möglich.

Aktuelle Arbeiten betreffen vor allem Messungen von NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO und Aerosolen aus dem geostationären Orbit, der im Vergleich zu den derzeit verfügbaren polaren Satelliten (MetOp) eine bessere räumliche und zeitliche Abdeckung ermöglicht, sowie den Einfluss von Wolken verringert (Abb. 9.3). In Europa wird dies der GMES-Sentinel-4 sein, der gemeinsam mit dem operationellen Satelliten „Meteosat Third Generation“ (MTG) Ende dieses Jahrzehnts gestartet werden soll. Die Optimierung dieser und eventueller Folgemissionen wird mit sogenannten „Observation System Simulation Experiments“ (OSSE) durchgeführt, bei denen durch die Kopplung der simulierten Beobachtungsdaten mit operationellen Luftqualitäts-Modellen der Einfluss von Instrumentparametern auf die Verbesserung der Vorhersagen untersucht wird.

Die Vorbereitungsarbeiten auf diesem Gebiet (Lahoz et al. 2012) erfolgen in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern, Raumfahrt- und Umweltagenturen weltweit, insbesondere koordiniert durch das CEOS („Committee on Earth Observation Satellites“) – Gruppe „Atmospheric Composition Constellation“ (ACC) – sowie mit dem europäischen Netzwerk MACC („Monitoring of Atmospheric Composition and Climate“), welches die in GMES geplanten operationellen Services auf diesem Sektor bündelt.

Abb. 9.3: Verbesserung der räumlichen Auflösung und Abdeckung über Europa durch einen Satelliten im geostationären Orbit (GEO) im Vergleich zu einer Low-Earth-Orbit (LEO)-Konstellation von polaren Satelliten (Lahoz et al. 2012). Links: benötigte Anzahl von LEO-Satelliten für eine Auflösung von 1.0 Grad (etwa 100 km). Rechts: benötigte Anzahl von LEO-Satelliten für eine Auflösung von 0.4 Grad (etwa 40 km). Graue Bereiche zeigen Zonen, die aus GEO nicht erfasst werden können. (Grafik: aus Lahoz et al., 2012)



## 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?*

Basis für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel ist die Abschätzung und Bewertung zukünftiger Risiken. Die integrierte Analyse der Dynamiken des Klima- und sozioökonomischen Wandels stellt jedoch gegenüber den bisherigen statischen Risikoanalysen eine große Herausforderung dar. Die Kopplung von natur- und sozialwissenschaftlichen Ansätzen innerhalb der beteiligten Helmholtz-Zentren (GFZ, HZG, KIT, UFZ) ermöglicht gerade solche dynamischen Risikoanalysen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung von meteorologischen Extremereignissen, deren Risiken sich bislang im Gegensatz zu häufigeren Ereignissen nur mit vergleichsweise großen Unsicherheiten abschätzen lassen. Dazu zählen Sturmfluten, Hochwasser, Starkwinde, Hagel, Blitze und Dürren. Eine weitere Herausforderung stellt die integrierte Bewertung kommunaler oder regionaler Planungskonzepte und Anpassungsstrategien dar. Die Wissenschaft entwickelt Methoden und Verfahren, um politische Entscheidungsträger im Management von Risiken unter hohen Unsicherheiten zu unterstützen. Im Folgenden werden einige Forschungsaktivitäten vorgestellt.

## Wahrnehmung von Klimawandel und Naturkatastrophen

Kulturelle Wertevorstellungen und Wahrnehmungen von Risiken in der Bevölkerung spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung zukünftiger Planungs- und Managementstrategien. Aber wie nimmt die Bevölkerung einer Region den Klimawandel

und die potentielle Gefahr von Naturkatastrophen wahr? Am HZG wird dies im Metropolraum Hamburg untersucht. In einer jährlich stattfindenden Telefonumfrage seit 2008 werden Hamburger Haushalte um ihre Einschätzung zum Einfluss des Klimawandels sowie die Wahrscheinlichkeit einer eintretenden Naturkatastrophe gebeten. Die aktuellste Befragung vom Mai 2012 zeigt, dass, wie auch schon in den Jahren zuvor, weniger als die Hälfte (47%) der Befragten der Meinung ist, dass der Klimawandel eine große oder sehr große Bedrohung für Hamburg darstellt (Abb. 10.1). Als Naturkatastrophe mit den potentiell schwersten Folgen für Hamburg schätzen 83% Sturmfluten bzw. Überschwemmungen ein, 8% nennen Stürme, 7% Starkregen und 2% Hitzewellen (siehe auch: Ratter et al., 2012).

