

REKLIM

Helmholtz-Verbund
Regionale Klimaänderungen

HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL

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



HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

Unser Klima – Unsere Zukunft

Komplexe Wechselwirkungen mit weitreichenden Auswirkungen

Klimaschwankungen sind eine wesentliche Eigenschaft der Erde. Sie werden durch direkte Messungen, durch Chroniken und biologisch-geologische Archive in Baumringen, Korallen, Eis- und Sedimentkernen dokumentiert. Klimaschwankungen erstrecken sich auf Zeitskalen von Wochen bis zu Jahrtausenden, wobei der heutige Zustand des Klimas das Ergebnis einer 4,5 Milliarden Jahre andauernden, kontinuierlichen Entwicklung ist. Ausgeprägte Klimaschwankungen mit sehr sichtbaren Folgen hat es in der Erdgeschichte reichlich gegeben, und sie waren immer eine Herausforderung für das Leben auf der Erde und sicherlich auch für den Menschen. Eindrucksvolle Beispiele sind die vergangenen Eiszeitzyklen, in denen große Teile der nördlichen Kontinente zeitweise von großen Eisschilden bedeckt waren und der Meeresspiegel in den Warmzeiten einige Meter höher und in den Eiszeiten etwa 120 Meter tiefer gewesen ist.

Klimaschwankungen waren ein wesentlicher Teil der Entwicklungsgeschichte der Erde, und sie werden uns auch in Zukunft begleiten. In der Vergangenheit sind Klimaschwankungen ausschließlich durch natürliche Prozesse entstanden. Sie waren eine Folge von externen Anregungen (z. B. Änderungen der Erdbahnparameter, Vulkanausbrüche und kleine Änderungen der solaren Strahlungsleistung) und von internen Wechselwirkungen im Klimasystem, das durch die Atmosphäre, die Eismassen, den Ozean, die Landoberflächen und alle Lebensformen auf den Kontinenten und im Meer gebildet wird.

Seit kurzer Zeit hat sich der Mensch durch die immens gestiegene Weltbevölkerung und die rasante technologische Entwicklung in die Lage versetzt, aktiv und effektiv das Klimageschehen mitzugestalten. So ist die globale Erwärmung der vergangenen 50 Jahre zum größten Teil durch den Menschen verursacht, insbesondere durch die stetig steigenden Emissionen von Kohlendioxid aufgrund der intensiven Nutzung fossiler Energieträger und der Änderungen der Landoberfläche durch Landwirtschaft, Industrie und Besiedlung. Durch diesen vom Menschen verursachten Klimawandel wird in den nächsten 100 Jahren eine deutliche Erwärmung von global etwa 3°C erwartet. Detaillierte Untersuchungen über die physikalischen Ursachen von Klimaschwankungen und die Antwort des Klimasystems auf menschliche Eingriffe sind zurzeit Gegenstand der nationalen und internationalen Klimaforschung (World Climate Research Programme, <http://www.wcrp-climate.org/>). Eine aktuelle Zusammenfassung des gegenwärtigen Wissens über das Klimasystem ist im Fourth Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (<http://www.ipcc.ch>) dargestellt.



Herausforderung Klimawandel

Klimaforschung im Verbund



Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Eis, Ozean und Landoberflächen bestimmen das Klimageschehen der Erde. Globale Klimamodelle haben in den vergangenen Jahren erfolgreich geholfen, ein erstes Verständnis großskaliger natürlicher Klimaschwankungen und des menschlichen Einflusses auf das Klima aufzubauen. Allerdings sind viele Prozesse, die das Klima auf verschiedenen Skalen beeinflussen, noch nicht gut erforscht. Aktuell existiert in der Wissenschaft ein breiter Konsens, dass die gegenwärtige Erwärmung der Erde mit hoher Wahrscheinlichkeit überwiegend auf erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen und auf veränderte Landnutzung zurückzuführen ist. Die konkreten Auswirkungen auf einzelne Regionen sind jedoch bisher wenig verstanden. Ob der Klimawandel beispielsweise bedingt, dass in einer Region die Sommer trockener oder die Winter feuchter werden, ist wissenschaftlich nicht ausreichend abgesichert. Für die landwirtschaftliche Nutzung ist aber genau diese Frage entscheidend. Ebenso sind für politische und wirtschaftliche Entscheidungsprozesse zum Beispiel detaillierte Szenarien zur Erhöhung des Meeresspiegels wichtig, um die Küstenschutzmaßnahmen entsprechend anpassen zu können.

Acht Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft haben sich zum *Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen (REKLIM)* zusammengeschlossen, um unter anderem auf folgende Fragen Antworten zu finden: Wie hängt die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre-Ozean-Eis und Landoberflächen ab? Welchen Einfluss haben natürliche und anthropogene Prozesse? Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen (insbesondere von Grönland) und wie reagiert der Meeresspiegel auf Schmelzwasser und Erwärmung? Welche

spezifischen Änderungen folgen aus dem Klimawandel für Boden, Ozean und Atmosphäre der Schelfmeere und Permafrostregionen in der Arktis und welche Wechselwirkungen gibt es? Was sind die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosystem, Wasserressourcen, Land- und Forstwirtschaft und wie beeinflussen diese wiederum das Klima? Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst? Wie wird sich die Ausprägung und Häufigkeit extremer Wetterereignisse in einem zukünftigen Klima verändern? Integrierte Klimapolitik heißt Vermeidung (Mitigation) von Treibhausgasemissionen und Anpassung (Adaptation) an den Klimawandel. Gibt es dafür einen optimalen Weg?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden die Wissenschaftler der acht Zentren die Datengrundlage für ihre Modellrechnungen verbessern, weil nur so räumlich hochaufgelöste Analysen und Szenarien erstellt werden können. Detaillierte Beobachtungen und Prozessstudien sollen zu optimierten gekoppelten Klimamodellen führen, die aufzeigen, wie sich geänderte Bedingungen im Klimasystem regional und lokal auswirken. Somit wird es den Forschern zukünftig möglich sein, Politik, Wirtschaft, Behörden und die breite Öffentlichkeit mit wissenschaftlich fundierten Daten und Szenarien bei Entscheidungen zur Regionalentwicklung besser zu beraten.

