

# REKLIM

Helmholtz-Verbund  
Regionale Klimaänderungen

Regionale Klimaänderungen – Ursachen und Folgen

## NEWSLETTER

Nr. 1 | September 2011



HELMHOLTZ  
| GEMEINSCHAFT

HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL

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



# Herausforderung Klimawandel

## Klimaforschung im Verbund

Die globale Erwärmung hat für einzelne Regionen der Erde ganz unterschiedliche Folgen. Helmholtz-Forscherinnen und Forscher untersuchen solche regionalen Klimaänderungen und liefern damit die Grundlage für Anpassungs- und Vermeidungsstrategien.

Die Menschheit ist im Begriff, das Klima der Erde drastisch zu verändern. In den letzten hundert Jahren hat sich der Planet zwar erst um weniger als ein Grad Celsius erwärmt. Doch die Folgen sind bereits unübersehbar: Weltweit ziehen sich fast alle Gletscher rasch zurück. Das Meereis in der Arktis ist während der letzten 30 Jahre um knapp ein Drittel geschrumpft. Der Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert um knapp 20 Zentimeter gestiegen. Der Weltklimarat (IPCC) geht von einer weiteren Erwärmung um vier bis sechs Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts aus, falls der Ausstoß von Treibhausgasen unvermindert anhält. Eine derart drastische und plötzliche Erwärmung wäre einmalig in der Geschichte der Menschheit.

Mit Klimaschwankungen musste der Mensch jedoch schon immer fertig werden: Als die Sahara von einer grünen Savanne zur Wüste wurde, als die Eisschilde über Europa ihre größte Ausdehnung erreichten oder als die Landbrücke an der Beringstraße im Meer versank, verließen Menschen die unbewohnbar gewordenen Gegenden. Auch heute leiden nicht alle Regionen gleich stark unter dem Klimawandel. Die Polargebiete

erwärmen sich beispielsweise stärker als die Tropen. Manche Regionen werden vermehrt von Dürren heimgesucht, in anderen nehmen die Niederschläge zu. Selbst der Anstieg des Meeresspiegels kann von Region zu Region ganz unterschiedlich ausfallen. Diese regionalen Folgen des Klimawandels sind bisher weniger gut verstanden als die globale Entwicklung.

Der Helmholtz-Verbund REKLIM befasst sich seit 2009 mit verschiedensten Aspekten des Themas regionaler Klimawandel (siehe REKLIM-Broschüre 2010) und untersucht die regionalen und lokalen Wechselwirkungen und Mechanismen im Klimasystem mit detaillierten Beobachtungen, Prozessstudien und gekoppelten, regionalen Modellsimulationen. Als Ergänzung dazu hat die Helmholtz-Gemeinschaft im Rahmen der Portfolioentwicklung nun drei weitere wichtige Forschungsfelder zum Thema „Regionaler Klimawandel: Ursachen und Folgen“ identifiziert, die bislang noch nicht abgedeckt waren und in Zusammenarbeit mit universitären Partnern bearbeitet werden. Dabei handelt es sich um die Themen „Schnelle Klimaänderungen“, „Klimawandel, Luftqualität und Gesundheit“ sowie um die „Anpassung an Klimarisiken“.

Mit dem Newsletter 2011 wollen wir einzelne Aspekte der innerhalb der bisherigen REKLIM-Themen bereits erzielten Ergebnisse präsentieren sowie die neuen Themengebiete vorstellen.

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, 2011

### 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),  
Prof. Dr. Hans von Storch (HZG)

Thema 7: Prof. Dr. Bernd Hansjürgens (UFZ),  
Prof. Dr. Reimund Schwarze (HZG/UFZ)

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)

### Gestaltung:

© KLEMM BREMEN.DE

Koordinierungsstelle REKLIM

### Druck:

druckpartner hemmoor GmbH & Co. KG

www.druckpartner-hemmoor.de

Diese Broschüre wurde auf Papier aus nachhaltiger  
Waldbewirtschaftung gedruckt.



HelmholtzZentrum münchen  
Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt



# 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

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen im Klimasystem, seiner natürlichen Variabilität sowie der anthropogenen Einflüsse werden hochaufgelöste gekoppelte Klimamodelle für die Anwendung auf der regionalen Skala, sogenannte regionale Erdsystemmodelle (RESM) entwickelt, die im Rahmen von REKLIM auf einzelne Regionen in der Art eines Vergrößerungsglases angewendet werden und es somit erlauben, regionale Klimadaten mit hoher räumlicher Auflösung zu erzeugen.

Die regionalen Erdsystemmodelle bestehen aus Atmosphärenmodellen hoher Auflösung und Modellen für Ozean, Meereis, Landoberfläche, Boden, Aerosolchemie, Vegetation und weiteren Komponenten. Die Modelle basieren auf mathematisch-physikalischen Grundgleichungen in hydrostatischen oder nichthydrostatischen Näherungen und parametrisierten Prozessbeschreibungen, die durch Vergleich mit Daten aufwändig validiert werden müssen.

Das Alfred-Wegener-Institut in der Helmholtz Gemeinschaft (AWI) fokussiert auf RESM in der Arktis, das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) entwickelt diese für Nordeuropa und Deutschland. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) legen den Schwerpunkt ihrer Entwicklung auf Mitteleuropa und Deutschland. Die Kooperation zwischen den Zentren erfolgt besonders intensiv in den Bereichen der Modellkopplung und der Landoberflächen- und Bodenmodelle.

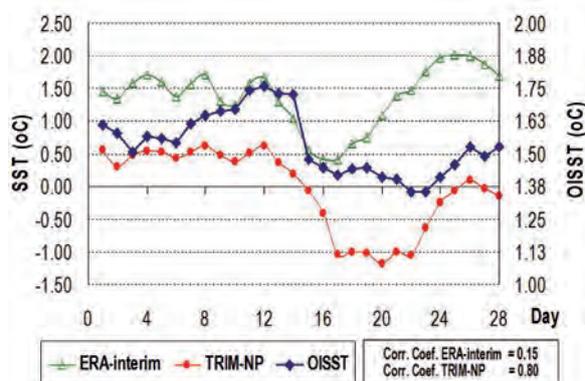


Abb. 1.1: Tagesmittel der Meeresoberflächentemperatur der Ostsee im Februar 1997. Blau: Meeresoberflächentemperatur NOAA Analysen (OISST), Grün: Abweichung der globalen Atmosphärenreanalyse von OISST, Rot: Abweichung der Rechnungen des Modells TRIM-NP. (Grafik: HZG)

## Rückkopplungen im Klimasystem

Mit dem gekoppelten regionalen Klimamodell HIRHAM-NAOSIM wurden 6 Ensemble-Simulationen für die Periode 1948 - 2008 durchgeführt. Eine realistische Simulation der atmosphärischen Zirkulation ist notwendig, um die beobachtete sommerliche Eisausdehnung in der Arktis zu reproduzieren. Interne atmosphärische Variabilität spielt im Sommer eine sehr wichtige Rolle. Vegetationsbedeckung, Bodenparameter und Gefrier- und Tauprozesse im Boden beeinflussen die Lufttemperatur und rufen dynamische Rückkopplungen auf die atmosphärische Zirkulation hervor. Das atmosphärische Säulenmodell HIRHAM5-SCM wurde verwendet, um Sensitivitätsstudien zur arktischen Wolkenbedeckung durchzuführen und daraus den Einfluss von veränderten Modellparametern quantifizieren zu können.

Um Mechanismen der Meereisdrift, der ozeanischen Zirkulation und ihrer Veränderung infolge der globalen Erwärmung im Arktischen Ozean zu untersuchen, wird das Datenassimilationssystem NAOSIM-DAS (North Atlantic-Arctic Ocean Sea Ice Model Data Assimilation System) entwickelt. Meereisdriftdaten aus Satellitenmessungen sind besonders wichtig, da diese die gesamte Arktis in guter Zeitauflösung abdecken. Es konnte gezeigt werden, dass der Beitrag der Eisdriftdaten nicht nur für die Meereisverteilung sondern auch für die Ozeanzirkulation bedeutsam ist. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass Projektionen zukünftiger Meereisverteilungen realistische Verteilungen der Atlantischen Wasserzirkulation im tiefen Ozean erfordern.

Das regionale Atmosphärenmodell COSMO-CLM wurde mit dem regionalen Ozeanmodell TRIM-NP für die Nord- und Ostsee gekoppelt. Hierfür wurde ein spezieller Koppler (OASIS3) verwendet, mit welchem in Zukunft auch die Einbindung weiterer Komponenten (wie z.B. ein Meereismodell) möglich ist. Für die erste Version des kombinierten Systems wird das COSMO-CLM mit einer Gitterweite von 50 km über ganz Europa gerechnet und TRIM-NP mit einer Gitterweite von 13 km über der Nord- und Ostsee. Das COSMO-CLM berechnet den Bodendruck, Wolkenbedeckungsgrad, bodennahe Windfelder, Feuchte und Temperatur und gibt diese über den Koppler an TRIM-NP weiter, das die errechnete Temperatur der Meeresoberfläche über OASIS zurück an das COSMO-CLM übergibt. Eine erste Einschätzung der Ergebnisse (Abb. 1.1) aus den gekoppelten Modellläufen für den Februar 1997 liefert ermutigende Ergebnisse.

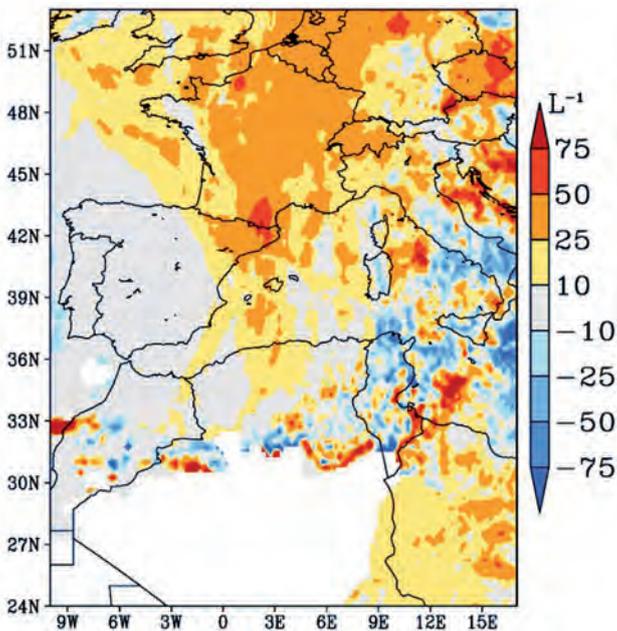
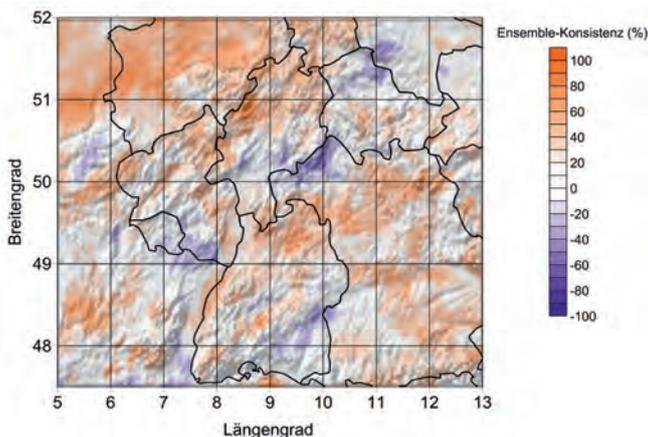


Abb. 1.2: Simulierte mittlere Differenz der Anzahldichten von Eisparkeln, die sich auf Grund des Vorhandenseins von Mineralstaub einstellt. Betrachtet wird der Zeitraum 26. - 29. Mai 2008. (Grafik: KIT)

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

Das Modellsystem COSMO-ART wurde bezüglich der Behandlung der Wechselwirkung zwischen Aerosolpartikeln und Wolken weiterentwickelt. In einer ersten Studie wurde für einen sich im Mai 2008 ereigneten Saharastaubausbruch die Anzahl der Eiskeime, basierend auf berechneten Staubverteilungen über Europa, simuliert. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Staubkonzentrationen. Quantitativ ergeben sich bei Verwendung unterschiedlicher Parametrisierungen der Eiskeimkonzentration erhebliche Unterschiede, was auf die zurzeit noch vorhandenen Unsicherheiten hindeutet. In einer zweiten Studie wurde ebenfalls für diese Episode der Einfluss von Mineralstaubpartikeln und anthropogenen Aerosolpartikeln auf die Wolkenbildung quantifiziert. Auch hier konnte ein deutlicher Einfluss des Mineralstaubes auf die mikrophysikalische Beschaffenheit der vorhandenen Bewölkung nachgewiesen werden (Abb. 1.2).



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

Um die räumliche Heterogenität und die physiographischen Eigenschaften bestimmter Regionen besser darstellen zu können, wurde ein Verfahren der Parameter-Optimierung für Landoberflächen-Modelle entwickelt, wie sie auch in Klimamodellen zum Einsatz kommen. Diese konzentriert sich dabei auf das Community Land Model (CLM), das in zwei der regionalen Klimamodelle von REKLIM verwendet werden kann. Das Modell wird gegen eine globale Eddy-Kovarianz-Datenbank für Energie-, Wasser- und CO<sub>2</sub>-Flüsse optimiert. Das Konzept führt eine Reduzierung des Parameterraums mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse durch. Des Weiteren wurde ein neues Bodenschema entwickelt, das den gekoppelten Energie- und Wasserfluss berechnet. Dies ist besonders wichtig in trockeneren Gebieten wie der australischen Savanne, wo der Wasserverlust über Flüssigwassertransport nicht ausreicht, um die Beobachtungen zu erklären. Der Boden kann über den Transport von Wasserdampf in der Bodenmatrix noch weiter austrocknen. Das Modell kann neben den normalen Wasserflüssen auch den Fluss von Tracern im Wasser berechnen, wie z.B. von stabilen Wasserisotopen. Am KIT wird der Einfluss zweier verschiedener Boden-Vegetations-Modelle auf die COSMO-CLM-Simulationen untersucht.

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

Auf der Basis eines mit verschiedenen globalen Klimamodellen (GCMs) angetriebenen, hoch aufgelösten Ensembles von COSMO-CLM-Simulationen wurden die räumlichen Strukturen in den Änderungssignalen des Niederschlags für die nächsten Jahrzehnte in Süddeutschland analysiert. Es zeigt sich, dass sich im Sommer die Änderungssignale für Extremniederschläge (Starkniederschläge, Trockenperioden) deutlich von denen des mittleren Niederschlags unterscheiden (Abb. 1.3). Neben verschiedenen Realisierungen mit dem GCM ECHAM5 wurden am KIT auch Simulationen auf der Basis des britischen Hadley-Center-Modells HadCM3 und dem kanadischen Globalmodell CCma3 durchgeführt, um das regionale Ensemble zu erweitern und die Änderungssignale der Temperatur, des Niederschlags und anderer relevanter Größen zuverlässig zu ermitteln.

Eine Möglichkeit, Unsicherheiten der regionalen Modellierung zu erfassen, besteht in kleinen Verschiebungen der atmosphärischen Felder gegenüber der Topographie. Das sich so ergebende Ensemble soll am KIT genutzt werden, um Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit und die Variabilität von Extremereignissen im gegenwärtigen und zukünftigen Klima zu ziehen.

Abb. 1.3: Regionale Änderungen [in %] des 10-jährigen Wiederkehrwerts der Starkniederschläge (RV10) in den nächsten Jahrzehnten (2011 - 2040 zu 1971 - 2000) - Konsistenz der Änderungssignale in einem Ensemble aus Simulationen mit COSMO-CLM. Rot (bis +100%): die überwiegende Zahl der Simulationen zeigt einen Anstieg von RV10; blau (bis -100%): überwiegend Abnahme von RV10; weiß: unsichere Ergebnisse. (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 großen Eisschilde in Grönland und in der Antarktis stehen in enger Wechselwirkung mit dem globalen Klimasystem. Sie beeinflussen durch ihr Rückstrahlvermögen (Albedo) den atmosphärischen Strahlungshaushalt der Erde, verändern den Meeresspiegel durch ihren Schmelzwassereintrag und beeinflussen durch die Einleitung von Frischwasser die thermohaline Zirkulation im Ozean. Satellitenbeobachtungen haben eine zunehmend negative Massenbilanz für das Grönlandeis seit den späten 1990ern belegt: Eine negative Massenbilanz herrscht vor, wenn mehr Eismasse durch Schmelzen und Gletscherkalben an den Rändern des Eisschildes verloren geht, als durch Schneefall in den zentralen Hochlagen hinzukommt. Für das letzte Jahrzehnt wird dem grönländischen Eisschild ein Beitrag von etwa 0,7 mm/Jahr am globalen Meeresspiegelanstieg von etwa 3,1 +/- 0,6 mm/Jahr zugeschrieben. Die Massenverluste stehen im Einklang mit gegenwärtigen Rekordwerten von Oberflächentemperatur, Schmelzfläche und verringerter Ausdehnung von Meereis in und um Grönland seit 30 Jahren.