## Auf dem Weg zu einem integrativen Hochwassermanagement in Deutschland

In Deutschland und Europa werden zunehmend integrative Konzepte des Hochwassermanagements umgesetzt. Auch private Haushalte sollen einen Beitrag leisten. Hierzu zählt unter anderem der Einsatz mobiler Wassersperren oder widerstandsfähiger Baumaterialien sowie das Sichern wassergefährdender Stoffe. Das GFZ konnte die schadensreduzierende Wirkung dieser Maßnahmen quantifizieren und ihre Kosteneffizienz aufzeigen (Kreibich et al. 2011). Außerdem wurde der Stand der Umsetzung privater Vorsorgemaßnahmen durch

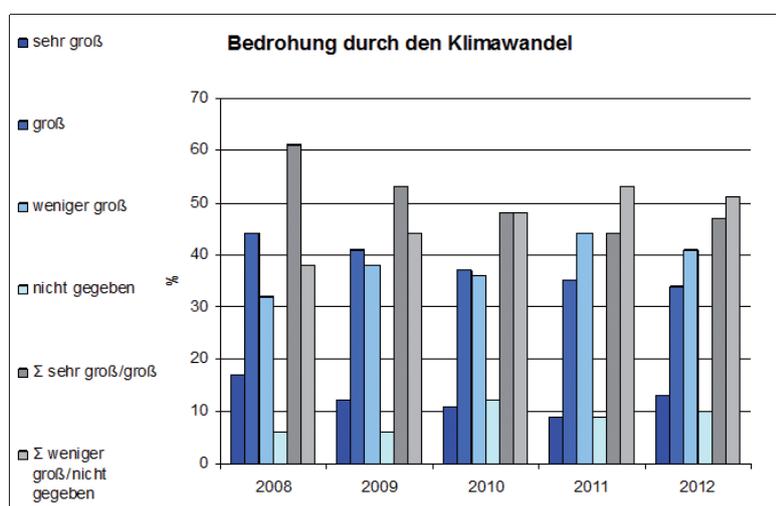


Abb. 10.1: „Stellt der Klimawandel Ihrer Meinung nach eine sehr große, große, weniger große oder überhaupt keine Bedrohung für Hamburg dar?“ Befragungen 2008-2012, Anzahl der befragten Haushalte n~500. (Quelle: Ratter et al., 2012; www.hzg.de)

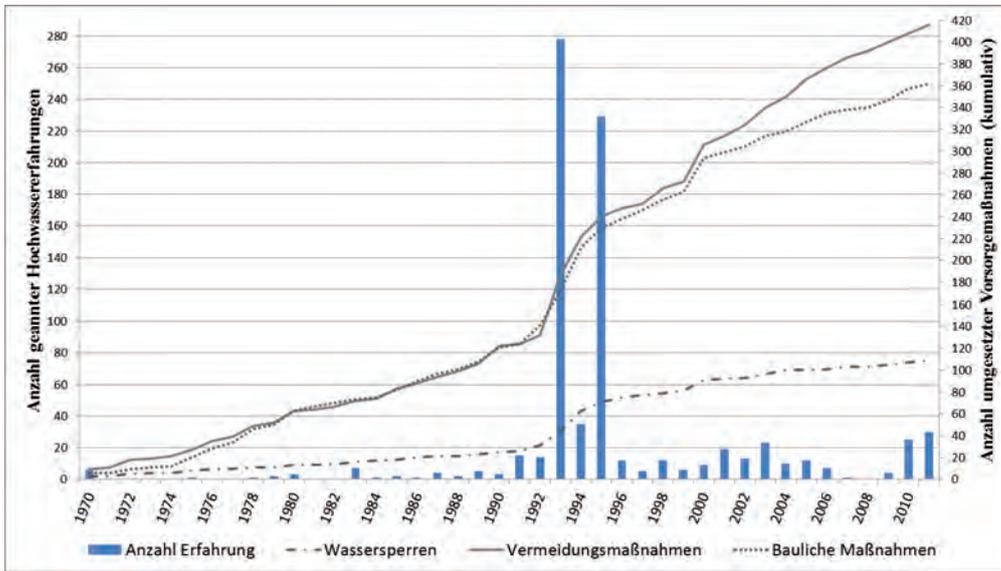


Abb. 10.2: Hochwassererfahrung und Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen hochwassergefährdeter Haushalte (Anzahl der befragten Haushalte n=752) entlang des Rheins (1970-2011). (Grafik: GFZ)