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

AWI | DLR | FZJ | GFZ | GKSS | HMGU | 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*
- GKSS-Forschungszentrum Geesthacht*
- Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt*
- Karlsruher Institut für Technologie*
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

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

<i>Wie hängt die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre-Ozean-Eis und Landoberflächen ab? Welchen Einfluss haben natürliche und anthropogene Prozesse?</i>	1	<i>Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme</i>	6
<i>Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen (insbesondere von Grönland) und wie reagiert der Meeresspiegel auf Schmelzwasser und Erwärmung?</i>	2	<i>Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz</i>	8
<i>Welche spezifischen Änderungen folgen aus dem Klimawandel für Boden, Ozean und Atmosphäre der Schelfmeere und Permafrostregionen in der Arktis und welche Wechselwirkungen gibt es?</i>	3	<i>Regionale Klimaänderungen in der Arktis: Steuerung und Langzeiteffekte am Übergang Land-Ozean</i>	10
<i>Was sind die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosystem, Wasserressourcen, Land- und Forstwirtschaft und wie beeinflussen diese wiederum das Klima?</i>	4	<i>Die Landoberfläche im Klimasystem</i>	12
<i>Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst?</i>	5	<i>Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala</i>	14
<i>Wie wird sich die Ausprägung und Häufigkeit extremer Wetterereignisse in einem zukünftigen Klima verändern?</i>	6	<i>Extreme Wetterereignisse - Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren</i>	16
<i>Integrierte Klimapolitik heißt Vermeidung (Mitigation) von Treibhausgasemissionen und Anpassung (Adaptation) an den Klimawandel. Gibt es dafür einen optimalen Weg?</i>	7	<i>Sozioökonomie und Management für regionale Klima-Anpassungs- und Vermeidungsstrategien</i>	18
		<i>Das Netzwerk der regionalen Helmholtz-Klimabüros</i>	20

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?

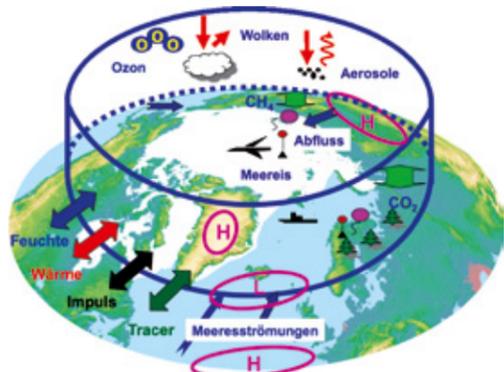


Abb. 1.1: Das gekoppelte Klimasystem und seine Antriebskräfte für die Modellregion Arktis. (Grafik: Klaus Dethloff)

Das Erdklima wird überwiegend durch die großräumigen Strukturen atmosphärischer Zirkulationsmuster und ihre zeitlichen Veränderungen geprägt. Klimavariationen auf saisonalen und dekadischen Zeitskalen werden sowohl durch externe und anthropogen erzeugte Klimavariabilität als auch durch die globale Dynamik des gekoppelten Klimasystems mit all seinen Komponenten beeinflusst. Eine enge Verknüpfung zwischen Modellierung und Beobachtung ist erforderlich, um dynamische und chemische Prozesse in der Atmosphäre zu analysieren, den Einfluss der Eisbedeckung und ozeanischer Prozesse auf die Atmosphäre zu quantifizieren und die Wechselwirkungen zwischen Landoberflächen, Böden, Vegetation und Atmosphäre zu untersuchen. Gleichzeitig muss die natürliche Variabilität des Klimasystems berücksichtigt werden, das eine Veränderlichkeit auf der Zeitskala von Jahreszeiten (saisonal) bis zu Jahrzehnten (dekadisch) in nichtlinearer Reaktion auf atmosphärische Fluktuationen auf der Zeitskala von Tagen zu Wochen zeigt.

Um derartige Untersuchungen durchführen zu können, werden hochaufgelöste gekoppelte Klimamodelle für die Anwendung auf der regionalen Skala, sogenannte regionale Erdsystemmodelle (RESM¹) entwickelt, die im Rahmen von REKLIM auf einzelne Regionen in der Art eines Vergrößerungsglases angewendet werden und es erlauben, regionale Klimadaten mit hoher räumlicher Auflösung zu erzeugen (Abb. 1.2). Dies ist insbesondere für regionale Entscheidungsträger von Bedeutung und Nutzen. Spezielle Untersuchungsgebiete sind hier die Arktis, Europa und Deutschland.

Die regionalen Erdsystemmodelle bestehen aus Atmosphärenmodellen hoher Auflösung und Modellen für Ozean, Meereis, Landoberfläche, Boden, *Aerosolchemie*², Vegetation und weiteren Komponenten (Abb. 1.1). Die Modelle basieren auf mathematisch-physikalischen Grundgleichungen in hydrostatischen oder nichthydrostatischen Näherungen und parametrisierten Prozessbeschreibungen, die durch Vergleich mit Daten aufwändig validiert werden müssen.

Im Rahmen von *Ensemblesimulationen*³, bei denen ein Klimamodell mehrfach mit veränderten Start- oder Randbedingungen läuft, wird untersucht, wie die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre, Ozean, Eis und den Landoberflächen abhängt und welchen Einfluss natürliche und anthropogene Prozesse haben. Dabei sollen noch bestehende Unsicherheiten bei der regionalen Klimamodellierung reduziert und möglichst robuste Aussagen abgeleitet werden.

Das Alfred-Wegener-Institut (AWI) fokussiert auf RESM in der Arktis, das Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) 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. Dabei bilden Landoberflächen- und Bodenmodelle eine wichtige Schnittmenge zwischen den beteiligten Institutionen und stehen im Mittelpunkt der Kooperation. In Abbildung 1.3 sind die vielfältigen Arbeitspakete von Thema 1 innerhalb von REKLIM dargestellt. Ihre gegenseitige Vernetzung, die Einbindung von verschiedenen Datensätzen und

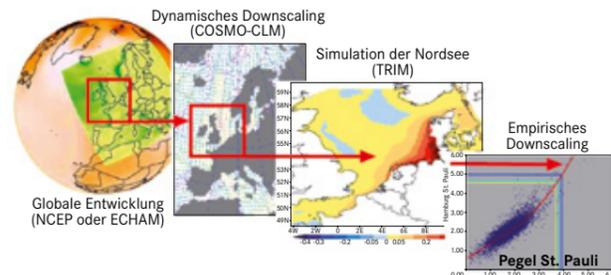


Abb. 1.2: Dynamische Downscalingkaskade („Vergrößerungsglas“) mit regionalen Klimamodellen für Europa und die Nordsee. In Klammern die Akronyme der verwendeten Modelle. (Grafik: Hans von Storch)

die Anbindung an globale Modellsimulationen ist aufgezeigt. Folgende wissenschaftliche Schnittmengen werden zwischen den beteiligten Helmholtz-Zentren gemeinsam bearbeitet:

Atmosphäre-, Ozean-, Meereis- und Permafrostfeedbacks

Die Simulation der arktischen Meereisbedeckung mit gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Meereismodellen ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Durch die Kombination verbesserter *Parametrisierungen*⁴ für das Eiswachstum, die Schnee- und *Eisalbedo*⁵ und die Schneebedeckung auf der Eisoberfläche soll eine realistischere Darstellung dieser Rückkopplungsprozesse im gekoppelten regionalen Klimamodell *HIRHAM-NAOSIM*⁶ erreicht werden. Die Simulation von Landoberflächen- und Bodenprozessen in arktischen *Permafrostregionen*⁷ ist ein wichtiger Aspekt in der regionalen Klimamodellierung der Arktis, bei der die Entwicklung eines modularen regionalen Erdsystemmodells der Arktis mit Komponenten für Permafrost weitergeführt werden soll. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit eines RESM von einer realitätsnahen Darstellung von Rückkopplungsprozessen zwischen den einzelnen Modellkomponenten (Atmosphäre: *HIRHAM*, Ozean und Meereis: *NAOSIM* und Permafrostböden: *LSM*⁸) abhängt. Für die Nord- und Ostsee wird das regionale Atmosphärenmodell *COSMO-CLM*⁹ gleichfalls mit einem regionalen Ozeanmodell und einem Meereismodell gekoppelt. Ziel ist eine bessere zeitliche und räumliche Simulation regionaler Besonderheiten wie Sturmfluten und Eisbedeckung.

Aerosol-, Wolken- und Spurengaseinflüsse auf das Klima Europas

Das Modellsystem *COSMO-ART*¹⁰ wurde weiterentwickelt, um Prozesse zu behandeln, die mit sekundären Aerosolen, direkt emittierten Komponenten wie Ruß, Mineralstaub und Seesalz, Wolken und chemischen Konstituenten sowie mit biologischem Material wie Pollen in Verbindung stehen. Das Modellsystem wurde zur Simulation des Einflusses von Aerosolpartikeln auf Strahlung und Wolken während meteorologisch interessanter Episoden und im Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen eingesetzt. Es wird im Rahmen von REKLIM auf der dekadischen Zeitskala zur Anwendung gebracht werden. Der Einfluss von

Spurengasen und Aerosolpartikeln auf das Klima in Europa kann damit mit bisher nicht erreichtem Detaillierungsgrad quantifiziert werden.

Einfluss von Landoberflächen- und Bodenprozessen auf das Regionalklima

Landoberflächen- und Bodenprozesse spielen durch Gedächtniseffekte eine wichtige Rolle bei regionalen Klimasimulationen auf dekadischer Zeitskala. Um den Einfluss von Vegetationsbedeckung, Bodenparametern und Frieren-Tauen von Wasser im Boden untersuchen zu können, wird das globale Community Land Model an die regionale Skala angepasst, um es dann mit regionalen Klimamodellen zu betreiben. Anhand von konvektionsauflösenden Simulationen mit dem RESM *COSMO-CLM* wird der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf das Klima in Norddeutschland untersucht. Eine realistischere Darstellung von Städten und differenzierteren Landnutzungen im RESM soll diesen anthropogenen Effekt auf das Klima aufzeigen. Darüber hinaus soll abgeschätzt werden, wie die Klimaänderungen aufgrund der CO₂-Szenarien zusätzlich durch Landnutzungsänderungen modifiziert werden könnten.

Einfluss von interner Variabilität und Emissionsszenarien auf das regionale Klima

Die Unsicherheiten von Klimaszenarien der kommenden Jahrzehnte sollen durch Ensemblesimulationen reduziert und der Einfluss interner Variabilität des Klimasystems infolge von atmosphärischen Fernverbindungsmustern und der Emissionsszenarien auf Extremereignisse quantifiziert werden. Die interannuelle Variabilität des Niederschlags wurde mit dem *COSMO-CLM* für Mitteleuropa untersucht. Dabei wurde die Änderung der Standardabweichung des Niederschlags im Vergleich zum Gesamtniederschlag auf der Basis eines Ensembles von 30 regionalen Klimamodellsimulationen für zwei Perioden (1971–2000) und (2011–2040) verglichen. Das Ensemble zeigt eine Erhöhung der interannualen Variabilität in der (2011–2040) Periode, die im Sommer (8%) und Herbst (14%) am stärksten ausgeprägt ist. Eine erhöhte Variabilität des Niederschlags deutet darauf hin, dass die Wahrscheinlichkeit von Jahren mit extremen Trockenperioden als auch extremen Starkniederschlägen zunehmen kann.

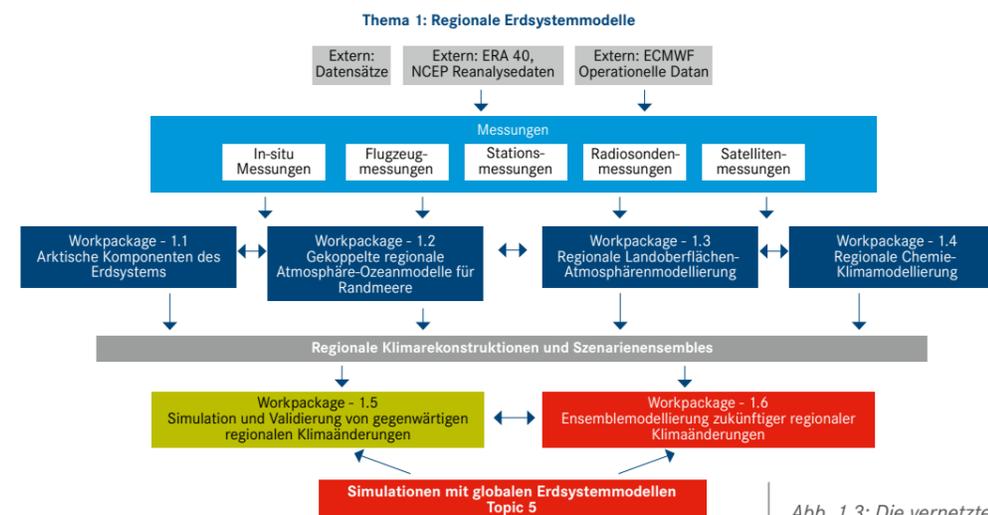


Abb. 1.3: Die vernetzten Arbeitspakete des Thema 1. (Grafik: Klaus Dethloff)

2 Meeresspiegeländerungen und Küstenschutz

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

In den vergangenen 3000 Jahren, in denen sich die menschliche Zivilisation überwiegend an den Küsten ansiedelte, hat sich der Meeresspiegel nur unwesentlich verändert. Hafen- und Städtebauer brauchten nur auf die Sturmfluten, nicht aber auf den Anstieg des Meeresspiegels Rücksicht zu nehmen. Das hat sich in den vergangenen Jahrzehnten geändert, denn der Meeresspiegel erhöht sich zurzeit um 3mm/Jahr. Ursache dafür ist das zunehmende Abschmelzen von Gebirgsgletschern sowie das Schmelzen der großen Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis aufgrund der durch den Klimawandel verursachten höheren Atmosphärentemperaturen.