## Eismassenbilanz

Die Satellitenmission GRACE ermöglicht es seit dem Jahr 2002 die Massenbilanz der beiden Eisschilde regional genau

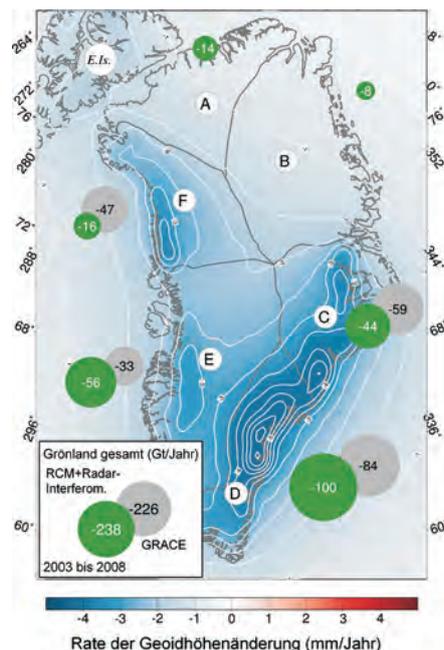


Abb. 2.1: Rate der regionalen Eismassenänderung in Grönland in Gigatonnen/Jahr zwischen 2003 und 2008. GRACE-Daten (grau); Summe der Anomalien in der Oberflächenmassenbilanz von einem regionalen Klimamodell (RCM) und Anomalien im Ausfluss der Gletscher und Eisströme aus Daten der Radar-Interferometrie (grün). GRACE-Trends in Region A und B sind statistisch nicht signifikant. (Grafik: Ingo Sasgen, GFZ)

zu quantifizieren. Dazu messen zwei Satelliten im Tandemflug kleinste Veränderungen der Anziehungskraft der Erde, die beispielsweise durch den Abfluss von Eis in den Ozean entstehen. Innerhalb von REKLIM konnte gezeigt werden, dass vor allem im Südosten und Nordwesten Grönlands starke Massenverluste zu verzeichnen sind (Abb. 2.1). Dabei spielen sowohl erhöhte Fließgeschwindigkeiten der Gletscher und Eisströme, als auch höhere Schmelzraten eine Rolle, was durch einen Vergleich mit Daten der Radar-Interferometrie bzw. einem regionalen Klimamodell gezeigt werden konnte. Bezogen auf das Mittel der Jahre 1961 bis 1990, hat für das grönländische Eisschild die Schmelzrate um etwa 62 % und die Kalbungsrate um etwa 23 % zugenommen. Beide Prozesse sind also entscheidend für den mit GRACE beobachteten Massenverlust von -226 +/- 22 Gigatonnen/Jahr zwischen 2003 und 2008.

## Globale Meeresspiegeländerung

Untersuchungen zur Ausbreitung von Schmelzwasserabflüssen des grönländischen Inlandeises und zum Einfluss auf die Meeresspiegelhöhe und Ozeanzirkulation können am besten mit Ozeanmodellen höher Auflösung durchgeführt werden, die einerseits die Wirbeltransporte richtig wiedergeben, andererseits sowohl den nördlichen Nordatlantik als auch die Küstenregion Grönlands in hoher Auflösung repräsentieren. Hierfür eignet sich die Verwendung unstrukturierter Modellgitter, die eine variable regionale Modellauflösung ermöglichen. Die Arbeiten des Alfred-Wegener-Instituts nutzen diese Methode zur Untersuchung von Schmelzwasserabflussszenarien des grönländischen Inlandeises mit dem Finite Elemente Meereis-Ozean-Modell (FESOM). Hierfür wurde das Ozeanmodell mit vorgeschriebenem atmosphärischem Antrieb verwendet und Szenarienläufe mit einem Süßwasserabfluss von 100.000 m<sup>3</sup>/s (0,1 Sv) entlang der grönländischen Küste südlich von 76° Nord durchgeführt. Diese Schmelzrate entspricht üblichen Werten vergleichbarer Studien, übersteigt das derzeit beobachtete Signal jedoch um mehr als das 10-fache. Die Simulationen zeigen, dass sich der meridionale Massen-

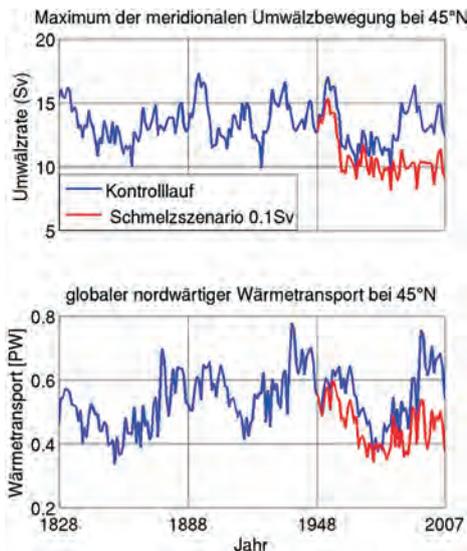


Abb. 2.2: (oben) Die blaue Kurve zeigt das Maximum der meridionalen Umwälzbewegung für drei Simulationszeiträume bei 45°N. Die rote Kurve stellt die Rate der Umwälzbewegung unter Berücksichtigung von grönländischem Schmelzwassereintrag dar. (unten) Variabilität des nordwärtigen Wärmetransportes für die unterschiedlichen Szenarien. (Grafik: AWI)

transport signifikant abschwächt und demzufolge weniger Wärme durch den Nordatlantikstrom nach Norden transportiert wird (Abb. 2.2).

Seit Anfang der 1990er wird auch mit Radaraltimetersatelliten ein globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg von über 3 mm/Jahr beobachtet. Der Anstieg wird primär durch das Abschmelzen von Landeismassen und die Erwärmung des Ozeans verursacht, wobei die Beiträge je nach untersuchtem Zeitraum variieren. Lokal können Massenverlagerungen und Änderungen der Dichteschichtung, die mit Änderungen der Ozeanzirkulation einhergehen, die Werte um das Dreifache erhöhen oder in einigen Regionen sogar auch zu einem Absinken des Meeresspiegels beitragen. Um die Anteile von Massen- und Dichteänderungen an der Meeresspiegeländerung besser trennen zu können, wurden die gesamten Meereshöhenänderungen aus Radaraltimetrie-messungen mit den Variationen der Ozeanmasse aus GRACE-Daten verglichen. Zeitgleich wurden Temperatur und Salzgehalt in den oberen 2000 m des Ozeans von dem globalen Netz autonomer Driftkörper im internationalen Projekt ARGO gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass über den Zeitraum von gut 8 Jahren (August 2002 bis Dezem-

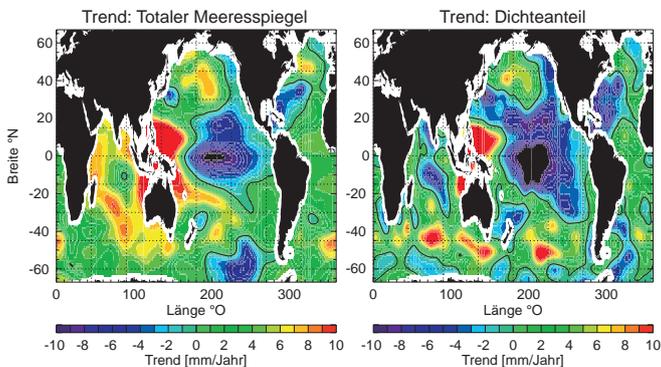


Abb. 2.3: Trend des Meeresspiegels für den Zeitraum August 2002 bis Dezember 2010 berechnet aus Jason-1 und Jason-2 Satellitenaltimetrie (links: Massen- und Dichteanteile) und Daten des globalen ARGO-Netztes (rechts: nur Dichteanteil). (Grafik: Saskia Esselborn, GFZ)

ber 2010) die räumlichen Muster des globalen Meeresspiegels aus Radaraltimetrie gut mit den aus ARGO-Daten geschätzten Dichteänderungen übereinstimmen (Abb. 2.3).

Neben der Änderung in der Ozeanzirkulation führt auch die Anpassung der Erdoberfläche an die vergangene Auflast eiszeitlicher Eisschilde zu einer regionalen Meeresspiegeländerung. Diese glazial-isostatische Anpassung (GIA) ist ein über Jahrhunderte währender Prozess und verursacht vor allem in Nordamerika und Europa regionale Trends im Meeresspiegelanstieg von mehreren Millimetern pro Jahr. Innerhalb von REKLIM werden numerische Modelle der GIA und der Dynamik der großen Eisschilde gekoppelt, um auch den Einfluss der Erddeformationen auf die gegenwärtige Meeresspiegeländerung genauer zu quantifizieren.

### Regionale Auswirkungen

Denn gerade die regionalen Änderungen vor Ort sind für die in Küstenregionen lebende Bevölkerung die ausschlaggebenden Größen und weniger der globale mittlere Meeresspiegelanstieg. Anhand von Pegeldaten wurden daher exemplarisch die Veränderungen in der Deutschen Bucht untersucht. In Albrecht et al. (2011) wurde eine Zeitreihe erstellt, die den Meeresspiegel der Deutschen Bucht für den Zeitraum 1924 bis 2008 wiedergibt. Der durchschnittliche Anstieg über den gesamten Zeitraum beträgt hier 1,7mm/Jahr. Anhand dieser Kurve wurde unter anderem untersucht, ob es in der jüngeren Vergangenheit einen besonders starken Anstieg gegeben hat. Dies konnte jedoch nicht festgestellt werden. Zwar ist der Anstieg momentan relativ hoch, aber vergleichbare Anstiege hat es auch schon in früheren Jahrzehnten gegeben. In unserer aktuellen Arbeit interessiert uns daher, durch welche großräumigen Faktoren sich der regionale Meeresspiegel der Deutschen Bucht beschreiben lässt. Der Ansatz basiert auf einem statistischen Modell, das diesen Zusammenhang beschreibt und mit dem Vorhersagen für den zukünftigen regionalen Meeresspiegel gemacht werden können. Abbildung 2.4 zeigt erste Ergebnisse dieser Untersuchungen. Der regionale Meeresspiegel in der Deutschen Bucht wurde mit Hilfe des Luftdrucks über dem Nordatlantik und des Meeresspiegels des Nordostatlantiks rekonstruiert. Hier sind sowohl die jährlichen Schwankungen als auch der mittlere Meeresspiegelanstieg gut wiedergegeben.

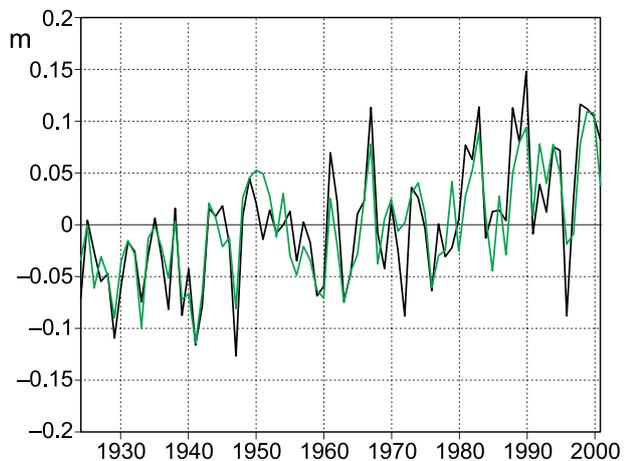


Abb. 2.4: Berechneter regionaler Meeresspiegel der Deutschen Bucht (schwarz) und die Rekonstruktion mit Hilfe eines statistischen Modells aus dem Luftdruck des Nordatlantiks und dem Meeresspiegel des Nordostatlantiks (grün) für den Zeitraum 1924 bis 2001. (Grafik: Frauke Albrecht, HZG)

## 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?*

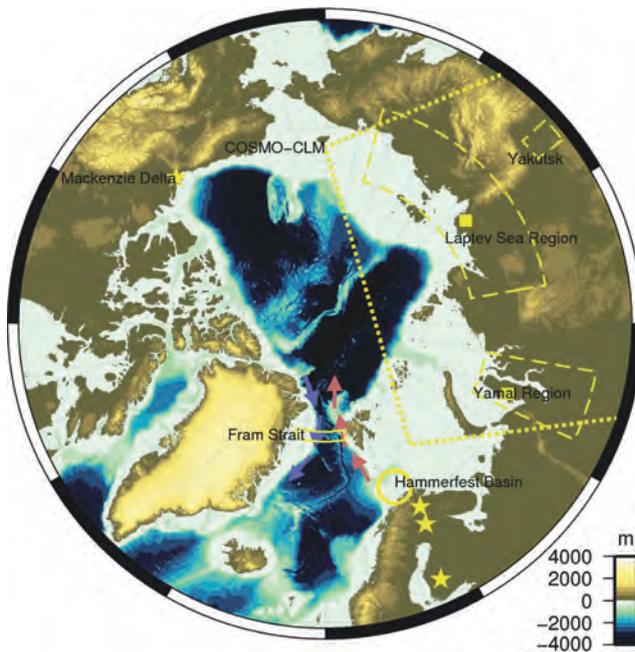


Abb. 3.1: Karte der Arktis mit allen Arbeitsgebieten. Im Ozean: Untersuchungen zur Erdgas-Leckage (gelber Kreis), ozeanographische Messungen (durchgezogene gelbe Linien). An Land: fluggestützte Messkampagnen (Sterne), Permafrostuntersuchung und Fernerkundungsanwendung (gestrichelte Linien), Simulationsgebiet des Atmosphärenmodells COSMO-CLM (gepunktete Linien). Die Pfeile in der Framstraße deuten den Einstrom von warmem (rot) Wasser aus dem Nordatlantik und den Ausstrom von kaltem (blau) Wasser an. (Grafik: Florian Greil, AWI)

Die polaren Regionen spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem der Erde. Die hohe Reflektivität des Meereises und der eis- und schneebedeckten Landflächen beeinflusst in großem Maße die Strahlungsbilanz der Erde. Für die Energie- und Stoffbilanz des arktischen Ozeans sind die Wechselwirkung mit der Atmosphäre und der Austausch mit dem angrenzenden Atlantik und Pazifik die beiden entscheidenden Faktoren. Wir untersuchen Energie-, Wasser- und Treibhausgasflüsse in mehreren Fokusgebieten in der Arktis (Abb. 3.1).

## Ozeanographische Messungen in der Framstraße

Der Einstrom von Atlantikwasser in den Arktischen Ozean erfolgt durch die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen und durch die flache Barentssee. Die Framstraße ist die einzige tiefe Verbindung zwischen Arktischem und Atlantischem Ozean. Warme, salzhaltige Wassermassen aus dem Nordatlantik strömen hier nach Norden, werden in der Arktis durch Meereseisbildung und Süßwasserzuflüsse von den großen nordeuropäischen Flusssystemen modifiziert und fließen östlich von Grönland in den Atlantik zurück. Seit 1997 existiert eine Linie

von am Meeresboden in unterschiedlichen Tiefen verankerten ozeanographischen Messgeräten. Auf diese Weise wird ganzjährig im Abstand von etwa 20 km Strömung und Temperatur innerhalb der Framstraße erfasst. Die Temperatur des in den arktischen Ozean einströmenden Atlantikwassers hängt stark von den Jahreszeiten ab. Dem überlagert ist ein positiver Trend von etwa einem Grad seit 1997 bis jetzt (Abb. 3.2). Zurzeit arbeiten wir an einer umfassenden statistischen Auswertung der Strömungsdaten zur Verbesserung unserer bestehenden Transportabschätzung, um den veränderten Wassermassenaustausch und damit den Wärmeeintrag in die Arktis besser quantifizieren zu können.

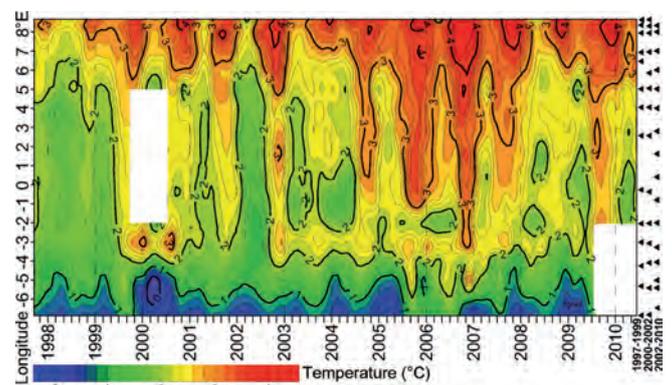


Abb. 3.2: Zeitliche Entwicklung (Hövmöllerdiagramm) der Temperatur in 250m Wassertiefe zwischen 6°West und 8°Ost in der Framstraße bei 78.8°N. Der Einstrom atlantischer Wassermassen geschieht im Osten der Framstraße und damit oben im Diagramm. Die Dreiecke rechts symbolisieren die Verankerungspositionen. (Grafik: Agnieszka Beszczynska-Möller, AWI)



Abb. 3.3: Kabinenansicht des Flugzeugs Polar 5 während der Kampagne AIRMETH-2011. Von vorne nach hinten sieht man das MAMap Elektronik-Rack, die Basisdatenerfassung und den in-situ-Methananalysator. (Foto: Torsten Sachs, GFZ)

### Feldmessungen, Fernerkundung und Klimamodellierung im Permafrost Sibiriens

Im Permafrostboden sind große Mengen an organischem Kohlenstoff gespeichert, welcher mikrobiell zu Methan umgesetzt werden kann. Auf der russisch-deutschen Forschungsstation Samoylov im Lenadelta (gelber Kasten in Abb. 3.1 in der Laptevsee) werden Messfelder für Energie-, Wasser- und Kohlenstoffflüsse betrieben. Mittels Luftkartierungen, Feldmessungen und -experimenten können so Parametrisierungen für Klima- und Permafrostmodelle verbessert werden. Im Projekt „Data User Element Permafrost“ werden außerdem, zusammen mit der Internationalen Permafrost Gesellschaft (IPA) und der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA), Fernerkundungsprodukte wie Feuchte, Temperatur, Oberflächenwasser und Methan für Permafrostgebiete entwickelt.