eine Befragung hochwassergefährdeter Haushalte entlang des Rheins durch das GFZ in Zusammenarbeit mit dem Institute for Environmental Studies (IVM), Amsterdam, untersucht (Bubeck et al. eingereicht). Die Ergebnisse zeigen, dass v.a. die direkte Erfahrung mit Hochwassern zur Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen führt (Abb. 10.2). Dies zeigt sich beispielsweise sehr deutlich im Nachgang der beiden schweren Hochwasser in den Jahren 1993 und 1995. Aber wenn der Klimawandel zunehmend auch Gebiete mit wenig direkter Erfahrung von Hochwassern beeinflusst, stellt sich die Frage, wie in diesen Regionen eine ausreichende Verbreitung von Vorsorgemaßnahmen erreicht werden kann.

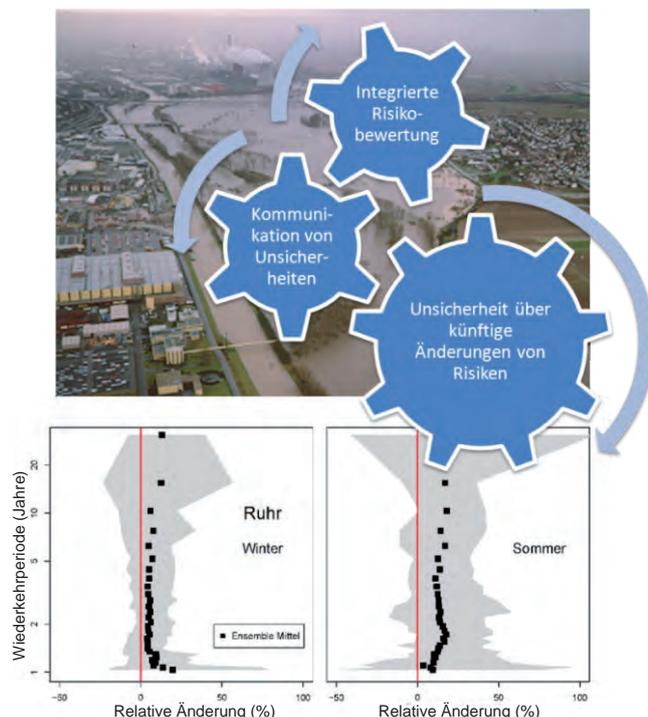
### Integrierte Risikobewertung und Kommunikation von Unsicherheiten für kommunale Risikomanagement- und Anpassungsstrategien

Die Auswirkungen elementarer Wetterereignisse sind in dicht besiedelten und dynamischen Räumen besonders komplex, gleichzeitig ist das Schadenpotential aufgrund der hohen Wertekonzentration in urbanen Räumen besonders groß. Für die Entwicklung kommunaler Anpassungs- und Risikomanagement-Strategien ist es daher wichtig, lokale Gefährdung und Risiken abzuschätzen und zu analysieren, mit welchen Unsicherheiten diese Abschätzungen verbunden sind. Hierfür werden hoch aufgelöste Klimaprojektionen, wie sie zum Beispiel im gemeinsam von GFZ und KIT betriebenen Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology CEDIM erarbeitet wurden (Schädler et al., 2012), mit Modellen zur Abschätzung von Vulnerabilität verbunden, so dass eine kombinierte, systemische Betrachtung von Interdependenzen, indirekten Effekten oder Kaskaden möglich wird (Abb. 10.3).

Abb. 10.3: Die Abbildung (unten) zeigt die auf Basis regionaler Klimamodellierung abgeleitete relative Veränderung der Hochwasserabflüsse (Ensemblemittel) zwischen 2021-2050 und 1971-2000, hier am Beispiel der Ruhr. Der Einsatz von gekoppelten Ensembles ermöglicht die Quantifizierung der Unsicherheiten (in grau, Standardabweichung vom Ensemblemittel). Die Arbeiten am KIT beschäftigen sich auch mit der Frage, wie solche Unsicherheiten in Planungsprozessen kommuniziert und berücksichtigt werden können. (Grafik: Schädler et al. 2012, Foto: KIT)

### Methoden zur Abschätzung der Kosten von Naturgefahren

Für ein effizientes Management der Risiken von Klimafolgen ist ein tiefgehendes Verständnis der durch Naturgefahren verursachten Kosten erforderlich. Das EU-Projekt CONHAZ, an dem UFZ und GFZ beteiligt waren, hatte das Ziel, bestehende Methoden zur Abschätzung der Kosten von Naturgefahren zusammenzustellen. Dabei wurden unterschiedliche Naturgefahren (Dürren, Hochwasser, Sturmfluten und alpine Naturgefahren) und unterschiedliche Kostenarten berücksichtigt (direkte Schäden, Verluste durch Betriebsunterbrechungen, indirekte Schäden, „intangible effects“ wie Gesundheits- und Umwelteffekte sowie Kosten der Risikoreduzierung durch Managementmaßnahmen). Es konnte erstmals ein umfassender Überblick über den derzeitigen Stand der Bewertungsmethoden in diesem Bereich erstellt werden (www.conhaz.org; Markantonis et al. 2012).



# Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg

*Klimaberatung am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI)*

Was bedeutet Klimawandel für junge Menschen auf der ganzen Welt? Wer ist für die Klimaveränderungen verantwortlich und wer trägt die Konsequenzen? Um diese Aspekte rund um das Thema „Klimagerechtigkeit“ besser nachvollziehbar zu machen, hat das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg am Alfred-Wegener-Institut im Jahr 2011 das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt „climateXperience“ durchgeführt. Gemeinsam mit dem Bremer Bildhauer und Künstler Gunther Gerlach und der Europaschule Schulzentrum Sekundarbereich II Utbremen in Bremen wurde eine Ausstellung in der Bremer Kulturkirche St. Stephani realisiert. Die Bearbeitung des Projektes wurde durch das Fach „Angewandtes Projektmanagement“ in den Schulalltag integriert. Themen aus den Bereichen Klimawandel, Klimaanpassung und Klimaschutz wurden für die Ausstellung bearbeitet. Die Themen sollten mithilfe von selbst ausgewählten und erstellten Informationen, Bildern und Gegenständen anschaulich präsentiert werden. Die Kooperation mit Herrn Gerlach ermöglichte es den Sekundarschülern, neue Ausdrucksformen zu finden, um ihre Ansichten und Erfahrungen mit anderen zu teilen. Die positive Berichterstattung, unter anderem in der lokalen Bremer Tageszeitung dem „Weser-Kurier“, führte zur Beteiligung der Schülerinnen und Schüler mit ihrem Projekt am Nachhaltigkeitstag für Bremer Schulen im März 2012. Dort erhielten u.a. drei Teams des Projektes die Gelegenheit, ihre selbstgedrehten Filme zum Thema Klimawandel auf einer Großleinwand im Kino CineStar Kristall-Palast zu zeigen.



*Abb. K.1: Ergebnis der Schüleraktion „Schrottmonster“ auf dem Recyclinghof. Die Aktion wurde im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Schülerprojektes „climateXperience“ durchgeführt. (Foto: Gunther Gerlach)*



*Abb. K.2: Exponate der Schülersausstellung „climateXperience“ während des Nachhaltigkeitstages für Bremer Schulen im März 2012. (Foto: Renate Treffeisen)*

Zu den aktuellen Projekten des Klimabüros gehört darüber hinaus die Erarbeitung eines Vorlesungsskriptes für das Fernstudium Umweltwissenschaften für den Themenbereich Klima der Fernuniversität in Hagen. Der weiterbildende Studiengang bündelt aktuelles und praxisnahes Wissen aus den verschiedenen Gebieten der Umweltwissenschaften sowie langjährige Erfahrungen in den Bereichen der Weiterbildung und des Fernstudiums. Diese Arbeit überführt die Forschungsergebnisse des Alfred-Wegener-Institutes in die Lehre und fördert und vertieft so den gegenseitigen Austausch wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Um auch weiter die Kommunikation aus der Wissenschaft in die Gesellschaft zu vertiefen, veranstaltete das Klimabüro anlässlich des Generalkonvents im Juli 2012 einen Workshop zum Thema „Beobachtete Klimaänderungen in den Polargebieten“ in der Pauluskirche in Bremerhaven.

Darüber hinaus organisiert das Klimabüro im Oktober 2012 den Deutsch-Französischen Workshop „Gateway to the Arctic“ am AWI in Bremerhaven, der junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen der Natur- und Sozialwissenschaften mit Schwerpunkt Arktis zusammenbringt, um ihnen einen Blick und Austausch über die eigene Disziplin hinaus zu ermöglichen.