Eismassenbilanz

Gegenwärtig steigen die Schmelzraten der Eismassen weltweit und tragen etwa 40 % zum globalen Meeresspiegelanstieg bei. Der größte Teilbeitrag kommt dabei zurzeit von den schmelzenden Gebirgsgletschern. Auf längere Sicht wird aber das Verhalten des grönländischen Eisschildes entscheidend sein. Es verliert zurzeit am Rand mehr Masse durch Gletscher- und Schmelzwasserabfluss als in den zentralen Hochlagen als Schnee fällt. So kommt es zu einem Netto-Massenverlust, der zum Meeresspiegelanstieg beiträgt.

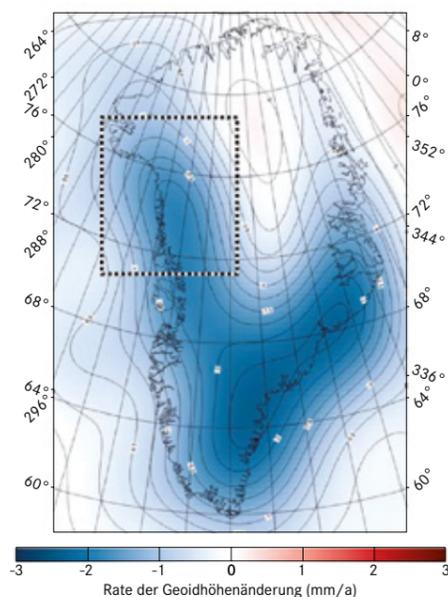


Abb. 2.1: Mit der Satellitenmission GRACE beobachtete Änderung des Erdschwerefeldes über Grönland, aus der sich die Eismassenverluste in Grönland berechnen lassen. Allein im Nordwesten Grönlands (markiertes Gebiet) reduziert sich die Eisbedeckung um etwa 46 Milliarden Tonnen pro Jahr, was einem Meeresspiegelanstieg von 0,13 mm/Jahr entspricht. (Grafik: Ingo Sasgen)

Die Änderung der Grönländischen Eismassen lässt sich u.a. aus Schwerefelddaten (Messung der Anziehungskraft der Erde) der Satellitenmission GRACE¹¹ ableiten. Die bisherigen Ergebnisse der seit März 2002 andauernden Satellitenmission zeigen insbesondere für den Südosten und Nordwesten Grönlands einen deutlichen Rückgang der Eismassen, der sich im Nordwesten innerhalb der letzten Jahre deutlich beschleunigt hat (Abb. 2.1).

In ähnlicher Weise lassen sich durch Satellitenbeobachtungen auch Regionen in der Antarktis identifizieren, die gegenüber globalen Klimaänderungen besonders sensitiv reagieren. Während auf der Antarktischen Halbinsel gegenwärtig eine den globalen Mittelwert überschreitende Erwärmung und das Kollabieren großer Schelfeisgebiete zu beobachten ist, treten im Amundsen-Gebiet der Westantarktis derzeit die größten Fließgeschwindigkeiten und damit Massenverluste des südpolaren Eisschildes auf.

Offene Fragen sind hierbei vor allem die Kenntnis der Gletscher- und Eisstromdynamik und die Reaktion des Ozeans auf die Erwärmung sowie die Zufuhr von Schmelzwasser, insbesondere in Küstennähe. Mit Hilfe von hochauflösenden Modellen der Eisschilddynamik, die speziell in der Lage sind die physikalischen Eigenschaften in der Fließdynamik der Auslassgletscher wiederzugeben, soll im Rahmen von REKLIM untersucht werden, wie der Massenabfluss über die großen Auslassgletscher aufgrund der verändernden Klimarandbedingungen reagiert. Hier sind insbesondere die Bedingungen am Felsbett von entscheidender Bedeutung: fließen die Gletscher langsam, weil sie angefroren sind, oder verlieren sie Haftung und beschleunigen sie durch Schmelzprozesse an ihrer Basis? Dies ist von besonderer Bedeutung für den Massenfluss von Eis aus dem Inland in die Küstenregion, wo das Eis wesentlich schneller schmilzt. Unterstützt werden diese Untersuchungen durch Beobachtungen und flugzeuggestützte, hochauflösende Radarmessungen, die es erlauben, den inneren Aufbau und die Eigenschaften an der Eis-Fels-Grenze zu bestimmen (Abb. 2.2).



Abb. 2.2: Das Forschungsflugzeug Polar 5 des AWI auf der Landebahn von Longyearbyen, Spitzbergen, beim Start zu einem Messflug. (Foto: Johannes Käbbohrer)

Globale Meeresspiegeländerungen

Ist das Eis geschmolzen und dem Ozean als Süßwasser zugeführt, so hat es nicht nur Einfluss auf den Meeresspiegel, sondern verändert auch die Ozeanströmung, da Süßwasser aufgrund seiner geringeren Dichte leichter ist und sich wie eine Linse auf das Meerwasser legt. Hierdurch wird die vertikale Vermischung der Wassersäule (Konvektion) unterdrückt, mit Auswirkungen auf die Tiefenwasserbildung und somit die globale thermohaline Zirkulation¹². Mit Hilfe eines globalen Erdsystemmodells wird dieser Einfluss in Kombination mit Fernwirkungen des veränderten Schwerefeldes auf die Ozeanströmung untersucht.

Für eine auf 200 Milliarden Tonnen pro Jahr geschätzte Abschmelzrate von Grönland wurde der Anstieg des Meeresspiegels berechnet. In einem regional hochauflösenden Ozeanmodell werden Schmelzraten sowie die Schmelzregion entsprechend den Satellitenmessungen vorgegeben. Die Simulation für die ersten 16 Jahre ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Global ergibt sich ein Anstieg von 0,6 Millimetern pro Jahr. Dichteänderungen bleiben auf den Nordatlantik beschränkt. Sie breiten sich langsam aus und betreffen vor allem die Küsten von Kanada sowie von Europa.