Diese Daten können dann für die Modellvalidierung des regionalen Klimamodells COSMO-CLM (COntorium for Small-scale Modelling, Climate Mode) verwendet werden. Das Modell wurde speziell für Sibirien angepasst, um für diese Region eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Klimarekonstruktion von 1950 bis 2010 zu erstellen. Verschiedene Testläufe und Sensitivitätsstudien wurden für den Zeitraum 1990-1999 durchgeführt. Die räumliche Auflösung soll beim endgültigen Rekonstruktionslauf 25 km für das gesamte Modellgebiet und 7 km für das Lena-Delta betragen. Als atmosphärischer Antrieb werden NCEP1-Reanalysen (National Centers for Environmental Prediction) verwendet.

### Flugzeuggestützte Methanmessungen – Systemtest in Finnland

Punktuelle Messungen von Treibhausgasen am Boden tragen zum Prozessverständnis und zum Verständnis der zeitlichen Variationen bei. Für eine umfassende Beurteilung der arktischen Treibhausgasemissionen sind jedoch großflächige, fluggestützte Messungen unerlässlich. Im Rahmen der Gemeinschaftskampagne AIRMETH-2011 (Airborne measurements of methane) von AWI, GFZ und Universität Bremen wurden erstmals das CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>-Spektrometersystem MAMap (Methane Airborne Mapper) sowie ein in das Forschungsflugzeug Polar 5 eingebauter, schneller Methansensor eingesetzt (Abb. 3.3). Die Kampagne fand im Juni 2011 über subarktischen Moorgebieten im Norden Finnlands statt. In Kombination mit den Turbulenzmessungen können so direkt und großräumig Methanflüsse aus diesen weitläufigen Feuchtgebieten bestimmt werden. Die Erkenntnisse dieser Kampagne werden zur Verfeinerung der Methodik und Messtechnik beitragen, damit schon bald die ersten Messungen über Permafrost- und Schelfgebieten in der Arktis durchgeführt werden können.

### Erdgas-Leckage in der Barentssee

Die Entstehung, Migration, Ansammlung und Leckage von Erdgas in einem Schelfgebiet Nordeuropas, dem Hammerfestbecken in der westlichen Barentssee, wurde in einem dreidimensionalen Beckenmodell rekonstruiert. Hierbei wurde auch die glaziale Geschichte dieser Region berücksichtigt. Unsere Simulationen deuten darauf hin, dass Gasleckage aus tiefen Reservoirstrukturen bevorzugt in den letzten 2,5 Millionen Jahren stattgefunden hat. Das Be- und Entlasten des Beckens mit bis zu 3 km dickem Eis führte demnach zu einem Gasausstrom durch destabilisierte Gashydrate in den Übergangszeiten von Eiszeit zu Warmzeit. Dieses Ergebnis wird sowohl von atmosphärischen Methankonzentrationsdaten aus grönländischen Eiskernen als auch von eigenen Untersuchungen an sogenannten „Pockmarks“ am Meeresboden gestützt (Abb. 3.4). Pockmarks sind kraterartige Vertiefungen am Meeresboden, die durch den Austritt von Gasen oder Flüssigkeiten entstehen. Sedimentkerne vom Meeresboden zeigen keine mikrobielle Aktivität an solchen Entgasungsstellen, es muss sich hierbei daher um fossile Strukturen handeln.

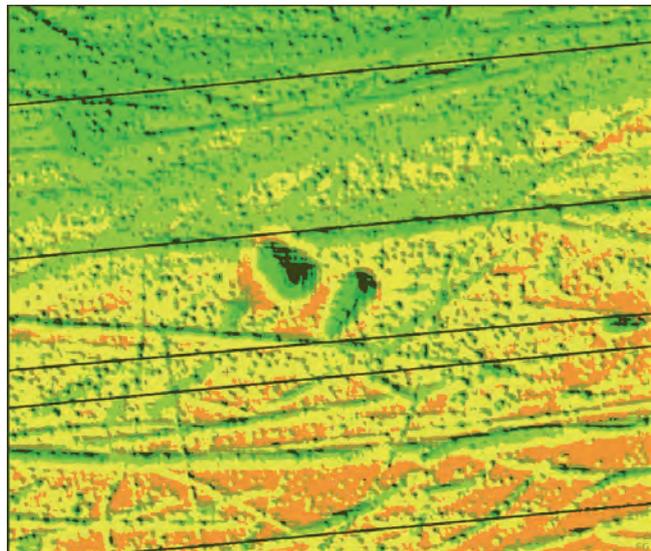


Abb. 3.4: Detailliertes Bodenrelief eines Gebiets in der Barentssee mit „Pockmarks“ (verstreute kraterförmige Vertiefungen als Spuren von Gasaustritten am Meeresboden). Man erkennt außerdem Spuren von Eisbergen, die am Meeresboden entlanggeschrammt sind (Rillen) und in der Bildmitte Dellen, die ein gegründeter Eisberg hinterlassen hat. (Grafik nach Lundin Norway, FFI und NGU)

## 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?*

Wasser- und Energiehaushalt an Landoberflächen und in der Atmosphäre sind auf das Engste miteinander verknüpft. Belastbare Aussagen zur Klimawirkung auf den regionalen Wasserkreislauf erfordern daher ein deutlich besseres Verständnis der Interaktion zwischen den atmosphärischen und den terrestrischen Wasser- und Energiehaushalten. Dazu werden im Rahmen von REKLIM regionale Modellsysteme entwickelt, die zur Validierung auf hydrometeorologische Beobachtungsnetzwerke wie z.B. die TERENO Observatorien oder Satellitenmessungen angewiesen sind. REKLIM verbindet also Beobachtungen mit Modellen und treibt Modellverbesserungen voran.

## Interaktion von atmosphärischem und terrestrischem Wasser- und Energiehaushalt im bayrischen Alpenraum

Insbesondere im komplexen Gelände wie dem Alpenraum ist eine hohe raum-zeitliche Variabilität von Wasser- und Energieflüssen zu erfassen. Dazu wird vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) das bayerische Alpen/Voralpen TERENO Observatorium im Einzugsgebiet der Ammer und der Rott betrieben. Die Region ist durch eine intensive land- und forstwirtschaftliche Nutzung geprägt. Bei einer hohen Klimasensitivität weist sie aufgrund des Höhenunterschiedes einen großen natürlichen Klimagradienten auf und bietet daher ideale Bedingungen für regionale Klima- und Klimaimpaktanalysen. Im Rahmen von TERENO werden hierfür im Einzugsgebiet der Ammer und der Rott auf unterschiedlichen Höhenstufen Klimastationen, Lysimeter und Eddy-Kovarianzsysteme zur Bestimmung des Energie-, Wasser- und Treibhausgashaushalts betrieben (Abb. 4.1).

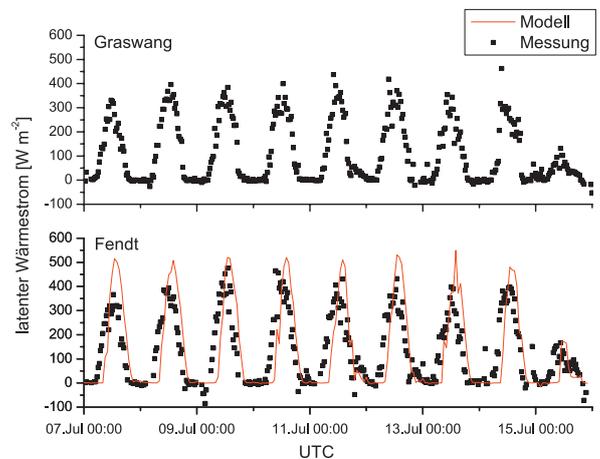


Abb. 4.2: Latenter Wärmestrom (entspricht der Verdunstungsrate) an den Stationen Graswang und Fendt im TERENO Observatorium des Ammer/Rott Einzugsgebiets. (Grafik: Diplomarbeiten K. Heidbach und L. Hingerl)

Die an den Eddy-Kovarianzstationen bestimmten Verdunstungsraten (Abb. 4.2, ausgedrückt als latenter Wärmestrom in  $\text{W}/\text{m}^2$ ) für eine Schönwetterperiode im Juli 2010 an den Standorten Graswang (865m) und Fendt (600m) zeigen beispielsweise, dass die Verdunstungsraten am höher gelegenen Standort Graswang im Mittel etwa 10% niedriger sind als an der Testfläche in Fendt.

Um die an den Einzelstandorten gemessenen Wasser- und Energieflüsse zu regionalisieren, werden Modellsysteme wie das regionale Klimamodell WRF und das terrestrische Wasser- und Energiehaushaltsmodell GEOTop angewendet und weiterentwickelt. Neben der traditionellen Validierung mit an Pegeln gemessenen Abflüssen kann nun auch der Energiehaushalt validiert werden. Der Vergleich der in-situ Energieflussmessungen mit den GEOTop-Modellierungsergebnissen am Modellpixel des Standorts Fendt zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 4.2 unten).

Durch die volle und flächendifferenzierte Berücksichtigung der gemeinsamen Wasser- und Energiebilanz kann nun zukünftig mit aus Satellitendaten abgeleiteten Variablen wie z.B. der Landoberflächentemperatur validiert werden.

Abb. 4.1: Eddy-Kovarianzstation zur lokalen Energieflussmessung am Standort Graswang (865m N.N.) im TERENO Observatorium Ammer/Rott. (Foto: Harald Kunstmann, UFZ)

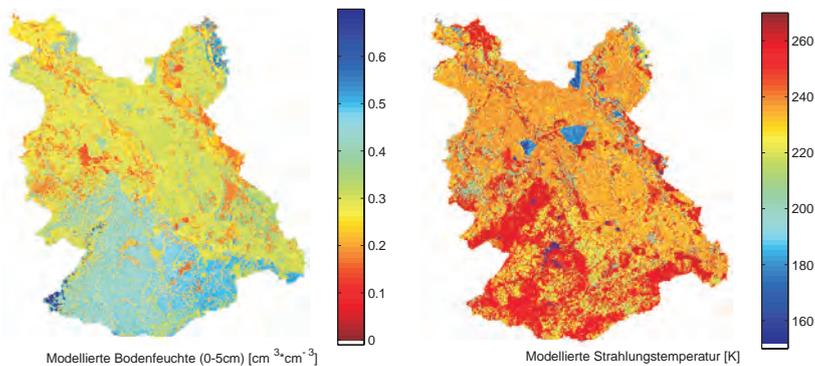


Abb. 4.3: Berechnete Feuchtigkeit der oberen Bodenschicht mithilfe von WaSiM-ETH ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (links) und mittlere Strahlungstemperatur (rechts) in den Einzugsgebieten von Rur und Erft für den 14.05.2010. (Grafik: Carsten Montzka, FZJ)

### Validierung der skalenabhängigen Strahlungstemperatur während einer SMOS Validierungskampagne in den Einzugsgebieten von Rur und Erft

Der „Soil Moisture and Ocean Salinity“ Satellit (SMOS) der Europäischen Raumfahrtagentur ESA wurde im November 2009 in Betrieb genommen und liefert seitdem für jeden dritten Tag Produkte zu Strahlungstemperaturen und Bodenfeuchtigkeit über terrestrischen Gebieten. 2010 wurden verschiedene flugzeuggestützte Messkampagnen durchgeführt, um die SMOS Produkte mit Hilfe eines Mikrowellenemissionsradiometers mit einer Bandbreite von 1,4 GHz (L-Band) zu validieren. Das Institut Agrosphäre des FZJ führte Messungen in den Einzugsgebieten von Rur und Erft im Mai und Juni 2010 durch. Die Messstationen waren in Deutschland an der belgischen und niederländischen Grenze lokalisiert. Mit Hilfe des WaSiM-ETH Modells wurde die Oberbodenfeuchtigkeit und Bodentemperatur flächendeckend berechnet und anhand von Messdaten kalibriert. Dies diente als Input für die Strahlungstransferberechnung auf Basis des L-MEB Modells, wodurch eine flächendeckende Strahlungstemperaturreferenz generiert wurde (Abb. 4.3). Die dazu notwendigen Strahlungstransferparameter wurden mithilfe eines Datenassimilationsansatzes geschätzt.

### Spezifizierung des Wärme-, Feuchte- und Isotopentransports für Landoberflächen

Zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre werden auch stabile Isotope des Wassers ( $\text{HDO}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) eingesetzt. Wasserisotope auf der Landoberfläche sind bisher nur sehr einfach in Modellen beschrieben. Das UFZ Leipzig hat in Zusammenarbeit mit dem CSIRO Australien ein neues Modell zur Untersuchung des Wärme-, Feuchte- und Isotopentransports für Landoberflächen vorgestellt (Haverd und Cuntz, 2010). Das Modell ist numerisch sehr effizient, kann daher auf der regionalen Skala eingesetzt werden und beinhaltet dennoch die Komplexität des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports. Das Modell, das auf der expliziten Lösung von Energie- und Bodenfeuchtegleichungen an der Grenzfläche Boden/Luft basiert, gestattet die Berechnung der isotopischen Konzentration in Böden mit dicken Bodenschichten und großen Zeitschritten, was bisher als eine starke Limitierung für die Computersimulation galt. Die Anwendung des Modells in einem Eukalyptuswald im südöstlichen Australien zeigt, dass die Waldverdunstung mit ihren Bestandteilen Evaporation und Transpiration und deren Isotopensignaturen sehr empfindlich auf die Einbeziehung von Waldstreu reagiert. Das Modell stellt ein nützliches Werkzeug dar, um die Aufteilung der Gesamtverdunstung in ihre Bestandteile mithilfe der Wasserisotope zu bestimmen.

### Regionalisierung hydrologischer Modelle

In den letzten Dekaden haben sich die Anforderungen an hydrologische Modelle in Bezug auf die umfangreich vorhandenen Fernerkundungsdaten beträchtlich erhöht. Die vorhandenen Modelle zeigen noch beträchtliche Mängel, beispielsweise in den verwendeten Parametrisierungen, insbesondere aber auch durch das Fehlen von wirkungsvollen Techniken, um die räumliche Heterogenität der zu integrierenden Daten und der physiographischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Vom UFZ Leipzig wird eine Technik der Multiskalen-Parameter-Regionalisierung (MPR) vorgeschlagen, um diese verschiedenen Aspekte gleichzeitig zu verbessern (Samaniego et al. 2010). Bei dieser Methode werden die Parameter auf einer größeren Skala, in der die dominierenden hydrologischen Prozesse repräsentiert sind, mit den entsprechenden Größen auf einem feineren Gitter, in dem diese als Eingabedaten vorhanden sind, durch Skalierungsmethoden verbunden. Die Parameter auf der feineren Skala sind durch nicht-lineare Übergangsfunktionen regionalisiert, die beckenweiten Wirkungsvariablen werden mit den globalen Parametern durch Kalibrierung verbunden. MPR wurde mit einer Standard-Regionalisierungsmethode (SR) verglichen und in der Neckar Region getestet (Abb. 4.4). Die Ergebnisse zeigen, dass die MPR der SR in vielerlei Hinsicht überlegen ist, insbesondere wenn globale Parameter von einer größeren auf eine feinere Skala gebracht werden.