Partner für Klimafragen in Norddeutschland

Die sich aus dem Dialog mit der Öffentlichkeit in Norddeutschland ergebenden Fragestellungen werden im Norddeutschen Klimabüro am Helmholtz-Zentrum Geesthacht verwendet, um Ergebnisse aus der Klimaforschung für Norddeutschland fortlaufend zu bündeln, bedarfsgerecht auszuwerten und öffentlich zugänglich zu machen. So sind im letzten Jahr zwei neue Informationsangebote entstanden:

**Information zum Küstenschutz:**  
**www.kuestenschutzbedarf.de**

Anlässlich des fünfzigsten Jahrestages der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 hat das Norddeutsche Klimabüro eine neue Webseite entwickelt, die über den aktuellen und künftigen Küstenschutzbedarf informiert. Wenn man in Norddeutschland nach den Gefahren des Klimawandels fragt, werden oft die Sturmfluten als erstes genannt. Aber neben diesem allgemeinen Problembewusstsein ist praktisch anwendbares Wissen unverzichtbar, denn dass derzeit der Wohnort von etwa 4,8 Mio. Einwohnern Norddeutschlands zweimal täglich überflutet werden würde, wenn es keine Deiche gäbe, ist vielen nicht bekannt. Unter [www.kuestenschutzbedarf.de](http://www.kuestenschutzbedarf.de) erfahren Nutzer auf einer interaktiven Karte (Abb. K.3), ob ihr Wohngebiet heute durch Küstenschutzmaßnahmen vor Sturmfluten geschützt wird, oder ob dies aufgrund des Klimawandels künftig nötig werden könnte. Wohngebiete und einzelne Regionen können über Postleitzahlen oder durch eine Zoomfunktion ausgewählt werden. Bis Ende des 21. Jahrhunderts können hohe Sturmfluten in der Nordsee durch den Meeresspiegelanstieg und durch ein möglicherweise verändertes Windklima bis zu 1,10 Meter höher auflaufen, als beispielsweise die Sturmflut im Februar 1962. Bei solch hohen Wasserständen würde sich das vor Nordseesturmfluten zu schützende Gebiet von derzeit etwa 10.800 Quadratkilometern um etwa zehn Prozent vergrößern. Entscheidend für die Wirksamkeit des Küstenschutzes sind flexible Schutzstrategien, die unter Beteiligung und Information der Bevölkerung geplant und umgesetzt werden müssen.

**Handbuch Ostseeküste im Klimawandel**

Ergebnisse einer Umfrage bei Akteuren aus Politik und Verwaltung an der deutschen Ostseeküste im Sommer 2011 haben den hohen Bedarf an wissenschaftlich fundierten Informationen in verständlich aufbereiteter Form verdeutlicht. Mit einem neuen Handbuch zum Thema „Ostseeküste im Klimawandel“ reagieren das Norddeutsche Klimabüro zusammen mit dem internationalen BALTIX - Sekretariat des Helmholtz Zentrums

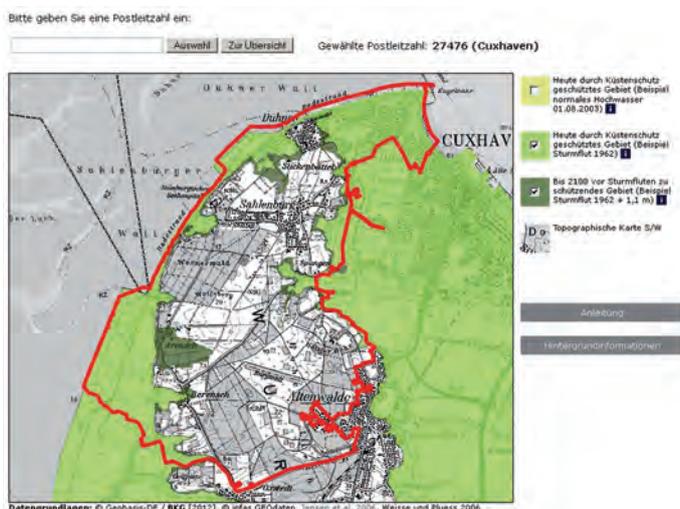


Abb. K.3: Auszug aus der interaktiven Karte zur Simulation des derzeitigen Küstenschutzes am Beispiel Cuxhaven, [www.kuestenschutzbedarf.de](http://www.kuestenschutzbedarf.de). (Grafik: Insa Meinke, HZG)

Geesthacht auf diesen Bedarf und stellen mit dem Handbuch wissenschaftlich konsolidierte Ergebnisse in verständlich aufbereiteter Form kostenlos zur Verfügung (Abb. K.4). Inhaltlich basiert das Handbuch auf dem regionalen Sachstandsbericht zum Klimawandel im Ostseeraum (BACC – Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin) und Informationsangeboten des Norddeutschen Klimabüros. Das Handbuch enthält die wichtigsten Forschungsergebnisse der vergangenen Jahrzehnte aus dem Ostseeraum, wobei die Aussagen so weit wie möglich auf die deutsche Ostseeküste bezogen werden.