Regionale Auswirkungen

Regional können jedoch erhebliche Abweichungen vom globalen Mittelwert des Meeresspiegelanstiegs auftreten. Wie sich der regionale Meeresspiegel an den Küsten der Deutschen Bucht in den letzten knapp 100 Jahren verändert hat, inwieweit eine Beschleunigung in den letzten Jahren erkennbar ist und inwieweit einzelne Pegel repräsentativ für die Bestimmung von Veränderungen im regionalen Meeresspiegel sind, wurde anhand von homogenisierten Pegelaufzeichnungen an 15 verschiedenen Pegeln für die Deutsche Bucht mit zwei verschiedenen Methoden untersucht (Abb. 2.4). Beide Methoden liefern ähnliche Zeitreihen, die sich jedoch in Bezug auf dekadische Trends unterscheiden. Basierend auf den Auswertungen wird davon ausgegangen, dass sich der regionale Meeresspiegel im Bereich der Deutschen Bucht im Zeitraum 1924 bis 2008 um etwa 1.64 mm/Jahr bis 1.74 mm/Jahr erhöht hat. Die Anstiegsraten sind dabei an der schleswig-holsteinischen Küste generell höher, als an der niedersächsischen Küste.

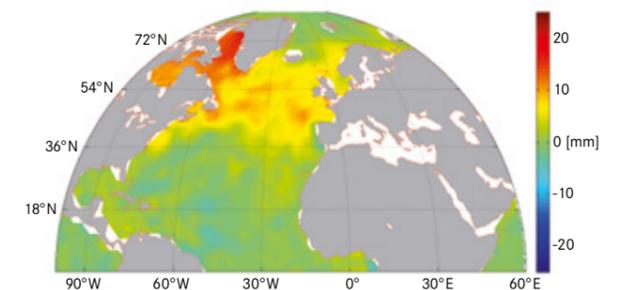


Abb. 2.3: Simulation der Meeresspiegelauslenkung nach 16 Jahren mit einem globalen Ozeanmodell als Reaktion auf einen Schmelzwasserabfluss vom Grönländischen Inlandeis von 200 Milliarden Tonnen pro Jahr. Die Farbskala beschreibt den Anstieg in Millimetern. Die Erhöhung breitet sich nur langsam im Nordatlantik aus und betrifft vor allem die Küsten von Grönland selbst sowie Kanada und Europa. (Grafik: AWI)

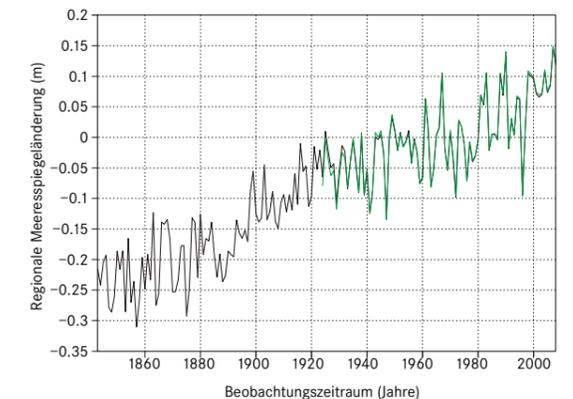


Abb. 2.4: Regionaler mittlerer Meeresspiegel für den Bereich der Deutschen Bucht bestimmt mit zwei verschiedenen Methoden (Mittelwert-Ansatz 1843-2008 (schwarz); EOF-Ansatz 1924-2008 (grün)) abgeleitet aus 15 Pegeln in der Deutschen Bucht. Der Zeitraum 1843 – 1924 ist nur für einen Pegel gegeben, drei weitere Zeitreihen existieren für den Zeitraum ab 1900. (Grafik: GKSS)

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?

Die polaren Regionen spielen eine besondere Rolle innerhalb des Klimasystems der Erde: die starke *Albedo*⁵ des Meereises und der eis- und schneebedeckten Landflächen bestimmt in großem Maße die Strahlungsbilanz der Erde; die kontinentalen Eisschilde stellen das größte Reservoir für Süßwasser und damit für Meeresspiegelschwankungen dar; die massiven und tief reichenden *Permafrostlagen*⁷ beinhalten große Mengen an organischem Kohlenstoff. Die Prozesse in Atmosphäre, Ozean und Boden der Arktis sind eng miteinander verzahnt. So ist für die Erstellung von Klimamodellen das Verständnis von internen Mechanismen wie die *Eis-Albedo-Rückkopplung*¹³, die Energie- und Wasserflüsse sowie die Treibhausgasemissionen des auftauenden terrestrischen und submarinen Permafrostes von größter Wichtigkeit. Diesen Mechanismen ist der verstärkte Zustrom von ozeanischer und atmosphärischer Wärme aus niederen Breiten in die Polarregionen überlagert. In unterschiedlichen Gebieten rund um den arktischen Ozean werden diese Mechanismen in Prozessstudien, bzw. in Langzeitstudien untersucht (Abb. 3.1).

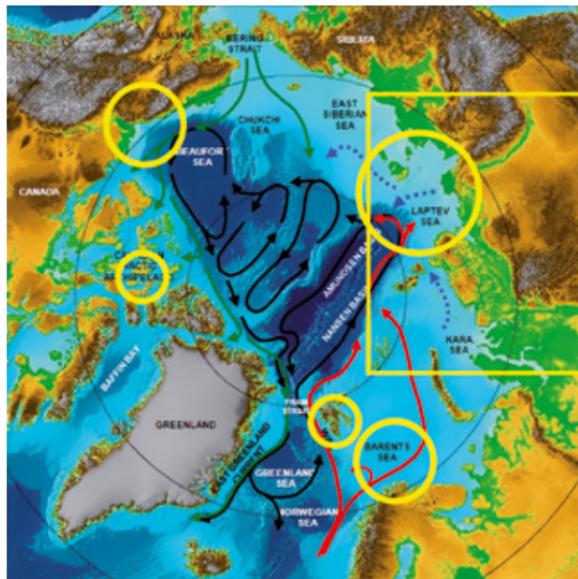


Abb. 3.1: Karte mit den marinen und terrestrischen Arbeitsgebieten (gelbe Umrandung). Die Pfeile zeigen Ozeanströmungen. (Grafik: Ursula Schauer, Bert Rudels)

Die natürliche Emission von Treibhausgasen (z.B. Methan) stammt sowohl aus biologischen als auch aus geologischen Prozessen. Beide werden durch Messungen vor Ort, durch organisch-biogeochemische Analysemethoden und mit Hilfe numerischer Simulationen untersucht und quantifiziert. Dafür wurden Emissionen aus biologischen Prozessen mit Hilfe von geschlossenen Messkammern sowie mit mikrometeorologischen Methoden im sibirischen Lenadelta gemessen (Abb. 3.3).