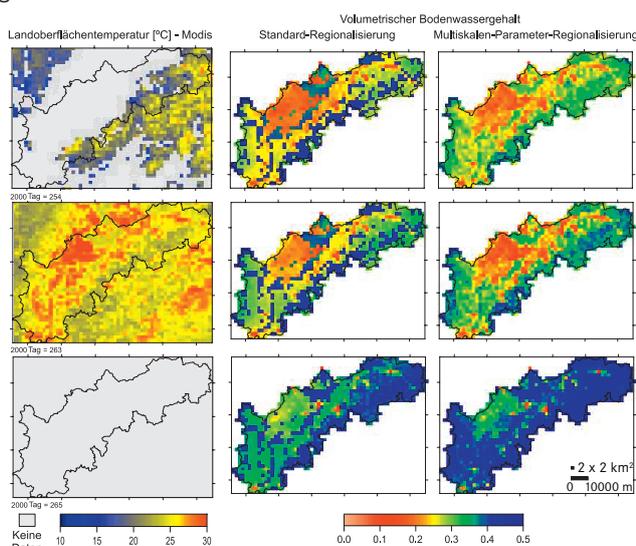


Abb. 4.4: Vergleich der Strukturen von Landoberflächentemperatur aus Satellitendaten (linke Spalte), einer Standard-Regionalisierung (SR, mittlere Spalte) und der Multiskalen-Parameter-Regionalisierung (MPR, rechte Spalte) für 3 Tage des Jahres 2000. (Grafik: Luis Samaniego, UFZ)

# 5

## Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala

*Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst?*

Kurzlebige Spurengase und Schwebeteilchen in der Atmosphäre haben eine große Relevanz für Luftqualität und Klimawandel. Luftschadstoffe, die bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe oder durch andere Prozesse freigesetzt werden, führen bei hohen Konzentrationen zu gesundheitlichen Schäden oder Schäden an der Vegetation, die dann z.B. mit Ernteaussfällen einhergehen. Neben den unmittelbar freigesetzten (primären) Luftschadstoffen gibt es andere, wie zum Beispiel Ozon, die erst durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre gebildet werden. Die Bedeutung der kurzlebigen Luftschadstoffe für den Klimawandel ist erst in jüngerer Zeit erkannt worden. Luftschadstoffe können regional den Treibhauseffekt oder die Wolkenbildung und den Niederschlag beeinflussen und damit die Folgen des globalen Klimawandels verstärken oder abschwächen. Des Weiteren greifen sie global in empfindliche Wechselwirkungsprozesse ein und beeinflussen damit zum Beispiel den Luftaustausch (Dynamik) in der Stratosphäre (Atmosphäre oberhalb ca. 10 km Höhe). Solche Änderungen können wiederum auf das bodennahe Klima zurückwirken. REKLIM Thema 5

widmet sich der Erforschung dieser Zusammenhänge mit Hilfe von technisch anspruchsvollen Messungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und mit Hilfe von komplexen numerischen Modellen, die sowohl die Meteorologie als auch die Chemie der Atmosphäre beschreiben. Die an REKLIM beteiligten Forschergruppen kooperieren eng miteinander und sind auch international bestens vernetzt.

### Montreal Protokoll erfolgreich

In den ersten zwei Jahren des Projektes konnten bereits mehrere bedeutende Ergebnisse erzielt werden. Mehrere Wissenschaftler der REKLIM Partner Forschungszentrum Jülich, DLR, GFZ und KIT waren an der Erstellung des neuen Sachstandsberichtes der Welt Meteorologie Organisation (WMO) zur Entwicklung der Ozonschicht in der Stratosphäre beteiligt, der im Dezember 2010 veröffentlicht wurde. Wichtige Aussagen dieses Berichts sind die Voraussage, dass sich die stratosphärische Ozonschicht bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts nahezu vollständig erholt haben sollte (Abb. 5.1) und das Ozonloch

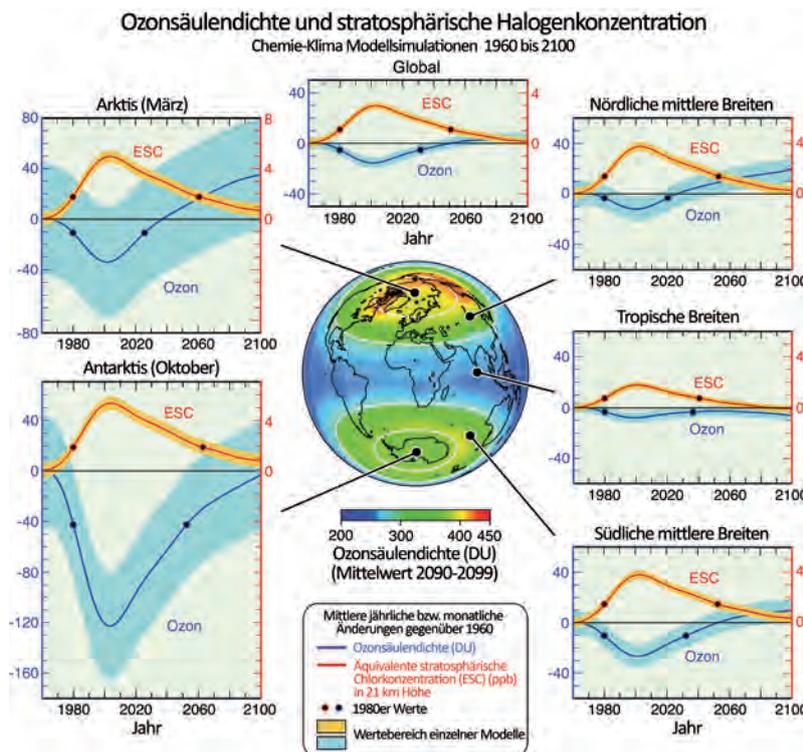


Abb. 5.1: Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht und der stratosphärischen Halogenbelastung über den Zeitraum 1960 bis 2100. Chemie-Klima Modelle werden eingesetzt, um Vorhersagen über die Gesamt-ozonsäule zu machen. Veränderungen in der Ozonschicht werden von Veränderungen der stratosphärischen Halogenbelastung (in den Modellen quantifiziert als ESC) und durch den Klimawandel bestimmt. Der Globus in der Mitte zeigt die Vorhersage für die Ozonschicht in der letzten Dekade des 21. Jahrhunderts. (Grafik: nach WMO Ozone Assessment 2010, editiert von Martin Schultz, FZJ)

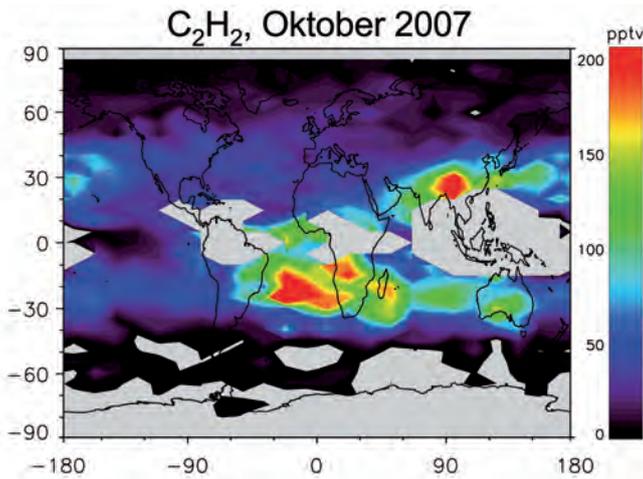


Abb. 5.2: Globale Verteilung von Acetylen ( $C_2H_2$ ) in 12 km Höhe aus MIPAS Spektren. Tropische Wald- und Savannenbrände in Afrika und Südamerika erzeugen eine Acetylenwolke, die vor allem über dem Südatlantik zu sehen ist. Eine weitere Zone erhöhter Konzentrationen wird über Südostasien gefunden. Grau hinterlegt sind Zonen, in denen aufgrund von Wolkenbedeckung nicht gemessen werden konnte. (Grafik: Thomas von Clarmann, KIT)

über der Antarktis wieder verschwinden wird. Das ist ein Erfolg der Regulierung von fluor-, chlor- und bromhaltigen Substanzen (FCKW) im Montreal Protokoll von 1987 und den nachfolgenden internationalen Vereinbarungen. Die weitere Entwicklung der Ozonschicht wird durch den Klimawandel beeinflusst und die Erholung der Ozonschicht wird regional unterschiedlich schnell verlaufen. Insgesamt wird durch die Klimaänderung eine beschleunigte Rückbildung der Ozonschicht erwartet. Zudem sollte die antarktische Ozonkonzentration nach dem vollständigen Abbau der FCKWs sogar größer sein als vor dem ersten Auftreten des Ozonlochs in den frühen 1980er Jahren. Diesem allgemeinen Trend ist allerdings eine hohe Variabilität überlagert, wie sich an dem ungewöhnlichen starken Ozonabbau in der Arktis im Frühjahr 2011 zeigte.

### Regionale Klimaänderungen und solare Variabilität

Änderungen der stratosphärischen Ozonschicht können sich ebenso auf das regionale Wettergeschehen auswirken wie der 11-jährige Sonnenfleckenzyklus. Diese Wechselwirkungsprozesse werden von zwei Helmholtz-Nachwuchsgruppen (NATHAN am GFZ und SolVar am KIT) untersucht. Mit Hilfe von Chemie-Klimamodellen und statistischen Analysen von meteorologischen Daten wurde gezeigt, dass sich die Schwankungen der Sonnenaktivität sowohl aufgrund von Änderungen in der solaren Einstrahlung als auch durch die veränderliche geomagnetische Aktivität als regionale Muster im Klimasystem auswirken können (Meehl et al., 2009; Seppälä et al., 2009). Offensichtlich spielt hierbei die Kopplung verschiedener Atmosphärenschichten vom Ozean bis zur polaren Thermosphäre eine entscheidende Rolle, wobei die Mechanismen noch nicht genau verstanden sind. Die in diesem Zusammenhang besonders wichtige Tropopausenregion (Übergangsbereich zwischen den erdnahen Luftschichten der Troposphäre und der Stratosphäre) wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem GFZ und dem FZJ durch eine neuartige Kombination von Radiookkultationsdaten der Satelliteninstrumente CHAMP und GRACE mit in-situ Messdaten aus einem Forschungsprogramm auf Passagierflugzeugen (MOZAIC) genauer charakterisiert

(Schmidt et al., 2010). Außerdem wurden am KIT aus Satellitendaten des MIPAS Instrumentes auf Envisat Klimatologien diverser Spurengase in der Tropopausenregion erstellt (Abb. 5.2).

### Ruß- und Spurengasemissionen durch Vegetationsfeuer

Historische Zeitreihen von Spurengas- und Aerosolemmissionen sind unverzichtbare Randbedingungen für die Simulation von Chemie-Klimawechselwirkungen. In der Vergangenheit wurden solche Zeitreihen von unterschiedlichen Gruppen erstellt. In einer neuen Veröffentlichung unter Beteiligung von REKLIM-Wissenschaftlern aus Jülich vergleichen Granier et al. (2011) die unterschiedlichen Abschätzungen weltweiter historischer Emissionen und stellen fest, dass es insbesondere für Ruß noch erhebliche Unterschiede in den Inventaren gibt. Schuld daran sind Unsicherheiten bei den Emissionsfaktoren einzelner Emissionsquellen sowie der Mangel an Daten über die räumliche Verteilung der Quellen in den verschiedenen Regionen. Im REKLIM Thema 5 wird ein Schwerpunkt auf Emissionen von Wald- und Savannenbränden gesetzt. Dank dieser Arbeiten können jetzt Satellitendaten zur tagesaktuellen Bestimmung der globalen Feueremissionen verwendet werden (Abb. 5.3).

### Ursachenforschung für Wolken- und Niederschlagsbildung

Der Einfluss von Schwebeteilchen auf Wolken und Niederschlag wird in der Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe „Aerosol effects on cloud ice, precipitation and climate“ am KIT untersucht. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Eigenschaft einiger Aerosolpartikel, unter geeigneten Bedingungen das Gefrieren von Wolkentropfen und damit effiziente Niederschlagsbildung auszulösen. Solche Aerosole sind oft mineralischen oder biologischen Ursprungs. Wissenschaftler am KIT untersuchen das Gefrieren in Laborexperimenten und entwickeln aus den Messergebnissen Parametrisierungen, um Klima- und Wettermodelle zu verbessern. Eine Doktorarbeit am Forschungszentrum Jülich befasst sich mit der Entwicklung einer neuen Messmethode zur Charakterisierung organischer Aerosolkomponenten.

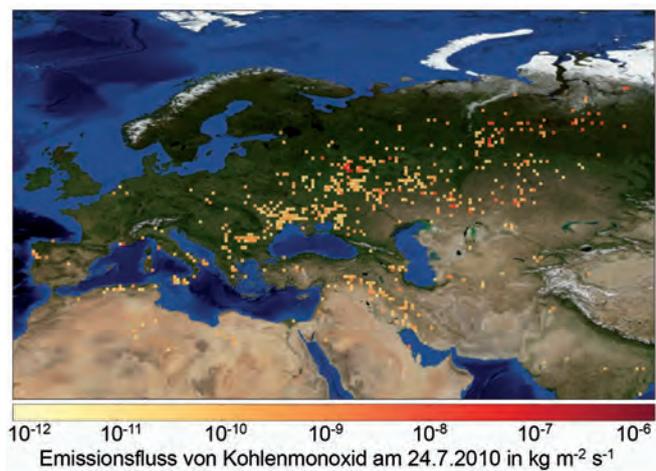


Abb. 5.3: Karte der Emissionen von Kohlenmonoxid aus Vegetationsfeuern in Europa am 24. Juli 2010. Deutlich erkennbar sind die sehr hohen Emissionen aus den Waldbränden rund um Moskau. Die Emissionen wurden im europäischen MACC Projekt aufgrund von Satellitenbeobachtungen errechnet und werden von einem Datenserver am FZJ der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. (Grafik: Martin Schultz, FZJ)

# 6

## Extreme Wetterereignisse – Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren

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

Meteorologische Extremereignisse sind häufig mit schwerwiegenden Folgen für die Gesellschaft und ihre Werte verbunden. Als Folge des Klimawandels ist zu erwarten, dass bestimmte Extremereignisse in ihrer Häufigkeit und Intensität je nach Region weiter zunehmen - oder auch abnehmen. Derzeit werden im Rahmen von Thema 6 Polartiefs, Starkniederschläge und damit verbundene Überschwemmungen sowie Gewitterstürme und Hagelschlag hinsichtlich zu erwartender Änderungen in der Zukunft untersucht. Durch Nutzung verschiedener Datensätze und durch sehr detaillierte Modellierung mit hoch aufgelösten regionalen Modellen können auch die selten auftretenden Extremereignisse besser als bisher abgebildet und mit Hilfe geeigneter statistischer Methoden quantifiziert werden.

### Regionale Simulationen von Polartiefs im Nord-Atlantik

Im Winter entstehen über den Ozeanen der hohen Breiten kleinräumige, intensive Wirbelstürme, die so genannten Polartiefs. Sie stellen aufgrund von hohen Windgeschwindigkeiten und starkem Niederschlag sowie ihrem oft plötzlichen Auftreten eine Gefahr für die Seefahrt, die Küstengebiete oder auch die Offshore Öl- und Gasförderung dar. Häufig entstehen sie in Kaltluftausbrüchen, bei denen kalte, trockene Luftmassen von eisbedeckten Gebieten in Richtung Ozean strömen. Da Polartiefs einen Durchmesser von nur wenigen hundert Kilometern aufweisen, können sie in globalen Reanalysedatensätzen (die Beobachtungsdaten mit Hilfe eines Modellsystems räumlich

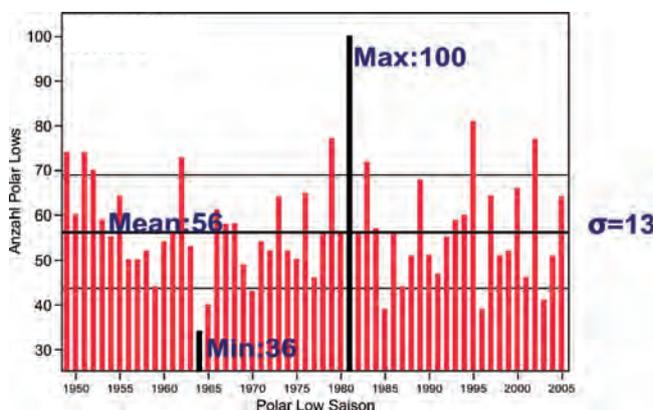


Abb. 6.1 : Anzahl der detektierten Polartiefs pro Polartiefsaison. Eine Polartiefsaison ist definiert vom 1. Juli bis zum 30. Juni im darauf folgenden Jahr. (Grafik: Zahn und von Storch, 2008)

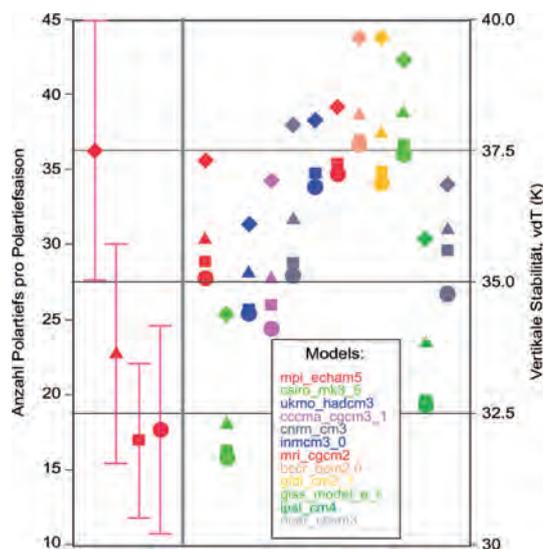


Abb. 6.2: Projizierte Änderungen der Polartieffrequenz und vertikalen Stabilität. Das linke Diagramm zeigt die mittlere Anzahl und Standardabweichung von Polartiefs pro Polartiefsaison. Das rechte Diagramm zeigt die mittlere statische/vertikale Stabilität bestimmt durch den vertikalen Temperaturunterschied (vdT) zwischen der Meeresoberfläche und der Atmosphäre in einer Höhe von 500 hPa (in Kelvin) für die Zeit von Oktober bis März für 30 Jahre (1960–1989 für IPCC-AR4 Szenario C20 und 2070–2099 für die Szenarien B1, A1B und A2). Die vertikale Stabilität wurde über den eisfreien Ozeangitterzellen des Modellgebietes berechnet. Die Daten wurden abgeleitet aus vier IPCC Szenarien: C20 (Rhomben), B1 (Dreiecke), A1B (Quadrat) und A2 (Punkte). (Grafik: Zahn und von Storch, 2010)

und zeitlich homogenisieren und relativ grob aufgelöst sind) nur unzureichend dargestellt werden. Deshalb wurden diese Globaldaten am Helmholtz-Zentrum Geesthacht in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg mit dem Regionalmodell CCLM verfeinert (Zahn und von Storch, 2010).