Abb. K.4: Cover Ostseeküste im Klimawandel – Ein Handbuch zum Forschungsstand

# Mitteldeutsches Klimabüro

## *Dialog mit regionalen Akteuren zu Klimafolgen und Anpassung*

Der Dialog mit regionalen Akteuren und Entscheidungsträgern steht im Mittelpunkt der Arbeiten des Mitteldeutschen Klimabüros am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Hier findet sich Kompetenz in den Bereichen Klimafolgen sowie Anpassung. Im Bereich der Klimafolgen fokussiert das Klimabüro auf die Themen Wasserqualität und -quantität, Biodiversität und Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft. Ein besonderes Augenmerk wird zudem auf die Interaktion und Prozesse zwischen Landoberfläche und Atmosphäre auf der regionalen Skala gelegt, was auch Schwerpunkt von REKLIM-Thema 4 ist.

Die Übersetzung des überwiegend naturwissenschaftlichen Wissens in die Gesellschaft wird durch die sozio-ökonomische Anpassungsforschung (REKLIM-Thema 7) am UFZ gestützt und am Klimabüro durch zahlreiche öffentliche Veranstaltungen umgesetzt. Der Dialog mit der Gesellschaft findet mit sehr



unterschiedlichem Zielpublikum statt. Ein Schwerpunktthema des letzten Jahres war „Hitze in der Stadt“, das 2012 in zwei großen Veranstaltungen diskutiert wurde. Im Januar fand im Rahmen der Veranstaltungsreihe „Stadtgespräche“ eine Podiumsdiskussion unter dem Titel „Stadtklima Leipzig – dem Wandel entgegen“ statt. Darin wurden die Themen Stadtklima, mögliche Maßnahmen (Abb. K.5) zur städtebaulichen Anpassung und Energieeffizienz diskutiert. Die Eröffnung des fachlichen Teils wurde durch das Mitteldeutsche Klimabüro vorgenommen. Im Anschluss fand ein reger Austausch zu Klimafolgen und Anpassungsstrategien sowohl mit Raumplanern, Architekten und politischen Entscheidungsträgern statt. Auf Einladung der Friedrich Ebert Stiftung wurde das Thema Regionaler Klimawandel insbesondere mit einem Fokus auf Chancen und Risiken für die regionale Wirtschaft diskutiert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Anfragen an das Klimabüro lag wiederum im Bereich des Wasserhaushaltes. Unter anderem wurde mit der Landesdirektion Leipzig das Zusammenspiel von Klimawandel und Grundwasser in Mitteldeutschland erörtert. Die besondere Herausforderung für die Planung liegt hier im Zusammentreffen des durch das Ende des Braunkohletagebaus bedingten, steigenden Grundwasserpegels und dem durch die Klimaänderung entgegenwirkend, sinkenden Grundwasserpegel aufgrund von verstärkter Grundwasserentnahme für Bewässerung und die verstärkte Verdunstung von Oberflächenwasser.

Im März 2012 waren die Mitglieder der ressort- und fachübergreifenden Arbeitsgruppe „Klimawandel“ des Landes Sachsen-Anhalt, in der das Mitteldeutsche Klimabüro für das Helmholtz Zentrum für Umweltforschung vertreten ist, zu einer gemeinsamen Sitzung in Leipzig zu Gast. In der AG sind neben Landesministerien und deren nachgeordneten Behörden und Einrichtungen auch Forschungseinrichtungen vertreten. Die fachliche Begleitung der Anpassungsstrategie des Landes steht im Mittelpunkt der Arbeiten unter Federführung des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt.

*Abb. K.5: Fassadenbegrünung kann zur Kühlung in der Stadt beitragen. (Foto: Andreas Marx, UFZ)*

# Süddeutsches Klimabüro

## Regionale Klimamodellierung und Extremereignisse mit Fokus auf dem süddeutschen Raum

Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts dar, und die Entscheidungsträger auf internationaler, nationaler sowie regionaler Ebene benötigen fundierte und zugleich spezifische und verständliche Informationen über mögliche Klimaänderungen. Damit steigt auch der Kommunikationsbedarf zwischen Klimawissenschaftlern und den verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen.