Darüber hinaus werden Emissionen aus Methanlagerstätten im kanadischen Mackenziedelta untersucht. Dort werden die numerischen Simulationen der abiotischen Methangengese in den tiefen Beckenablagerungen mit Daten der Migration des Gases und dessen Sequestrierung (Einlagerung) in Form von Gashydraten über geologische Zeiträume hinweg kombiniert. Zeugnisse von vergangenen Emissionen sind auf dem Meeresboden beispielsweise in der norwegischen Barentssee als so genannte „Pockmarks“ klar ersichtlich. Im Rahmen von REKLIM wurde für diese Untersuchung Probenmaterial vom Meeresboden genommen, um die Art, die zeitliche Abfolge und die Quellen dieser Emissionen zu analysieren. Die Kombination von Prozessverständnis, Messungen und numerischen Simulationen über menschliche sowie geologische Zeiträume wird uns so in die Lage versetzen, die Raten und die Dynamik natürlicher Treibhausgasemissionen, die bis jetzt nur unzureichend erforscht sind, besser zu verstehen.

Nur mit Langzeitmessreihen können Trends in Permafrostlandschaften erfasst werden. Um die zugrundeliegenden Prozesse zu verstehen werden auf der russisch-deutschen Forschungsstation Samoylov im zentralen Lenadelta (Laptewsee-Region, Sibirien) Messfelder zur Messung der Energie-, Wasser- und Treibhausgasflüsse betrieben. Die Forschungsstation wurde vom Lenadelta-Reservat und dem Alfred-Wegener-Institut für Langzeitforschung eingerichtet. Ein zirkumarktischer Service für operationelle Fernerkundung wird in Zusammenarbeit mit der Internationalen Permafrost Association (IPA) und der European Space Agency (ESA) aufgebaut. Durch Fernerkundung werden Oberflächen-temperatur, Bodenfeuchte, Frier- und Auftauprozesse, Veränderungen der Formen und Ausdehnung von Fließ- und Stehgewässern und Methankonzentration großflächig erfasst und als Eingabeparameter für Permafrost- und Klimamodelle adaptiert. Nach Anpassung an das Untersuchungsgebiet wird mit dem regionalen Klimamodell *COSMO-CLM*⁹ eine Rekonstruktion von



Abb. 3.3: Beobachtungssystem für zeitlich hochaufgelöste Messungen im Lenadelta der Spurengasflüsse zwischen sibirischer Tundra und Atmosphäre. (Foto: Torsten Sachs)



Abb. 3.2: Ausbringung einer Verankerung in der Laptewsee. Die Instrumente registrieren über ein Jahr die Veränderung der Strömung sowie der Wassertemperatur und des Salzgehalts infolge von Meereisbildung und Flusswassereinstrom aus der Lena. (Foto: Heidi Kassens)

klimarelevanten Größen der letzten 50 Jahre von der Laptewsee bis nach Yakutsk vorgenommen. Dieser zeitlich und räumlich hochaufgelöste Datensatz dient als Grundlage für statistische Untersuchungen.

Der Rückgang des Meereises betrifft als erstes die arktischen Schelfmeere. Daher untersuchen wir beispielhaft die Auswirkungen auf die Zirkulation und Wassermassenmodifikation in der Laptewsee (Abb. 3.2). In dieses Schelfmeer ergeben sich während weniger Wochen im Sommer riesige Mengen an Flusswasser aus der Lena samt seiner Fracht an partikulärem und gelöstem Material. Das Süßwasser hat in der zentralen Arktis einen stabilisierenden Effekt, um warmes Ozeanwasser vom Meereis zu isolieren. Zudem ist die Laptewsee durch eine große Polynya (ausgedehnte eisfreie Fläche) im Winter geprägt, in der ein großer Teil des arktischen Meereises und Tiefenwasser gebildet werden. Durch eine Kombination von einzelnen autonomen ganzjährig messenden Verankerungen, großskaligen Aufnahmen der Hydrographie durch Expeditionen und Fernerkundung im Sommer sowie numerischer Modellierung werden diese Vorgänge unter veränderten Eisbedingungen untersucht.

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?

Noch immer wissen wir zu wenig über die durch den globalen Wandel ausgelösten Umweltveränderungen und deren Folgen. Das Klima übt großen Einfluss auf die Landoberflächen aus, aber auch umgekehrt haben Landoberflächen Einfluss auf das Klima. Derzeit fehlen uns jedoch Umweltdaten, die über einen längeren Zeitraum in kleineren Regionen gesammelt werden. Nur mit solchen Daten können langfristige regionale Veränderungen erkannt, erklärt und daraus notwendige Vermeidungs- und Anpassungsstrategien abgeleitet werden. Das große, auf Langfristigkeit angelegte Beobachtungsprogramm **TERENO¹⁴** schließt diese Lücke (Abb. 4.1). Innerhalb TERENOs werden derzeit vier Observatorien in Deutschland aufgebaut: Die Eifel-Niederrheinische Bucht im Westen, die eiszeitlich geprägte Landschaft im nordost-deutschen Tiefland, der Großraum Leipzig-Halle in Mitteldeutschland und die Alpen- und Alpenvorlandregion im Süden bieten

einen repräsentativen Querschnitt der deutschen Landschaftstypen. Mit modernsten Methoden aus der Umwelttechnik, der Geophysik und der Fernerkundung werden Umweltdaten von boden-, flugzeug- und weltraumgestützten Sensoren aufgezeichnet, insbesondere Beobachtungen zur Wasser- und Bodenqualität, zur Vegetation und zur biologischen Vielfalt. TERENO greift dabei auf bereits bestehende Messstationen der Helmholtz-Gemeinschaft zurück, erweitert sie oder baut neue auf (Abb. 4.2). Auch mobile Messplattformen werden eingesetzt.

TERENO liefert einzigartige Daten über die Wechselwirkungen von Vegetation und Klima, die aber auch zum Testen von Computermodellen der Landoberfläche genutzt werden. Diese Modelle bestehen aus mathematischen Formeln, die unser derzeitiges Verständnis der Pflanzen, des Bodens, der Landschaftsform und deren Wechselwirkung widerspiegeln. Indem die Berechnungen der Modelle mit den Beobachtungsdaten von TERENO verglichen werden, wird somit unser Verständnis der Natur auf die Probe gestellt. Innerhalb von REKLIM werden bestehende Modelle der Landoberfläche auf Herz und Nieren geprüft und dann speziell weiterentwickelt. Mit Hilfe der Modellergebnisse können so Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt werden, wie zum Beispiel optimierte Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft oder Frühwarnsysteme für Starkregen oder Stürme.