Erste Fallstudien zeigen, dass einzelne Polartiefs im Regionalmodell realistisch simuliert werden können. Diese Ergebnisse wurden genutzt, um anschließend Polartiefs über die vergangenen Jahrzehnte zu simulieren, zu zählen und die einzelnen Fälle in einem Datensatz zusammenzufassen (Abb. 6.1). Eine solche Klimatologie war aufgrund mangelnder Satellitenverfügbarkeit und -abdeckung bisher nicht direkt aus Beobachtungsdaten ableitbar und wurde nun erstmals präsentiert. Damit kann eine Änderung der Häufigkeit von Polartiefs im Nordatlantik bestimmt werden. Es zeigt sich eine starke jährliche Variabili-

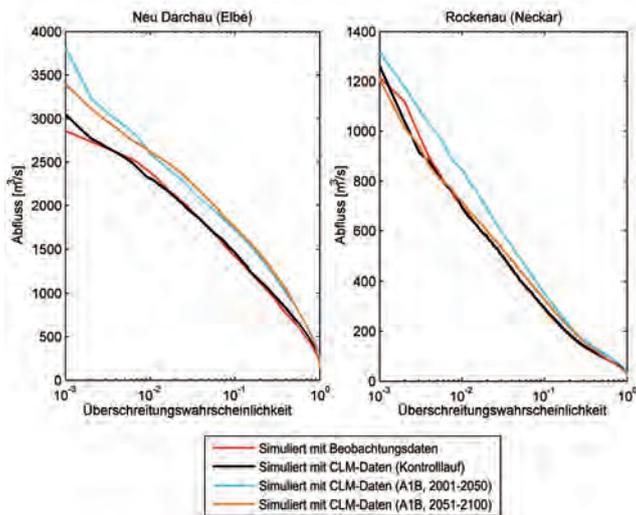


Abb. 6.3: Abflussdauerkurven der beobachteten und simulierten Abflüsse an den Pegeln Neu Darchau (Einzugsgebiet der Elbe) und Rockenau (Einzugsgebiet des Neckars). Simulierte Abflüsse wurden auf Basis von ECHAM5-CCLM Klimaprojektionen für das A1B Szenario mit einer räumliche Auflösung von 18 x 18 km<sup>2</sup> berechnet. (Grafik: GFZ)

tät, während dekadische Schwankungen klein sind. Langfristige Änderungen waren in den vergangenen Jahrzehnten nicht signifikant.

Eine weiterführende Studie beschäftigt sich mit Häufigkeitsänderungen von Polartiefs für verschiedene Zukunftsszenarien des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Abb. 6.2). Es zeigt sich, dass die Häufigkeit von Polartiefs bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 50 % abnehmen kann und dass sich diese Wirbelstürme im Zuge der globalen Erwärmung weiter nordwärts verlagern. Die Abnahme der Häufigkeit wird auf eine stabilere Schichtung der Atmosphäre zurückgeführt. Da sich die polare Atmosphäre in den IPCC Modellen schneller erwärmt als die Meeresoberfläche, verringert sich ihr vertikaler Temperaturgradient und sie wird insgesamt stabiler, so dass günstige Bedingungen für Polartiefs seltener auftreten. Durch eine zurückgehende arktische Eisbedeckung werden weiter nördlich gelegene Regionen in Zukunft häufiger eisfrei und Polartiefs können sich auch dort entwickeln.

### Starkniederschläge und Abflussmodellierung

Auf der Basis eines Ensembles hoch aufgelöster Simulationen mit dem regionalen Klimamodell CCLM wurden am KIT Änderungen von Extremniederschlägen und Trockenperioden in Mitteleuropa in den nächsten Jahrzehnten untersucht. Die Schwerpunkte liegen dabei auf Ensemble-Methoden zur Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit von Änderungssignalen, Anwendung geeigneter Verfahren der Extremwertstatistik und die Anwendung einer Bias-Korrektur. Insbesondere im Sommer zeigt sich an beide Enden der Niederschlagsverteilung – Trockenheit und Starkniederschläge – eine Tendenz zu extremen Ereignissen in der nahen Zukunft (2021-2050).

Das veränderte Abflussgeschehen als Konsequenz aus dem veränderten Niederschlagsgeschehen wird sowohl am GFZ als auch am UFZ mit Hilfe verschiedener Klimaszenarien untersucht. Am GFZ wurde dazu in Kooperation mit dem PIK das regionale hydrologische Modell SWIM für die großen Einzugsgebiete Rhein, Elbe, Donau, Weser und Ems erstellt, das mit verschiedenen CCLM Szenarien mit einer Auflösung von 18 x 18 km<sup>2</sup> angetrieben wird. Eine Biaskorrektur (analog zu

der am KIT entwickelten) erfolgte ebenfalls teileinzugsgebietspezifisch für den Kontrollzeitraum (1960-2000). Es lässt sich zusammenfassen, dass die extremen Abflüsse in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark ansteigen dürften. In der zweiten Hälfte fällt der weitere Anstieg etwas schwächer aus (Abb. 6.3).

Am UFZ ermöglichte eine Erweiterung des Modells mHM eine verbesserte Simulation des Bodenwasserstroms und der Bodenfeuchte. Mit Hilfe von mHM wurden für die großen deutschen Flusseinzugsgebiete (Donau, Rhein, Weser, Ems, Elbe, und Oder) Eintrittswahrscheinlichkeiten für verschiedene Charakteristika der Extremereignisse ermittelt. Diese Charakteristika beinhalten das spezifische Abflussvolumen, die Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen, sowie das kumulative spezifische Defizit, die Dauer und die maximale Intensität von Trockenperioden.

### Änderung der Konvektionsbedingungen

Die Arbeiten zu sommerlichen Starkniederschlägen werden ergänzt durch verschiedene Untersuchungen am KIT zu Konvektionsbedingungen über Mitteleuropa und zur Hagelgefährdung in Deutschland. Analysen von Radiosondendaten zufolge hat die Zunahme der Feuchtigkeit in den bodennahen Schichten der Atmosphäre in den vergangenen Jahrzehnten auch das Gewitterpotential über weiten Teilen Mitteleuropas ansteigen lassen. Darüber hinaus haben spezielle hagel-relevante Großwetterlagen, die mit Hilfe von CCLM Klimasimulationen bestimmt wurden, in der Vergangenheit deutlich zugenommen.

Derzeit werden geeignete Verfahren entwickelt, um Hagel-schlag möglichst genau aus verschiedenen Datensätzen wie Radardaten, Satellitendaten oder Modelldaten zu bestimmen. Genutzt wird dabei beispielsweise die vertikale Ausdehnung der Intensität (Radarreflektivität) als Hagelkriterium (Abb. 6.4). Erste Ergebnisse zeigen eine erhebliche räumliche Variabilität der Hagelhäufigkeit in Deutschland, die sowohl von den synoptisch-skaligen Bedingungen (Nord-Süd Gradient) als auch von orografischen Effekten bestimmt ist.

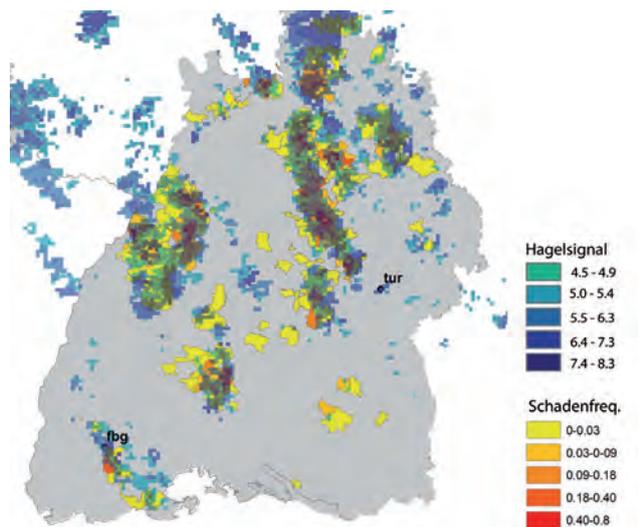


Abb. 6.4: Hagelkriterium (Höhendifferenz in km zwischen 0 °C und einer Radarreflektivität von 45 dBZ) für Baden-Württemberg am 29./30. Mai 2008, abgeleitet aus Radardaten an den Standorten Türkheim (tur) und Feldberg (fbg) mit Schadenfrequenz der Gebäudeschäden nach Versicherungsdaten (Anzahl Schäden normiert mit Anzahl Versicherungen pro Plz-Gebiet in %). (Grafik: 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?*

## Post-Kyoto-Architektur

Die globale Zunahme des klimaschädlichen Kohlendioxids in der Atmosphäre konnte durch die Maßnahmen und Instrumente des Kyoto-Protokolls nicht gebremst werden. Seit den Verhandlungen von Bali im Jahr 2007 ringt die Weltgemeinschaft um das Gerüst für ein weitergehendes Kyoto-Folgeabkommen. In dieser „Post-Kyoto-Architektur“ geht es nicht nur um ehrgeizige weltweite Reduktionsverpflichtungen, sondern auch darum, Anpassungs- und Vermeidungsstrategien systematisch in den Wirtschaftsbeziehungen der Länder zu verankern. Dies wiederum erfordert zweckmäßige Monitoring- und Indikatoren-Systeme, um den Erfolg der Anpassungsmaßnahmen und Finanzierungshilfen effektiv und regelmäßig kontrollieren zu können. Zudem müssen die Politiken zwischen verschiedenen Ressorts und Verwaltungsebenen wirksam koordiniert werden. Thema 7 untersucht mittels politischer und ökonomischer Modelle die Interaktion von fragmentierten, regionalen und sektoralen Märkten und Politiken sowie internationale Verhandlungen über die Emissionsvermeidung und die Koordination von Anpassungs- und Finanzierungsmaßnahmen (Abb. 7.1). Ein weiterer Schwerpunkt umfasst die Entwicklung von Kohärenzstrategien. Dabei kommt der Analyse des Linking, d.h. der Verknüpfung und Harmonisierung unterschiedlicher nationaler und regionaler Emissionsminderungspolitik, eine besondere Bedeutung zu.



Abb. 7.1: Prof. Reimund Schwarze, UFZ-Klimaexperte, war als Beobachter für die Verhandlungsdelegation von Burkina Faso beim Klimagipfel in Cancun vor Ort (links im Gespräch mit einem Verhandlungsteilnehmer). Dort wurde zwar ein Rahmenwerk für die Fortschreibung des Kyoto-Protokolls und die Langzeitkooperation in der Entwicklungshilfe und im Klimaschutz etabliert, ein völkerrechtlich verbindliches Nachfolgeabkommen ist derzeit allerdings nicht in Sicht. (Foto: UFZ)

## Ökonomie der Klimaanpassung

Elementare Voraussetzung für die effiziente Implementierung von Anpassungsstrategien ist die Kenntnis der Anpassungskosten. Während es bereits zahlreiche Studien zur Abschätzung der Kosten einer Verringerung der Treibhausgasemissionen gibt, wurden bislang kaum entsprechende Versuche mit Blick auf die Anpassung an den Klimawandel unternommen. Thema 7 will diese Lücke schließen, indem basierend auf einer Abschätzung der Verletzlichkeiten verschiedener Regionen gegenüber dem Klimawandel die Anpassungskosten „bottom-up“, d.h. durch Regional- und Sektor-Studien bestimmt werden, um darauf aufbauend Entscheidungshilfen für die Anpassungspolitik abzuleiten. Mit den Projekten „GLOWA-Elbe“, „Cost of Natural Hazards“ oder der Pilotstudie „Anpassungskosten Sachsen-Anhalt“ wurden bereits erste Projekte am UFZ realisiert (Abb. 7.2). Da die bestehenden Studien zu den Anpassungskosten zumeist auf einzelne Sektoren, wie z.B. die Landwirtschaft, oder Regionen, wie z.B. Flusseinzugsgebiete, bezogen sind, wollen UFZ und HZG gemeinsam die vielfältigen Wechselwirkungen von Anpassungspolitik in regionalen Wirtschaftszusammenhängen untersuchen.

## Regionale Risikowahrnehmung und -kommunikation

Eine weitere Herausforderung für die Implementierung von Anpassungsstrategien ist, dass diese an die Wahrnehmung der Bedrohungen in einer regional-kulturell verankerten Gesellschaft gekoppelt sind. Deshalb ist es notwendig, die regional-kulturellen Konstruktionen von Bedrohung, Gefahr und Risiko zu analysieren, die verschiedenen Stakeholder aktiv einzubinden und Handlungsstrategien an die jeweiligen Gesellschaften anzupassen. In Anbetracht dessen hat das HZG in mehreren Projekten die Sozioökonomie verletzlicher Regionen, wie z.B. Küsten, untersucht und basierend auf regionalen Szenarien Beteiligungsverfahren und Risikokommunikationsstrategien entwickelt. Im Rahmen des Projekts „Charakterisierung des Heimatbegriffs an der Nordseeküste“ wurden über 800 Bewohner nach dem Bezug zu ihrer Heimat, zur natürlichen Umwelt und ihrer Einschätzung möglicher Naturgefahren befragt, um zu prüfen, ob die Bevölkerung eine nachhaltige Entwicklung der Nordseeregion unterstützt. In einer weiteren, in regelmäßigen Abständen wiederholten Befragung äußern Hamburger Bürger, wie sie den Einfluss des Klimawandels auf ihr Leben sowie die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Naturkatastrophen beurteilen.

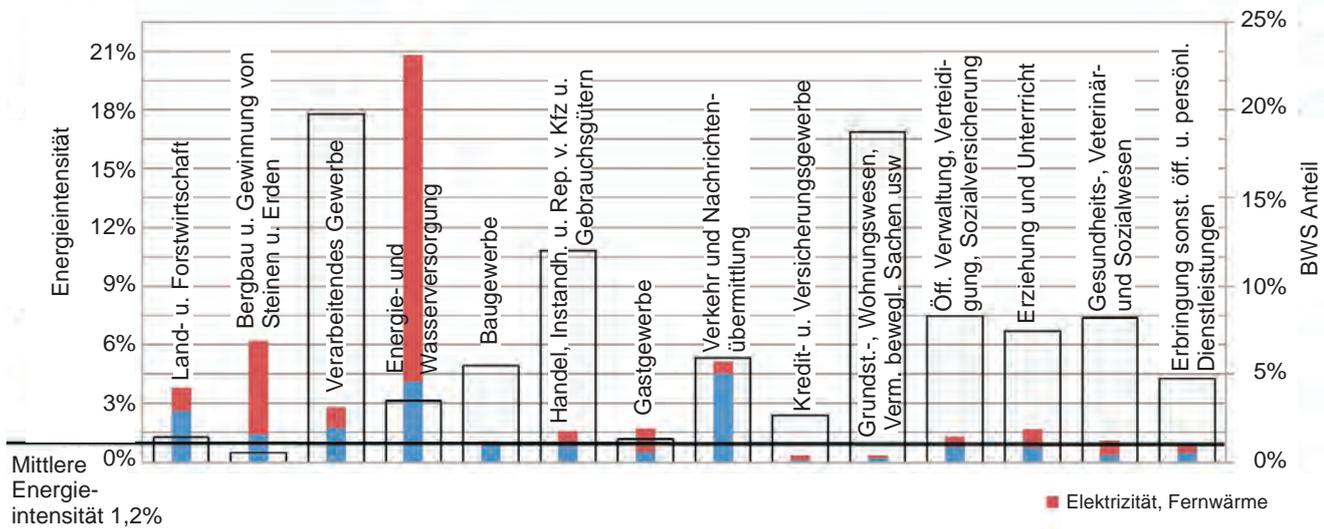


Abb. 7.2: Im Rahmen der Pilotstudie „Anpassungskosten Sachsen-Anhalt“ vorgenommene Gegenüberstellung der Energieintensitäten (untergliedert in fossile Rohstoffen, Elektrizität und Fernwärme) und der anteiligen Bruttowertschöpfungen verschiedener Sektoren. Zur Vergleichbarkeit ist die mittlere Energieintensität über alle Sektoren (1,2%) abgetragen. Es fällt auf, dass vor allem die Sektoren Verarbeitendes Gewerbe, Forst- und Landwirtschaft sowie Verkehr und Nachrichtenübermittlung eine überdurchschnittliche hohe Gesamtenergieintensität aufweisen und somit nach dieser statistischen Betrachtung als überdurchschnittlich „klimasensibel“ angesehen werden können. (Quelle: UFZ)

Ferner wurden mit dem Norddeutschen Klimaatlas und dem Hamburger Klimabericht Anstrengungen unternommen, Prognosen und Informationen zum Klimawandel und den damit verbundenen Risiken für den norddeutschen Raum bzw. die Metropolregion Hamburg in gebündelter Form der breiten Öffentlichkeit, politischen Entscheidungsträgern und Stakeholdern zugänglich zu machen (Abb. 7.3). Damit ist eine Grundlage geschaffen, um regionale Strategien für eine Anpassung an den Klimawandel weiter auszubauen und dabei die Betroffenen und Interessengruppen aktiv mit einzubeziehen.