Das Süddeutsche Klimabüro am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vermittelt zwischen Klimaforschung und Gesellschaft und stellt für Medien, öffentliche Organisationen sowie Entscheidungsträger aus Wirtschaft und Politik wissenschaftliche Informationen zu Klima und den Auswirkungen des regionalen Klimawandels bereit (Abb. K.6). Dabei wird auf Forschungsergebnisse und die Expertise des KIT-Zentrums „Klima und Umwelt“, dem auch das Süddeutsche Klimabüro angehört, sowie weiterer Institute des KIT und anderer Einrichtungen im süddeutschen Raum zurückgegriffen.

Der Dialog mit der Gesellschaft kann dabei Informationsbedarf, insbesondere in Bezug auf regionale Klimaänderungen ermitteln und diese an die Forschungseinrichtungen kommunizieren. Darüber hinaus stößt das Süddeutsche Klimabüro Kooperationen mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen an und initiiert interdisziplinäre Projekte.

Aktuelle Arbeiten am Süddeutschen Klimabüro beschäftigen sich mit dem Zusammenhang von Klimaforschung und Bauwesen sowie dem direkten Klimaeinfluss auf die Landwirtschaft. Zum ersten Thema wurde in Oktober letzten Jahres die internationale Konferenz „Climate and Constructions“ organisiert, die von knapp 80 Experten aus über 20 Nationen weltweit besucht wurde (Abb. K.7). Im Bereich Bauwesen betreffen Klimaänderungen unter anderem die Bereiche Bauchemie, Materialwissenschaft, Bauphysik und Baustofftechnologie sowie Stadtklima. Die Langfassungen der über 30 Beiträge



Abb. K.7: Teilnehmer der internationalen Konferenz „Climate and Constructions“ in Karlsruhe, Oktober 2011. (Foto: Sandra Göttisheim)

sind in einem 370-seitigen Konferenzband zusammengefasst. Als Ergebnis dieser Konferenz wurde der Austausch zwischen Klimaforschung und Bauwesen gestärkt und wird in mehreren Anträgen und Forschungsprojekten intensiviert.

Beim Thema Landwirtschaft ist das Projekt „Bodenabtrag durch Wassererosion als Folge von Klimaveränderungen“ in der zweiten, dreijährigen Phase. Hierbei steht die Kopplung zwischen dem Klimamodell COSMO-CLM und dem Bodenerosionsmodell LISEM im Vordergrund, um den direkten Einfluss von Niederschlagsereignissen auf die Bodenerosionsraten für Vergangenheit und Zukunft abschätzen zu können.

Für die Beschreibung des Klimas der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft sind qualitativ hochwertige Messungen an möglichst vielen Stationen über einen möglichst langen Zeitraum unabdingbar. In diesem Rahmen konnte das Projekt „Bestandsaufnahme von klimatologischen Messdaten für Baden-Württemberg und Erstellung einer Metadatenbank“ Anfang 2012 erfolgreich abgeschlossen werden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeiten am Süddeutschen Klimabüro ist der Aufbau eines Netzwerks innerhalb sowie außerhalb der Klimawissenschaften. Neben dem Netzwerk der Regionalen Helmholtz-Klimabüros bestehen Kontakte zu u.a. dem Deutschen Klimakonsortium e.V. (DKK), dem Climate Service Center (CSC) und dem Deutschen Wetterdienst (DWD), die die nationale Einbindung des Süddeutschen Klimabüros hervorheben. Die klimarelevanten Themen sind vielfältig. Sie reichen von grundlegender Klimaforschung bis hin zur Anpassungsforschung an den Klimawandel.



Abb. K.6: Auftritt des Süddeutschen Klimabüros auf dem Extremwetterkongress in Hamburg, März 2012. (Foto: Hans Schipper, KIT)

## Ausblick

Mit dem Jahreswechsel 2011/2012 hat die Weltbevölkerung die 7 Milliarden Grenze überschritten und die Menschheit geht im 21. Jahrhundert einem sich wandelnden Planeten und veränderten Klimabedingungen entgegen. Der zunehmende Energiebedarf und die Versorgungsnotwendigkeit der Weltbevölkerung haben einen weiter verstärkten Eingriff in die Ressourcen und Umwelt der Erde zur Folge, was diesen Wandel weiter beschleunigt. Die CO<sub>2</sub>-Emission, hauptsächlich hervorgerufen durch die Landnutzung und Verbrennung fossiler Energieträger (durch Verkehr, Heizen, Stromerzeugung, Industrie etc.) steigen ungebremst weiter und bewegen sich entlang des „worst-case“ Szenarios des im Jahr 2007 erschienen letzten Sachstandsberichts des IPCC, der für dieses Szenario einen Temperaturanstieg von 4 - 6 °C für das Jahr 2100 projiziert.