Abb. 4.2: C. Jahn und K. Heidfeld bei der Endinstallation der Eddy-Kovarianz-Meßstation Fendt im Observatorium TERENO-Präalpin. (Foto: Matthias Mauder)

Die Modelle der Landoberfläche sind weiterhin in gekoppelte Erdsystemmodelle des Thema 1 eingebettet. Und hier besteht die Krux des Problems: Klimamodelle gehören zu den kompliziertesten und rechenaufwändigsten Computermodellen, die die Erde in ihren physikalischen Einzelheiten nachbilden. Es werden möglichst viele relevante Komponenten und Wechselwirkungen in der Atmosphäre, den Ozeanen und auf der Erdoberfläche berücksichtigt und je nach Fragestellung miteinander gekoppelt. Trotz Höchstleistungsrechnern und vereinfachter Abbildung klimarelevanter Prozesse sind die erforderlichen Rechenleistungen so hoch, dass die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle zwischen 50 und 250 Kilometern liegt. Das reicht nicht aus, um Klimafolgen für Länder oder Regionen abzuschätzen und entsprechende Anpassungskonzepte zu entwickeln. Kleinskalige Prozesse oder Extremwetterereignisse fallen durch das grobe Raster. Soll beispielsweise abgeschätzt werden, wie sich zukünftig Wasserressourcen auf Land räumlich und zeitlich verteilen, müssen sowohl hydrologische als auch regionale Klimamodelle verwendet, verbessert und miteinander gekoppelt werden (Abb. 4.3). Doch erst seit kurzem sind regionale Klimamodelle überhaupt in der Lage, in kleinen Rastern um 10 Kilometer Kantenlänge zu arbeiten. Lange hingen sie bei 50 Kilometern Kantenlänge fest, was für hydrologische Vorhersagen zu grob ist. Umgekehrt wurden erst in den letzten Jahren numerisch effiziente Schemata für hydrologische Modelle entwickelt, mit denen vertikale Prozesse wie Bodenfeuchtedynamik auf größeren Skalen regionalisiert werden können. Damit ist es nun prinzipiell möglich, Klimamodelle und hydrologische Modelle miteinander zu verknüpfen und neben Klimaszenarien auch hydrologische Szenarien zu liefern. REKLIM wird hierzu einen wichtigen Beitrag liefern.

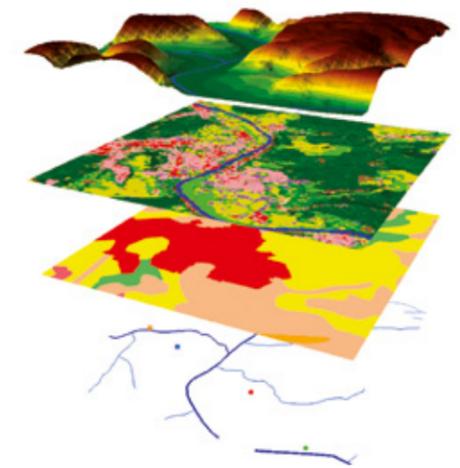


Abb. 4.3: Viele physikalische, chemische und biologische Prozesse überlagern sich an der Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Landoberfläche. Ein besseres Verständnis der Verketzung dieser Prozesse bildet den Schlüssel für verbesserte Vorhersagen regionaler Ausprägungen des Klimawandels und deren Folgen für den Menschen. (Grafik: UFZ)

Deutschlandkarte mit den Untersuchungsgebieten von TERENO



Abb. 4.1: Die vier TERENO-Observatorien als repräsentativer Querschnitt deutscher Landschaftstypen befinden sich derzeit im Aufbau. (Grafik: TERENO Newsletter, Dezember 2008; www.tereno.net)

5

Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala

Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst?

Es ist unbestritten, dass Kohlendioxid (CO₂) den größten Anteil am globalen Klimawandel hat. Allerdings gibt es eine Vielzahl anderer Spurengase und Schwebteilchen (**Aerosole**²) in der Atmosphäre, die für das Klima und klimarelevante Prozesse wichtig sind. Diese Luftbestandteile können (viele darunter aufgrund ihrer geringen Lebensdauer besonders auf der regionalen Skala) zu Änderungen der einfallenden Solarstrahlung führen und damit das regionale Klima beeinflussen. Im Rahmen von REKLIM werden durch Messungen dieser atmosphärischen Spurenstoffe und durch numerische Modellierungen die Einflüsse von Ozon, Aerosolen, Wasserdampf und Wolken auf das Klimasystem untersucht. Zusammen werden diese Arbeiten zu einem verbessertem Verständnis der wichtigsten klimarelevanten Prozesse in ausgewählten Regionen führen.

Atmosphärische Konzentrationen von Luftschadstoffen und klimawirksamen Luftbestandteilen werden durch das komplexe Zusammenspiel von Emissionen, chemischen Umwandlungen, Transport und Ablagerung bzw. Auswaschen bestimmt. Zur Untersuchung dieser Prozesse nutzen die Wissenschaftler der beteiligten Forschungszentren eine Vielzahl von Messinstrumenten auf diversen Plattformen (bodengebunden, Zeppelin, Forschungs- oder Passagierflugzeuge, Satelliten ...) oder in kontrollierter Umgebung (atmosphärische Simulationskammern) (Abb. 5.1). In REKLIM werden diese Daten zusammengeführt



Abb. 5.1: Darstellung diverser Messplattformen, die im Verbund zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre genutzt werden können. Von oben nach unten: der Satellit GRACE¹¹ (Quelle: GFZ), mit dem der Wassergehalt der Atmosphäre vermessen werden kann, ein Airbus Passagierflugzeug, auf dem Spurengasmessungen im Rahmen der Projekte MOZAIC und IAGOS durchgeführt werden (Quelle: Lufthansa), der Zeppelin NT, der für Spurengas- und Aerosolmessungen in den unteren Luftschichten eingesetzt wird (Quelle: FZJ) und die Atmosphären-Simulationskammer SAPHIR, mit der atmosphärenchemische Prozesse unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden. (Grafik: FZJ)

und gemeinsam analysiert. Komplexe numerische Modelle der Chemie und des Transportes in der Atmosphäre sind für die Interpretation der Beobachtungsdaten unentbehrlich und werden außerdem dazu verwendet, die Ursachen kurz- oder längerfristiger Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und deren Auswirkungen auf das Klima zu erforschen.