### Integrierte risikobasierte Zielfindung

Die Prognoseunsicherheiten hinsichtlich des Klimawandels und der damit verbundenen ökologischen und ökonomischen Folgen sind immens und können selbst durch erhebliche Forschungsanstrengungen nicht vollständig ausgeräumt werden. Umso wichtiger sind risikobasierte Zielfindungsansätze, die diesen Unsicherheiten Rechnung tragen. Besagte Ansätze umfassen einerseits die Bestimmung von tolerablen Risiken (im Zeitablauf) auf der Grundlage von Experten-, Entscheider- und Bürgerforen sowie Entscheidungsunterstützungssystemen und Marktbeobachtungen, z.B. hinsichtlich der versicherungstechnischen Bewältigung von Klimarisiken. Andererseits geht es um die Berücksichtigung des Risikos bei der Bestimmung des optimalen Anpassungs-Vermeidungs-Strategiemix. Dieser

zeichnet sich dadurch aus, dass Synergien zwischen Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen, aber auch anderen Nachhaltigkeitspolitiken, z.B. aus den Bereichen Umwelt oder Wirtschaft, genutzt und mögliche Konflikte vermieden werden. Beispiel Siedlungsentwicklung: Das Transportaufkommen und damit auch die Emission von Treibhausgasen kann gesenkt werden, wenn es gelingt, ÖPNV, Versorgung, Wohnen und Arbeiten besser aufeinander abzustimmen. Allerdings begünstigt diese Siedlungsverdichtung gleichzeitig Hitzestaus und ist somit der Anpassung abträglich. Synergiepotential ist dagegen bei der Schaffung von Grünflächen gegeben, die Frisch- und Kaltluft produzieren (Adaptation) und zudem Treibhausgase absorbieren (Mitigation). Die Konzeption von Anpassungs- und Vermeidungsstrategien sollte also möglichst in integrierter Form erfolgen.

### Risiken wahrnehmen und Gefahren kennen

Insgesamt zeigt sich, dass beim gegenwärtigen Stand des Wissens die Klimapolitik nur dann optimiert werden kann, wenn Klimaschutz und Klimaanpassung besser aufeinander abgestimmt sind und die Integration von Klimazielen in die Maßnahmen der Umwelt-, Wirtschafts- und Sozialpolitik erfolgt. Politiken sind soziale Strategien, die auf einem Aushandlungsprozess basieren, der kulturell eingebettet ist. Dazu müssen die Konflikte zwischen verschiedenen Politikzielen und -akteuren identifiziert und möglichst minimiert werden. Wichtig sind dabei die regional-kulturelle Wahrnehmungsforschung und die Analyse gesellschaftlicher Diskurse, die nicht zuletzt durch die Medien mitgeformt werden. Denn das Wahrnehmen von Risiken und das Wissen über Gefahren sind Rahmenbedingungen, die die Grundlage für verbesserte Anpassungs- und Vermeidungsstrategien bilden.

Metropolreg. Hamburg: Mögliche größte Zunahme der heißen Tage pro Jahr bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990).

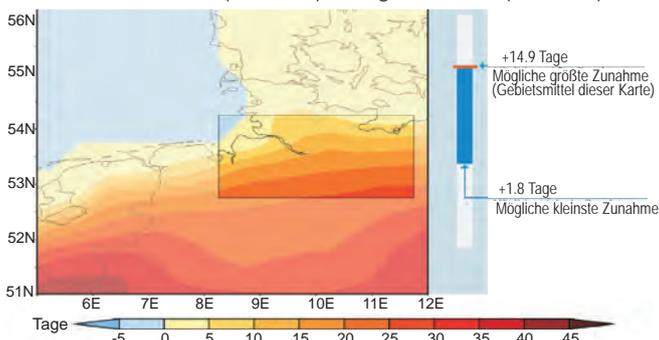


Abb. 7.3: Der Norddeutsche Klimaatlas ermöglicht es den Nutzern, online Prognosen und Informationen zum Klimawandel abzurufen. Je nach Bedarf und Interessenlage können dabei verschiedene Regionen, Prognosezeiträume, Jahreszeiten, Klimaszenarien und -parameter (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Wind und Bewölkung) ausgewählt werden. (Quelle: HZG)

## 8

# Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten

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

Für eine verbesserte Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung benötigt die Klimaforschung vorrangig Informationen über Dauer, Geschwindigkeit, Frequenz und regionale Muster von lang- und kurzfristigen Klimaschwankungen. Dafür ist eine weitreichendere, zeitliche Perspektive notwendig, die über den Zeitraum der instrumentellen Messreihen (etwa hundert Jahre) und des anthropogen beeinflussten Wandels hinausgeht. Der Rückblick in die Erdgeschichte bildet daher eine wesentliche Basis zum Verständnis über die Reaktion und Dynamik des Klimas gegenüber Veränderungen in den Anfachungsmechanismen und interner Rückkopplungsprozesse im Klimasystem. Aus diesem Rückblick wissen wir, dass schnelle Klimaänderungen mit ausgeprägten Wechseln in Temperatur und Niederschlag auf Zeitskalen von Jahren, Dekaden und Jahrhunderten nicht ungewöhnlich sind. Das belegen zum Beispiel Klimarekonstruktionen aus Eisbohrkernen sowie aus zeitlich hochauflösenden marinen und limnischen Sedimentarchiven.

So registrierten Eiskerndaten für den Zeitraum der letzten Eiszeit (~70.000 – 15.000 J.v.h.) und den darauf folgenden Übergang in unsere heutige Warmzeit (~15.000 – 11.000 J.v.h.) sprunghafte Änderungen in Temperatur, Niederschlag und atmosphärischer Zirkulation (Abb. 8.1). Diese Änderungen gingen mit Temperatursprüngen von teilweise bis zu 10°C einher und vollzogen sich innerhalb weniger Dekaden oder sogar weniger Jahre. Obwohl die Temperaturkurven aus Grönland und der Antarktis für den Zeitraum der letzten 11.000 Jahre auf eine nur geringe Klimavariabilität im Holozän hinwiesen, wurden Klimaschwankungen mit größeren Amplituden vor

allem aus den subtropisch-tropischen Regionen überliefert. Diese Instabilitäten gingen vor allem mit heftigen Änderungen in den Niederschlägen einher und führten zu gesellschaftlichen Umwälzungen oder sogar zum Niedergang von Hochkulturen. Das belegen Klimarekonstruktionen aus jahreszeitlich geschichteten Seesedimenten und marinen Sedimentarchiven (Abb. 8.3). Die wissenschaftlichen Ergebnisse der letzten zwei Dekaden haben auch gezeigt, dass die Klimaschwankungen im Holozän insbesondere in ihrer räumlichen und zeitlichen Dimension sehr unterschiedlich ausgeprägt waren (Abb. 8.4). Die raumzeitlichen Klimamuster von Warmzeiten sind allerdings nur sehr lückenhaft dokumentiert und auch in ihren Ursachen nur wenig verstanden. Ihre Rekonstruktion und modellgestützte Interpretation bilden daher einen wichtigen Schlüssel um die natürliche Klimadynamik in ihrer Gesamtheit zu verstehen.

Unsere Initiative soll im Rahmen von REKLIM dazu beitragen bestehende Lücken zu schließen und unser Prozessverständnis über Rückkopplungs- und Antriebsmechanismen im Klimasystem zu verbessern. Ziel der Untersuchungen ist es, regionale und zeitliche Muster in der Klimavariabilität zwischen atlantischem und pazifischem Raum, sowie zwischen hohen und niederen Breiten, für den Zeitraum der letzten 140.000 Jahre auf unterschiedlichen Zeitskalen von Jahren bis Jahrtausenden zu erfassen und in ihren Ursachen zu erklären. Dieser Zeitraum erlaubt es, nicht nur die raschen Klimawechsel während der letzten Eiszeitermination und im Holozän zu erfassen, sondern ermöglicht auch einen Vergleich zum vorletzten Eiszeit/Warmzeit Übergang und der sich daran anschließenden Warmzeit, dem Eem (~130.000 – 115.000 J.v.h.) (Abb. 8.1). Während des Eem war es global ca. 2°C wärmer und der Meeresspiegel lag um etwa 6 m höher als heute. Der Vergleich von vorliegenden Eiskerndaten weist darauf hin, dass das Abschmelzen grönländischer Eismassen nur zum Teil für diese Meeresspiegelerhöhung verantwortlich war. Beunruhigend in diesem Zusammenhang ist, dass wahrscheinlich ein vollständiges Abschmelzen des westantarktischen Eisschildes entscheidend zur Meeres-

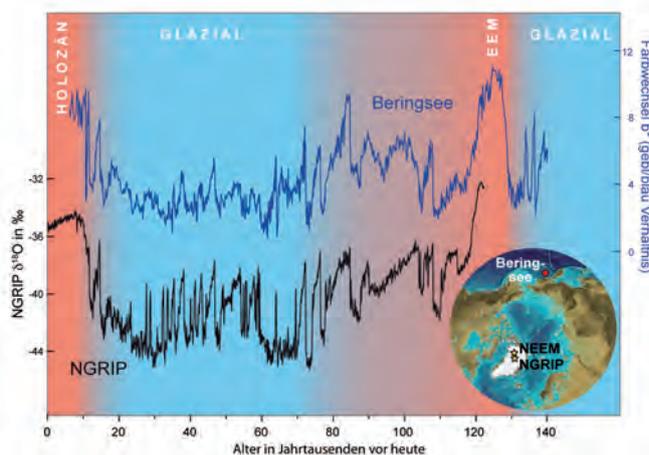


Abb. 8.1: Die Muster der raschen Klimawechsel auf Grönland (NGRIP  $\delta^{18}O$ ) spiegeln sich in der Beringsee mit Farbwechseln in der Sedimentzusammensetzung (Kern SO-212-1-85KL) während der letzten 140.000 Jahre wider. Die Farbwechsel kennzeichnen eine erhöhte Produktivität von Diatomeen während warmzeitlicher Ereignisse. Diese Wechsel sind auf enge atmosphärische Telekonnektionen zwischen Grönland und der Beringsee zurückzuführen. (Grafik: Ralf Tiedemann, AWI; North Greenland Ice Core Project Members, 2004)



Abb. 8.2: Expedition mit dem Forschungsschiff „Polarstern“ in den Südpazifik. Einsatz des Kolbenlotes zur Gewinnung von Sedimentkernen. (Quelle: Rainer Gersonde, AWI)

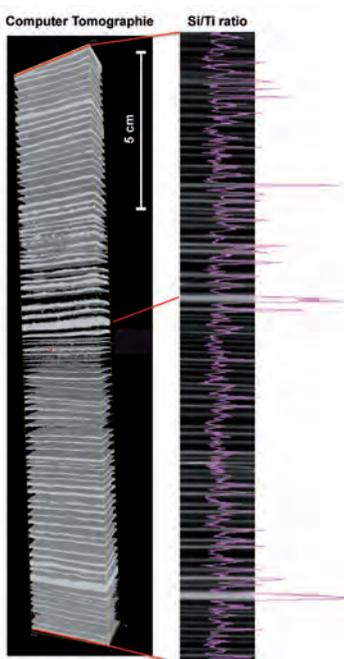


Abb. 8.3: Computer-Tomographie eines laminierten Sedimentintervalls aus der Beringsee. Mit Hilfe eines Micro-XRF Scanners werden Element-Variationen in den Jahreslagen erfasst. Die Si/Ti Variationen kennzeichnen in diesem Fall eine erhöhte biogene Produktivität kieseliger Mikroorganismen. (Grafik: Hartmut Kühn, AWI)

ständnis über Wechselwirkungen von dominanten Mustern der atmosphärischen Variabilität mit dem Ozean, den Eismassen und den Landflächen und deren Bedeutung für Klimafluktuierungen verbessern (Abb. 8.4). Für eine erfolgreiche Umsetzung wurden während der letzten Jahre vor allem Klimaarchive aus Regionen erschlossen aus denen nur spärliche Informationen vorliegen. So konnte z.B. mit unseren Expeditionen in die polaren und subpolaren Regionen des Süd- und Nordpazifiks der noch lückenhafte Ring zirkumpolarer Sedimentarchive geschlossen werden (Abb. 8.2). Außerdem wurde in diesem Sommer ein neuer Eiskern auf Nord-Grönland erbohrt (NEEM) mit dem Ziel, eine ungestörte Klimazeitreihe für das Eem zu gewinnen. Neue Sedimentkerne aus der Beringsee erbrachten für die Übergangszeiten zwischen Glazial und Interglazial, sowie für das frühe Eem und das Holozän laminierte Sedimente mit jahreszeitlicher Auflösung (Abb. 8.3). Diese werden erstmals Vergleiche aus dem pazifischen Raum zu neu erschlossenen, jahreszeitlich laminierten Seesedimenten aus Asien und Europa (Warven), zu neuen Eiskernen, und zeitlich hochauflösenden Sedimentprofilen aus dem Atlantik ermöglichen. Besonderer Wert soll dabei auf die klimatischen Wechselwirkungen zwischen der Nord- und Südhemisphäre und auf die Telekonnektionen zwischen Atlantik und Pazifik gelegt werden. Darüber hinaus sollen Möglichkeiten erforscht werden, Extremereignisse in der jüngeren Klimageschichte der letzten Jahrhunderte anhand von Dünenarchitekturen zu rekonstruieren.

spiegelerhöhung beitrug. Bislang konnte dieser Kollaps jedoch nicht durch „harte Daten“ bestätigt werden, weil einerseits verlässliche Eisbohrungen und datierte vertikale Strukturprofile auf einem Schnitt durch die Westantarktis fehlen und andererseits keine geeigneten Sedimentarchive aus dem Südpazifik zur Verifizierung existierten. In Anbetracht der prognostizierten Erwärmung zum Ende dieses Jahrhunderts gewinnen Fragen zur Instabilität des westantarktischen Eisschildes und damit verbundener Schwellenwerte im Klimasystem zunehmend an Bedeutung.

Eine Besonderheit unserer Initiative ist die Bündelung fachbereichübergreifender Expertise, die eine Verknüpfung von Modell- und Proxy-gestützten Klimarekonstruktionen aus unterschiedlichsten Archiven ermöglicht – aus Eiskernen, marinen und limnischen Sedimentkernen, sowie aus Dünen sand-Profilen. Geochemisch-physikalische Messungen an Proben aus diesen Archiven, sogenannte Proxydaten, ermöglichen die Rekonstruktion von Temperaturen, Niederschlägen, Vegetation, und anderen wichtigen Parametern zu Änderungen in der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation. Diese Daten sollen gemeinsam mit Szenarien von Klimamodellen unser Ver-

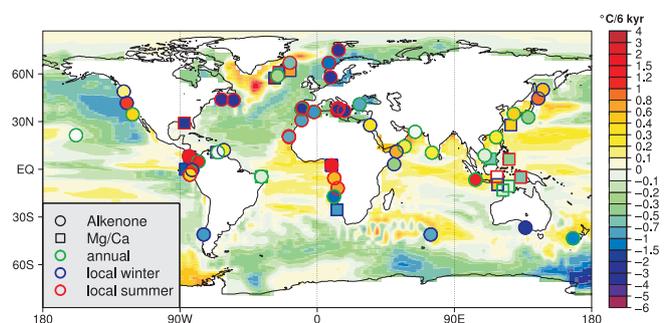


Abb. 8.4: Vergleich von rekonstruierten Temperaturtrends aus Proxydaten (Kreise und Rechtecke) und Modellsimulationen (ECHO-G) für den Zeitraum der letzten 7000 Jahre. Simulierte Temperaturtrends sind aus Jahresmitteltemperaturen errechnet. Farbige Rahmen von Rechtecken und Kreisen kennzeichnen die Jahreszeit, die am besten mit den Modelldaten übereinstimmt. (Grafik: Thomas Laepple und Gerrit Lohmann, AWI)



Nicht zuletzt werden durch den Klimawandel massive Landnutzungsänderungen erwartet, die ebenfalls zu veränderten Staubemissionen führen würden. In manchen Gebieten kann es zu einer veränderten Bodenerosion kommen.

Umgekehrt beeinflusst die Luftqualität aber auch das Klima. Die Emissionen von Großstädten, insbesondere Aerosole aber auch Ozon - das in der Troposphäre als ein starkes Treibhausgas agiert - verändern den atmosphärischen Strahlungstransport und wirken sich dadurch auf das regionale und sogar auf das globale Klima aus. Mögliche Wechselwirkungen und gegenseitige Beeinflussungen sind in Abbildung 9.2 schematisch dargestellt.