Aus diesem Grund sind das Wissen um die Ursachen von Klimaänderungen und deren Wechselwirkungen im Klimasystem (z.B. von Verstärkungsmechanismen), sowie deren regionale

Auswirkungen von besonderer Bedeutung. Denn die nachhaltige Nutzung des sich wandelnden Planeten kann nur gelingen, wenn einerseits die Verletzlichkeiten des Klima- und Ökosystems bekannt sind, andererseits den Anforderungen einer weiter zunehmenden Weltbevölkerung (Projektion von etwa 10 Milliarden Menschen bis 2100) Rechnung getragen werden können.

Die Arbeiten des Helmholtz-Verbunds REKLIM tragen daher in großem Maße zu diesem Erkenntnisgewinn bei und können so Hilfestellung und konkrete Maßnahmen zur Verhinderung und Anpassung an Klimawandel bereitstellen. Der Dialog zur Gesellschaft, den betroffenen Interessensgruppen sowie den Entscheidungsträgern geschieht über jährliche Informationsschriften, wie dem vorliegenden Newsletter, und über öffentliche Regionalkonferenzen, die bisher in Karlsruhe (2010), in Leipzig (2011) und in diesem Jahr in Potsdam stattfinden und so den Wissenstransfer ermöglichen.

# 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 Käßbohrer, 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 28: Benjamin Creutzfeld.

## Referenzen:

- Beck, S. 2012: The challenges of building cosmopolitan climate expertise - with reference to Germany. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*, Vol. 3/1, 1-17.
- Bubeck, P., W.J.W.J. Botzen, H. Kreibich, and J.C.J.H. Aerts, 2012: Long-term development and effectiveness of private flood mitigation measures: An analysis for the German part of the Rhine. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (submitted).
- Dorn, W., K. Dethloff, and A. Rinke, 2012: Limitations of a coupled regional climate model in the reproduction of the observed Arctic sea-ice retreat. *The Cryosphere Discuss.*, 6, 1269-1306, doi:10.5194/tcd-6-1269-2012.
- Gebhardt, O., M. Brenck und V. Meyer, 2011: Investitionsbedarf und gesellschaftliche Rentabilität von Klimaanpassungsmaßnahmen in Städten, Zwischenbericht zur Expertise 4 des Forschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau“ (ExWoSt). Forschungsschwerpunkt I: Kommunale Strategien und Potenziale; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig.
- Glemarec, Y., 2011: *Catalysing Climate Finance, A Guidebook on policy and financing options to support green, low-emission and climate-resilient development*. New York: United Nations Development Programme, 148pp.
- Hulme and 26 co-authors, 2011: Science-Policy Interface: Beyond Assessments. *Science*, 333 (6043), 697-698, doi:10.1126/science.333.6043.697
- Hoose, C. and O. Möhler, 2012: Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss.*, 12, 12531-12621, doi:10.5194/acpd-12-12531-2012.
- Junkermann, W., B. Vogel, and M. A. Sutton, 2011: The climate penalty for clean fossil fuel combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 12917-12924.
- Kreibich, H., S. Christenberger, and R. Schwarze, 2011: Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 (2), 309-321.
- Lahoz, W. A. and 10 co-authors, 2012: Monitoring Air Quality from Space: The Case for the Geostationary Platform. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 221-233.
- Markantonis, V., V. Meyer, and R. Schwarze, 2012: Valuating the intangible effects of natural hazards – review and analysis of the costing methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (5), 1633–1640, doi:10.5194/nhess-12-1633-2012.
- Ratter, B.M.W., K.H.I. Philipp, and H. von Storch, 2012: Between hype and decline: recent trends in public perception of climate change. *Environmental Science and Policy*, 15 (1), 3-8, doi:10.1016/j.envsci.2011.12.007.
- Schädler, G. and 9 co-authors, 2012: Flood Hazards in a Changing Climate. CEDIM Project Report, January 2012. ([http://www.cedim.de/download/Flood\\_Hazards\\_in\\_a\\_Changing\\_Climate.pdf](http://www.cedim.de/download/Flood_Hazards_in_a_Changing_Climate.pdf)).
- Schäfer, K. and 23 co-authors, 2011: Influences of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic plume on air quality in the northern Alpine region. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 8555-8575.
- Schmidt, T., J. Wickert, and A. Haser, 2010: Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures. *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2010.01.021.
- Solazzo, E. and 35 co-authors, 2012: Model evaluation and ensemble modelling of surface-level ozone in Europe and North America in the context of AQMEII. *Atmospheric Environment*, 53, 60-74.

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

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungszentrum Jülich

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](http://www.reklim.de)