Im neuen Forschungsthema „Klimawandel und Luftqualität“ werden Helmholtz-Forscherinnen und Forscher die Zusammenhänge zwischen Regionalklima und Luftqualität untersuchen. Ziel dieser Arbeiten ist es, verlässliche Vorhersagen insbesondere darüber machen zu können, welche gesundheitlichen Folgen der regionale Klimawandel für die Bevölkerung vor allem in Städten und Ballungsgebieten hat. Innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft gibt es sich gegenseitig ergänzende, teilweise weltweit einzigartige Kompetenzen und Infrastrukturen, die hervorragend dazu geeignet sind, dieses komplexe und gesellschaftlich relevante Forschungsgebiet zu bearbeiten.

### Forschungsschwerpunkte:

Die vielseitigen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten im Forschungsthema „Klimawandel und Luftqualität“ werden in vier Forschungsschwerpunkten gebündelt, an denen gemeinsam gearbeitet wird:

- Klimawandel und Luftverschmutzung in urbanen Ballungsräumen und deren Einflussgebieten,
- Veränderungen der Luftqualität in Mitteleuropa unter dem zu erwartenden Klimawandel sowie Rückwirkungen auf biogene Emissionen,
- Abschätzung potentieller Gesundheitsbelastungen durch Allergene und Pollen in der Außenluft bei veränderten Klimabedingungen,
- Abschätzung potentieller Gesundheitsbelastungen durch Wetter und Luftschadstoffe in der Außenluft bei veränderten Klimabedingungen.

Dabei werden verschiedene Arbeitsmethoden bzw. -instrumente eingesetzt, die den unterschiedlichen Kompetenzen der beteiligten Forschungspartner entsprechen (Abb. 9.3).

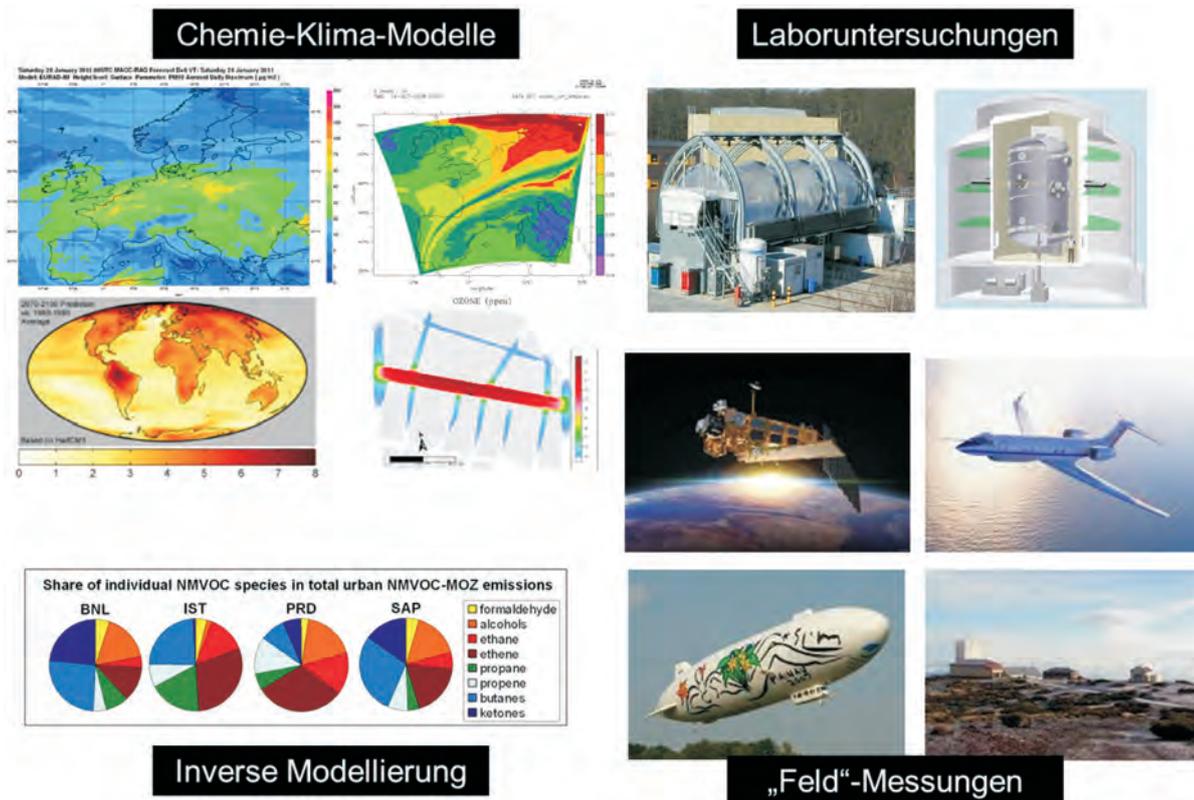


Abb. 9.3: Die im Forschungsthema „Klimawandel und Luftqualität“ benutzten Arbeitsmethoden bzw. -instrumente reichen von Chemie-Klima-Modellen auf verschiedenen Skalen über Laboruntersuchungen (insbesondere im Gesundheitsbereich) und Feldmessungen (dabei auch Satellitendaten sowie Messungen auf luftgestützten Plattformen) bis hin zur Verbesserung der Schadstoff-Emissionsratenbestimmung durch inverse Modellierung. (Grafik: Johannes Orphal, KIT)

## 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?*

## Mangelnde wissenschaftliche Grundlage der Klimaanpassungspolitik

Mittlerweile herrscht in Wissenschaft und Politik ein breiter Konsens, dass der Anpassung neben der Emissionsvermeidung eine essentielle Rolle in der Klimapolitik zukommt. Gemäß dem vierten Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) tritt der Klimawandel – bedingt durch anthropogene Treibhausgasemissionen – mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ein. Selbst wenn die internationalen Klimaschutzverhandlungen von Erfolg gekrönt sind, ist eine Trendumkehr der klimatischen Veränderungen in der kurzen bis mittleren Frist nicht zu erwarten. Bereits heute sind erste Folgen der klimatischen Veränderung, wie Extremereignisse (Überflutung, Hagel, etc.), Anstieg der Durchschnittstemperaturen und eine Veränderung der Niederschlagshäufigkeit und -verteilung spürbar (Abb.10.2). Somit gewinnt die Anpassungsstrategie für betroffene Interessengruppen und politische Entscheidungsträger auf verschiedensten Ebenen immer mehr an Bedeutung.

Allerdings hat die Erforschung der Klimaanpassung im Vergleich zu jener des Klimasystems und -schutzes noch einen großen Nachholbedarf. Folglich ermangelt die Anpassungs-

politik einer wissenschaftlichen Grundlage. Entscheidungen werden zumeist ad hoc getroffen, unter isolierter Betrachtung einzelner Aspekte des Klimawandels und ohne eine adäquate Berücksichtigung der immensen, dynamischen Risiken und Unsicherheiten, mit denen der Klimawandel und dessen Folgen behaftet sind. Die Weiterentwicklung der Anpassungsforschung ist unabdingbar, ansonsten könnten Wirtschaft und Gesellschaft erheblichen Schaden nehmen.

Dieser Herausforderung nimmt sich REKLIM Thema 10 an. Die wesentliche Aufgabe besteht darin, Wissenslücken zu schließen, bzw. fehlendes Wissen und damit verbundene Risiken an die breite Öffentlichkeit zu kommunizieren und Anpassungsstrategien auf wissenschaftlicher Basis zu entwickeln. Im Einzelnen gilt es die folgenden beiden Schritte zu vollziehen: Essentielle Prämisse einer erfolgreichen Klimaanpassung ist die Abschätzung und Bewertung der oben genannten, durch den Klimawandel bedingten dynamischen Risiken. Darauf aufbauend können Strategien, Management- und Entscheidungsunterstützungssysteme entwickelt werden, die eine wissenschaftlich fundierte und effiziente Klimaanpassungspolitik ermöglichen.

## Abschätzung und Bewertung dynamischer Risiken

Für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel müssen zahlreiche zukünftige Risiken in regionalen Bezügen abgeschätzt und bewertet werden. Das Infrastrukturproblem in der Wasserversorgung, beispielsweise, wird durch die mit dem Klimawandel einhergehende Zunahme der Wasserknappheit verschärft. Regionen mit wachsender Bevölkerung und wachsendem Einkommen sind hiervon stärker betroffen als schrumpfende Regionen. Die Abschätzung dieser gekoppelten dynamischen Risiken in regionalen Kontexten stellt gegenüber den verbreiteten statischen Risikoanalysen eine große Herausforderung für die Forschung dar (Abb. 10.1).

Mit Hilfe von hochauflösenden Klimarechnungen sowie Szenarien der sozioökonomischen Entwicklung (Landnutzung, Besiedlungsdichte und -struktur, Verkehrssysteme) können die gekoppelten Veränderungsprozesse analysiert werden, um integrierte Managementstrategien für die Anpassung zu entwickeln. Dies soll beispielhaft für Kommunen und Regionen im Verbund der beteiligten Helmholtz-Zentren umgesetzt werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung von meteorologischen Extremereignissen, insbesondere Seegang, Sturmflu-



Abb. 10.1: Infrastrukturen der Abwasserentsorgung erweisen sich bereits heute in schrumpfenden Regionen als überdimensioniert. Durch den Klimawandel sinkt das Wasserdargebot, so dass sich dieses ökonomische Risiko in Zukunft verschärfen könnte. Sollen Kläranlagen deshalb zukünftig für kleinere Kapazitäten ausgelegt werden? (Foto: © Gerda.G / PIXELIO)



Abb. 10.2: Hochwasser August 2002; Ölfilm in einer bäuerlichen Siedlung bei Segrehna. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

ten, Hochwasser, Starkwinde, Hagel, Inlandstürme, Blitze und Dürren. Diese Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit aber schweren Folgen lassen sich im Gegensatz zu häufigeren Ereignissen nur mit großen Unsicherheiten abschätzen. Angestrebt wird eine Vertiefung der Zusammenarbeit zwischen natur- und sozialwissenschaftlichen Ansätzen innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft, um diese Unsicherheiten begrenzen bzw. genauer bestimmen zu können.

Die bisherigen Risikomodelle und Schadensbewertungen vernachlässigen auch die systemischen Zusammenhänge zwischen den Risikoelementen, wie z.B. die Rolle kritischer Infrastrukturen (Strom- und Wasserversorgung) und das Verhalten von Netzwerken unter Extremereignissen. Auch hier soll durch gemeinschaftliche Forschungsanstrengungen das Verständnis von Kaskaden-, Ansteckungs- und indirekten Effekten aus meteorologischen Extremereignissen verbessert werden.

### Risikomanagement und Anpassung unter Unsicherheit

Trotz methodischer Fortschritte können Risiken nach wie vor nur mit hohen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Dies trifft insbesondere auf dynamische und systemische Risiken zu, da sich die Zusammenhänge gekoppelter Risiken nur grob prognostizieren lassen. Neben der Verbesserung der Risikoabschätzung besteht deshalb eine weitere Herausforderung darin, politische Entscheidungsträger im Management von Risiken unter diesen hohen Unsicherheiten zu unterstützen.

Hierbei sollen das ganze Spektrum des Risikomanagementzyklus mit allen Aspekten (Frühwarnung, technische und administrative Vorsorge, Schadensminderung, usw.) sowie ökonomische und rechtliche Instrumente als auch Akzeptanz- und Umsetzungsaspekte Berücksichtigung finden (Abb. 10.3).

Anpassungsstrategien sollen auf unterschiedlichen Governance-Ebenen (Kommunen, Ländern, Wassereinzugsgebieten usw.) mittels Kosten-Nutzen-Analysen und Multikriterienanalysen bezüglich ihrer Effizienz, aber auch in Bezug auf ihre Flexibilität bzw. Robustheit gegenüber unerwarteten Systemänderungen bewertet und priorisiert werden. Neben ökonomischen Risikokriterien gilt es dabei auch soziale und ökologische Risikokriterien im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu berücksichtigen. Ziel ist die Konzeption von geeigneten Formen des individuellen, organisatorischen aber auch kollektiven Umgangs mit unsicheren Risikoentwicklungen, mit einem Schwerpunkt auf dialogorientierten Kommunikationsformen für den Umgang mit unerwarteten und überraschenden Ereignissen.

Mit Hilfe von internationalen Best-Practice-Studien sowie Studien zum Wissenstransfer im Kontext regional-kulturell unterschiedlicher Wahrnehmungsmuster soll insbesondere überprüft werden, inwieweit die Anpassungskapazität einer regional-kulturell verankerten Gesellschaft vom kollektiven Gedächtnis und von entsprechenden Wahrnehmungsmustern abhängig ist und wie dies auf die Managementpraxis in der Klimaanpassung einwirkt.

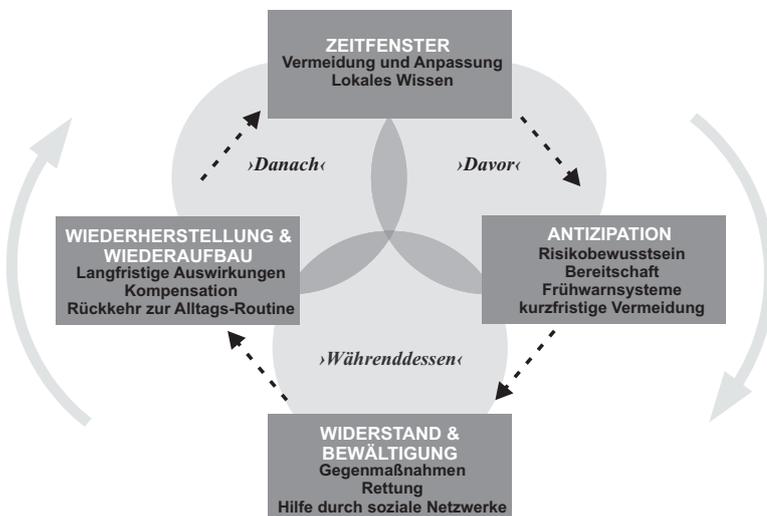


Abb. 10.3 illustriert am Beispiel von Hochwasserrisiken die verschiedenen Phasen des Risikomanagementzyklus. Vor der Überflutung gilt es u.a., das Risikobewusstsein und die Bereitschaft der gefährdeten Bevölkerung zu fördern und Frühwarnsysteme zu implementieren (Antizipation). Während der Überflutung müssen geeignete Gegenmaßnahmen und Rettungsaktionen eingeleitet werden (Widerstand und Bewältigung). Nach Abklingen der Überflutung ist der Fokus auf die Wiederherstellung bzw. den Wiederaufbau gerichtet, wobei die Flutopfer zu kompensieren sind. Wurden diese Aufgaben bewerkstelligt, so ergibt sich ein Zeitfenster, um die aus der Überflutung gewonnenen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen für die Konzeption und Implementierung von Vermeidungs- und Anpassungsstrategien und -maßnahmen zu nutzen. (Quelle: Steinführer et al., 2009, UFZ; eigene Übersetzung)

# Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg

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

Das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg am AWI gehört zum „Netzwerk der Regionalen Helmholtz-Klimabüros“. Das Klimabüro verfolgt das Ziel, Forschungsergebnisse des AWI zum Klimawandel verständlich aufzubereiten und zu vermitteln. Die Kommunikation aus der Wissenschaft in die Gesellschaft wird durch die Durchführung verschiedener Projekte in Kooperation mit den unterschiedlichsten Partnern gefördert. Das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg leitete und koordinierte die Erstellung der Broschüre „Klimaforschung am Alfred-Wegener-Institut – die polare Perspektive“, welche einen Einblick über die Klimaforschung am AWI bietet. Für das Forum Jugend des 32. Deutschen Evangelischen Kirchentags in Bremen entwickelten Schüler des Schulzentrums Utbremen gemeinsam mit dem Klimabüro ein „Klimainformationszelt“ (Abb. K.1). Aus dieser Zusammenarbeit entstand das Projekt „ClimateXperience“, das Jugendlichen die Möglichkeit bietet, weltweit persönliche Kontakte zu knüpfen, um Alltagserfahrungen über den Klimawandel auszutauschen. Hiermit soll u. a. das Thema Klimagerechtigkeit erlebbar gemacht werden. In diesem Kontext realisierten die Schüler des Schulzentrums Utbremen eine Kunstausstellung zum Klimawandel (Abb. K.2). Des Weiteren war das Klimabüro an der Erstellung der „Konzeptstudie Klimastadt Bremerhaven“ beteiligt, die vom Magistrat der Stadt Bremerhaven in Auftrag gegeben worden war. Mit dieser Studie sollen die Alleinstellungsmerkmale Bremerhavens im Bereich der Klimakompetenzen herausgearbeitet, anwendungsorientierte Potenziale für Bremerhaven und die Region identifiziert und Empfehlungen für zusätzliche Maßnahmen und Entwicklungsschritte formuliert werden. Die Mitwirkung an der Konzeptstudie ist ein Beispiel für die Einbindung des AWI in die lokalen und regionalen Klimaaktivitäten.



Abb. K.1:  
Prof. Peter Lemke  
(Leiter Fachbereich  
Klimawissenschaften  
am AWI) im Gespräch  
mit den Jugendlichen  
des Schulzentrums  
Utbremen im Klima-  
informationszelt.  
(Foto: Renate Treffeisen, AWI)



Abb. K.2: Beispiel aus der Schülerausstellung „Klimawandel – hier und anderswo“ in der Kulturkirche St. Stephani im Rahmen des Projektes „ClimateXperience“. (Foto: Fritz Heidorn, Sustainability Center Bremen)

Gemeinsam mit dem British Council Berlin veranstaltete das Klimabüro ein zweitägiges Seminar in Berlin. Eingeladen wurden jugendliche Teilnehmer und Projektleiter verschiedener Programme, deren gemeinsamer Fokus auf „youth leadership“ in der Arktis liegt (Abb. K.3). Ziel des Seminars war es, zu ermitteln, wie diese Programme die Erfordernisse von Ausbildung, Engagement und Kommunikation erfüllen. In diesem Rahmen fand eine, sich an die breite Öffentlichkeit richtende Abendveranstaltung in der Britischen Botschaft statt, in der führende Persönlichkeiten aus den Bereichen Klimaforschung, Wirtschafts- und Sozialwissenschaft über die Ergebnisse des Weltklimagipfels in Kopenhagen diskutierten.

Neben diesen ausgewählten Projekten bereitet das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg themenspezifische Fragestellungen und Aspekte innerhalb von REKLIM auf und unterstützt die Kommunikation von Ergebnissen aus REKLIM in die Öffentlichkeit.



Abb. K.3: Teilnehmer des Workshops „Action for the Arctic“ in Berlin. (Foto: British Council Berlin)

# Norddeutsches Klimabüro

*Partner für Klimafragen in Norddeutschland*

Das Norddeutsche Klimabüro des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und des KlimaCampus Hamburg führt seit 2006 einen intensiven Dialog zwischen der norddeutschen Öffentlichkeit, regionalen Entscheidern und Wissenschaftlern aus dem Bereich Klimaforschung. Wissenschaftler des Norddeutschen Klimabüros werden durchschnittlich einmal pro Woche von verschiedensten gesellschaftlichen Gruppen aus Wirtschaft, Politik Verwaltung, Verbänden und Vereinen eingeladen, um sich vor Ort mit Menschen aus der Region auszutauschen und über Chancen und Risiken des Klimawandels zu informieren. Darüber hinaus beantwortet das Klimabüro im Schnitt jede Woche eine inhaltliche Kundenanfrage, die über die allgemein diskutierten Fakten hinausgeht. Die wissenschaftlichen Grundlagen kommen dabei zumeist aus dem Institut für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, dem KlimaCampus Hamburg und dem REKLIM-Verbund und werden für Norddeutschland aufbereitet und interpretiert.

In Norddeutschland wird der menschengemachte Klimawandel zwar als ein Problem wahrgenommen, aber es fehlt an praktisch anwendbarem Wissen zum Umgang mit den regionalen Besonderheiten des Klimawandels. Denn selbst unter der optimistischen Annahme, dass die anthropogene Erwärmung auf stabile 2 Grad zum Ende des 21. Jahrhunderts begrenzt werden könne, ergibt sich insbesondere in Bereichen wie Stadtplanung, Landwirtschaft und Küstenschutz ein deutlicher Anpassungsdruck. Das Norddeutsche Klimabüro vermittelt wissenschaftlich konsolidiertes Wissen in die Praxis, um so die Entwicklung problemangemessener Anpassungsstrategien zu ermöglichen.

Heute hält das Norddeutsche Klimabüro insbesondere folgende Informationsangebote bereit:

- Im Juli 2009 hat das Norddeutsche Klimabüro einen interaktiven „Norddeutschen Klimaatlas“ im Internet veröffentlicht, der unter „[www.norddeutscher-klimaatlas.de](http://www.norddeutscher-klimaatlas.de)“ Informationen über mögliche künftige Klimaänderungen in Norddeutschland bereit stellt. Nutzer erhalten wissenschaftlich solide Antworten in Form von Karten und verständlichen Zusammenfassungen. Der Klimaatlas wird fortlaufend aktualisiert und erweitert.
- Zum Umgang mit Klimaszenarien als Planungsgrundlage hat das Norddeutsche Klimabüro ein Informationsblatt „Regionale Klimaszenarien in der Praxis – Beispiel Nord-



Abb. K.4: Der Klimabericht für die Metropolregion Hamburg kann unter „[www.klimabericht-hamburg.de](http://www.klimabericht-hamburg.de)“ eingesehen werden.

deutschland“ erarbeitet, in dem auf die Unterschiede zwischen Vorhersagen und Szenarien und der Bedeutung von Spannbreiten eingegangen wird. Zudem werden wichtigste Klimaänderungen für Norddeutschland zusammengefasst.

- Anlässlich einer Anhörung des Schleswig-Holsteinischen Landtages zur Zukunft des Küstenschutzes im Mai 2009 hat das Norddeutsche Klimabüro den aktuellen Forschungsstand in einer Broschüre „Nordseesturmfluten im Klimawandel“ zusammengefasst, die im Internet oder direkt beim Norddeutschen Klimabüro erhältlich ist.
- Im November 2010 ist der „Klimabericht für die Metropolregion Hamburg“ im Springer-Verlag erschienen (Abb. K.4). Mehr als 30 Wissenschaftler aus 15 Forschungseinrichtungen haben in Fachzeitschriften veröffentlichte Ergebnisse aus der Forschung zu Klima, Klimawandel und Klimafolgen in der Hamburger Metropolregion gebündelt, gegenübergestellt und diskutiert. Der Klimabericht wurde wissenschaftlich begutachtet. Der gesamte Entstehungsprozess wurde durch das Norddeutsche Klimabüro koordiniert.

# 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 Wasserqualität und -quantität (Abb. K.5), Biodiversität und Auswirkungen auf Gesellschaft und Ökonomie. 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. Der Dialog mit der Gesellschaft findet mit sehr unterschiedlichem Zielpublikum statt. Dies wird an einigen Beispielen des letzten Jahres aufgezeigt. Im Februar 2011 fand das Fachkolloquium „Wald & Klima“ der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei auf Einladung des Thüringer Ministers für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz, Jürgen Reinholz, statt. Die Eröffnung des fachlichen Teils wurde durch das Mitteldeutsche Klimabüro vorgenommen. Im Anschluss fand eine rege Diskussion zu Klimafolgen und Anpassungsstrategien sowohl mit politischen Entscheidungsträgern als auch mit den zahlreichen Teilnehmern der privaten Waldbesitzer Thüringens statt.



*Abb. K.5: Staubtrockene Böden als Ausdruck der sommerlichen Trockenheit im Mitteldeutschen Raum, die schon heute eine große Herausforderung darstellt. (Foto: André Künzelmann, UFZ)*



*Abb. K.6: Teilnehmer des Workshops mit regionalen Stakeholdern zur Entwicklung von Landnutzungsszenarien für Mitteldeutschland bis 2050. (Foto: Klaus-Dieter Sonntag/fotoplusdesign.de)*

Auch der Austausch mit privatwirtschaftlichen Betrieben aus der Region wurde im letzten Jahr vorangetrieben. Hier lag der Schwerpunkt der Anfragen an das Klimabüro im Bereich der Wasserwirtschaft. So wurden Veranstaltungen der Stadtwerke Halle als regionaler Versorger und der Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH als überregionaler Trinkwasserversorger durch Beiträge unterstützt. Gleichzeitig wurde hier der Forschungsbedarf definiert. Es hat sich zum Beispiel das Interesse am Zusammenspiel von Klimawandel mit dem durch das Ende des Braunkohletagebaus bedingten steigenden Grundwasser in Mitteldeutschland gezeigt. In zahlreichen öffentlichen Veranstaltungen wie den „Langen Nächten der Wissenschaften“ in Halle und Leipzig wurde der Stand der Klimawissenschaft in die Bevölkerung getragen.

Im wissenschaftlichen Bereich wurde unter anderem im Projekt „Innovative Ansätze der ökonomischen Anpassungsforschung mit Bezug zu Sachsen-Anhalt“ für das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt mitgearbeitet und die Entwicklung von Landnutzungsszenarien für Mitteldeutschland am UFZ unterstützt (Abb. K.6). Die gewonnen Erkenntnisse werden wiederum als wissenschaftliche Basis in den zukünftigen Dialogprozess mit regionalen Akteuren eingespeist und damit der gemeinsame Weg zur regionalen Anpassung an den Klimawandel bereitet.

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

Die Klimaänderung stellt für die Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und die gesamte Gesellschaft auf internationaler, nationaler sowie regionaler Ebene eine große Herausforderung dar. Deswegen besteht ein wachsender Kommunikationsbedarf zwischen Experten der Klimawissenschaften auf der einen und gesellschaftlichen Gruppen auf der anderen Seite. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, vermittelt das Süddeutsche Klimabüro Forschungsergebnisse, die zum Thema Klimawandel am Karlsruher Institut für Technologie sowie weiteren Einrichtungen im süddeutschen Raum erarbeitet werden, in verständlicher Form an vom Klimawandel betroffene gesellschaftliche Gruppen. Das KIT-Zentrum „Klima und Umwelt“, dem das Süddeutsche Klimabüro zugehörig ist, spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Zudem wird im Dialog mit der Gesellschaft Forschungsbedarf ermittelt und an die entsprechenden Einrichtungen kommuniziert. Schwerpunkt dabei ist die regionale Klimaforschung. Hier knüpft das Süddeutsche Klimabüro direkt an den REKLIM-Verbund an und ist Sprachrohr für die spezifischen Aspekte, insbesondere der Themen 5 und 6.

Aktuelle Arbeiten, die die Kommunikation in die Gesellschaft aufzeigen, sind beispielsweise der Workshop „Nachhaltig Bauen im Kontext des Klimawandels“, der Waldtag in Karlsruhe



Abb. K.7: Vom Globalen zum Regionalen. Die regionale Klimamodellierung ermöglicht es, hoch aufgelöste Klimasimulationen bereit zu stellen, die Aussagen über zukünftige Klimaänderungen auf regionaler Skala erlauben. Das Süddeutsche Klimabüro vermittelt diese Informationen an verschiedene Nutzer im süddeutschen Raum. (Grafik: Hans Schipper, KIT)



Abb. K.8: Beispiel einer Rinnenerosion in Weinbergschlucht nach Starkregen. (Foto: © LUBW; Autor: C. Ritter)

sowie die internationale Konferenz „Climate and Constructions“. Durch Projekte wie „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ oder „Bestandsaufnahme von klimatologischen Messdaten für Baden-Württemberg und Erstellung einer Metadatenbank“ verstärkt das Süddeutsche Klimabüro die Vermittlung von Forschungsbedarf.

In diesem Kontext nimmt die regionale Klimamodellierung eine besondere Rolle ein. Sie reicht von Grundlagenforschung (z.B. Modellweiterentwicklung; Abb. K.7) bis hin zur Anpassungsforschung an den Klimawandel (z.B. LUBW-Projekt „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaänderungen“; Abb. K.8). Mithilfe hoch aufgelöster Klimasimulationen können nutzerorientierte und regional spezifische Aussagen über zukünftige Klimaänderungen gemacht werden. Das Süddeutsche Klimabüro bringt die regionale Klimamodellierung und die Klimaforschung mit den Anforderungen aus den verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen zusammen.

Neben diesem Themenschwerpunkt besitzt das Süddeutsche Klimabüro sieben weitere, die den Informationsbedarf der Öffentlichkeit in Bezug auf klimarelevante Themen widerspiegelt. Diese Themenbereiche gliedern sich in „Klima und Bauwesen“, „Klima und Energie“, „Klima und Luftschadstoffe“, „Klima und Wald“, „Klima und Wetterextreme“, „allgemeine Klimainformationen“ sowie „aktuelle Klimainformationen“.

## Ausblick



Die Anpassung an Klimaschwankungen hat für den Menschen in der Vergangenheit immer eine wichtige Rolle gespielt und ihn häufig gezwungen, unwirtliche Regionen zu verlassen. Auch die moderne Gesellschaft wird trotz allen technologischen Fortschritten von Klimaänderungen beeinträchtigt. Dies gilt insbesondere für die in den vergangenen tausend Jahren an den Küsten entstandenen Infrastrukturen, die durch den seit einigen Jahrzehnten wieder stärker steigenden Meeresspiegel bedroht sind. Kenntnisse über kommende Klimaschwankungen sind in der Gesellschaft von großem Nutzen für eine angemessene und wirkungsvolle Zukunftsvorsorge.

Mit der Erweiterung des Forschungsverbundes um drei weitere Themengebiete und die Einbindung von Forschern an Hochschulen und Universitäten ist die Grundlage geschaffen, belastbare Aussagen für die gegenwärtige und zukünftige Ausprägung von Klimaveränderungen in unterschiedlichen Regionen abzuleiten. Forscherinnen und Forscher der Helmholtz-

Gemeinschaft werden so die wissenschaftliche Grundlage für Anpassungsstrategien entwickeln können. Der Fokus liegt hierbei darauf, den Klimawandel und die sozioökonomischen Veränderungen gemeinsam zu betrachten. Solche Veränderungen betreffen beispielsweise die Landnutzung, den Verkehr oder die Besiedlung. An den Helmholtz-Zentren werden Modelle und Szenarien entwickelt, die all diese Faktoren berücksichtigen. Zudem werden die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Strategien zur Anpassung an den Klimawandel entwickeln. Dabei berücksichtigen sie gleichermaßen verschiedene Klimaszenarien und unterschiedliche Modelle zur Entwicklung der Gesellschaft. In den Simulationsrechnungen sollen so verschiedenste Risikoentwicklungen betrachtet werden, wie zum Beispiel Sturmfluten, extremer Seegang, Starkwinde, Hagel, extreme Dürren und Hochwasser.

# 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: Hans Oerter.

## Referenzen:

- Albrecht, F., T. Wahl, J. Jensen, and R. Weisse, 2011: Determining sea level change in the German Bight. *Ocean Dynamics*, in press, doi: 10.1007/S10236-011-0692-Z
- Eremenko, M., G. Dufour, G. Foret, C. Keim, J. Orphal, M. Beekmann, G. Bergametti, and J. M. Flaud, 2008: Tropospheric ozone distributions over Europe during the heat wave in July 2007 observed from infrared Nadir spectra measured by IASI, *Geophysical Research Letters*, 35, L18805, doi:10.1029/2008GL034803.
- Granier, C., B. Bessagnet, T. Bond, A. D'Angiola, H. D. van der Gon, G. Frost, A. Heil, J. W. Kaiser, S. Kinne, Z. Klimont, S. Kloster, J.-F. Lamarque, C. Lioussé, T. Masui, F. Meleux, A. Mieville, T. Ohara, J.-C. Raut, K. Riahi, M. Schultz, S. J. Smith, A. Thomson, J. van Aardenne, G. R. van Aardenne, D. P. van Vuuren, 2011: Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions at global and regional scales during the 1980-2010 period, *Climatic Change*, in press.
- Haverd, V. and M. Cuntz, 2010: Soil-Litter-Iso: A one-dimensional model for coupled transport of heat, water and stable isotopes in soil with a litter layer and root extraction, *Journal of Hydrology*, 388 (2010), 438–455, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.029.
- Meehl, G. A., J. A. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi, and H. von Loon, 2009: Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing, *Science*, 325 (5944), 1114–1118, DOI:10.1126/science.117287.
- North Greenland Ice Core Project Members, 2004: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature* 431, 147–151, doi:10.1038/nature02805.
- Samaniego, L., R. Kumar, and S. Attinger, 2010: Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale, *Water Resources Research*, 46, W05523, doi:10.1029/2008WR007327.
- Schmidt, T., J.-P. Cammas, H. G. J. Smit, S. Heise, J. Wickert, A. Haser, 2010: Observational characteristics of the tropopause inversion layer derived from CHAMP/GRACE radio occultations and MOZAIC aircraft data, *Journal of Geophysical Research*, 115, D24304, doi:10.1029/2010JD014284.
- Seppälä, A., C. E. Randall, M. A. Clilverd, E. Rozanov, and C. J. Rodger, 2009: Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, 114 (A10), A10312. 10pp. DOI:10.1029/2008JA014029.
- Steinführer, A., C. Kuhlicke, B. De Marchi, A. Scolobig, S. Tapsell, and S. Tunstall, 2009: Local communities at risk from flooding: social vulnerability, resilience and recommendations for flood risk management in Europe. Leipzig: Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, 88 S. [http://www.ufz.de/data/Task11\\_Broschuere\\_7-0911060.pdf](http://www.ufz.de/data/Task11_Broschuere_7-0911060.pdf)
- Zahn, M. and H. von Storch, 2008: A long-term climatology of North Atlantic polar lows. *Geophysical Research Letters*, 35, L22702, doi: 10.1029/2008GL035765.
- Zahn, M. and H. von Storch, 2010: Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature*, 467, 309–312, doi:10.1038/nature09388.

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)