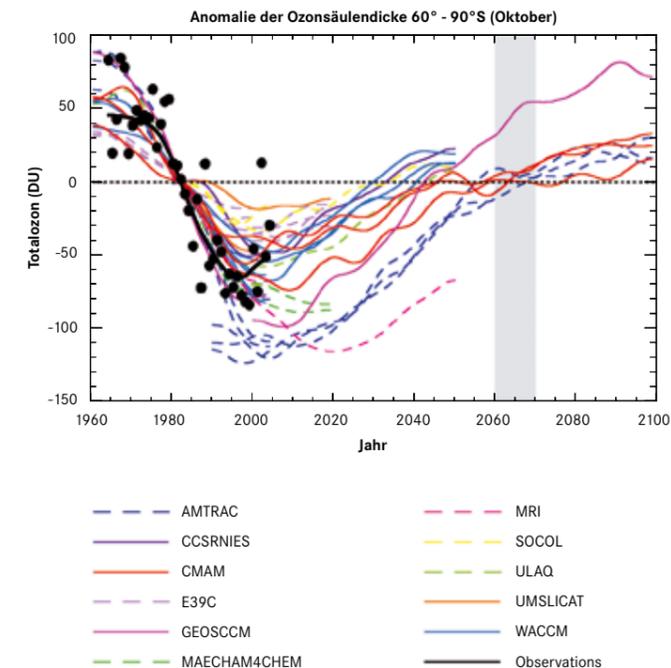
Schwerpunkte in REKLIM sind Studien zu Ozon und Wasserdampf in der Stratosphäre (Abb. 5.2). Ozon wird in der Atmosphäre durch photochemische Prozesse gebildet und ist neben seiner Eigenschaft als Luftschadstoff auch ein Treibhausgas. Die künftige Entwicklung der Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre ist allerdings ein komplexes Phänomen: sie hängt ab von Veränderungen in den Emissionen der Ozonvorläufersubstanzen (Stickoxide und organische Substanzen wie Kohlenwasserstoffe), Änderungen der Temperatur, des Niederschlags, der Häufigkeit von Blitzen und der einfallenden ultravioletten Strahlung. Umgekehrt können erhöhte Ozonkonzentrationen in Bodennähe auch auf die Emissionen von Kohlenwasserstoffen aus Pflanzen rückwirken und dadurch wiederum indirekt das Klima beeinflussen.

Aerosole sind derzeit die einzigen Luftbestandteile, die möglicherweise der globalen Erwärmung entgegenwirken können, da sie die Rückstreuung des einfallenden Sonnenlichtes in den Welt- raum verstärken. Allerdings gibt es bislang keine verlässlichen Ergebnisse, wie die Aerosole in ihrer vielfältigen Ausprägung letztendlich auf das Klimasystem wirken. Zum Beispiel kann der abkühlende Effekt von hellen Schwefelaerosolen durch die zusätzliche Erwärmung, die von stark absorbierenden dunklen Rußaerosolen hervorgerufen wird, kompensiert werden. Von besonderem Interesse für REKLIM sind solche Aerosole, die aus jenen Kohlenwasserstoffen gebildet werden, die Pflanzen vor allem unter Stress freisetzen, sowie Aerosole aus der Verbrennung von Biomasse.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Thema 5 betrifft Wasserdampf und Wolken in der oberen Troposphärenregion und den Eintrag von Wasserdampf in die Stratosphäre. Veränderungen in den atmosphärischen Spurengasen in dieser Höhenregion sind besonders klimawirksam. Es ist daher sehr wichtig, die chemisch-dynamischen Wechselwirkungsprozesse in diesem Höhenbereich genau zu verstehen und verlässliche Daten von Wasserdampfverteilungen und Konzentrationsänderungen aus verschiedenen Messplattformen zu gewinnen.

Die Forschungsaktivitäten im REKLIM sind eng mit großen internationalen Programmen verknüpft und nehmen Bezug auf die vielfältige Vernetzung der Helmholtz-Wissenschaftler mit Kollegen aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland. Die Entwicklung neuer Messinstrumente und neuartiger Beobachtungsplattformen trägt zur Weiterentwicklung des globalen Systems zur Erdbeobachtung ebenso bei, wie die Teilnahme der Forscher am Aufbau eines operationellen europäischen Vorhersage- und Analysesystems für Luftbestandteile.

In der Startphase von REKLIM wurden bereits erste Erfolge durch die verbesserte Zusammenarbeit der Helmholtz-Zentren erzielt. Beispielsweise konnte die gemeinsame Nutzung von **Radiookkultationsdaten**¹⁵ zweier Satelliteninstrumente mit den in-situ Messdaten aus einem Forschungsprogramm auf Passagierflugzeugen eine bislang unerreichte detaillierte Beschreibung der für das Klimasystem wichtigen Tropopausenregion liefern. Erstmals wurden auch Datensätze verschiedener Beobachtungsplattformen zu einer globalen Klimatologie von Wasserdampf in der Stratosphäre vereinigt (Abb. 5.3). Die Zentren arbeiteten zusammen auch an der Erstellung von globalen Emissionsinventaren für den nächsten Weltklima-Sachstandsbericht und treiben die Entwicklung gekoppelter Chemie-Klimamodelle voran.



- AMTRAC
- CCSRNIES
- CMAM
- E39C
- GEOSCCM
- MAECHAM4CHEM
- MRI
- SOCOL
- ULAQ
- UMSLICAT
- WACCM
- Observations

Ein wesentliches Ziel von Thema 5 ist die Entwicklung verbesserter physikalischer und chemischer **Parametrisierungen**⁴ in globalen und regionalen Chemie-Klimamodellen. Aus den detaillierten Prozessstudien werden allgemeine Zusammenhänge abgeleitet, die dann in mathematischer Form in die Modellsysteme eingebaut werden können. Diese Parametrisierungen werden evaluiert, indem mehrere Kurzzeitsimulationen (von etwa einem Jahr Dauer) sorgfältig mit den verfügbaren Beobachtungsdaten verglichen werden. Schließlich sollen längere Simulationen mit gekoppelten Chemie-Klimamodellen ein verbessertes Verständnis der chemisch-dynamischen Wechselwirkungen ermöglichen und den Einfluss kurzlebiger Spurengase und Aerosole auf das regionale Klima besser quantifizieren.

CLAMS Modellrechnung zu Wasserdampf in 12 km Höhe im Sommer 2008 (Einheit ppm)

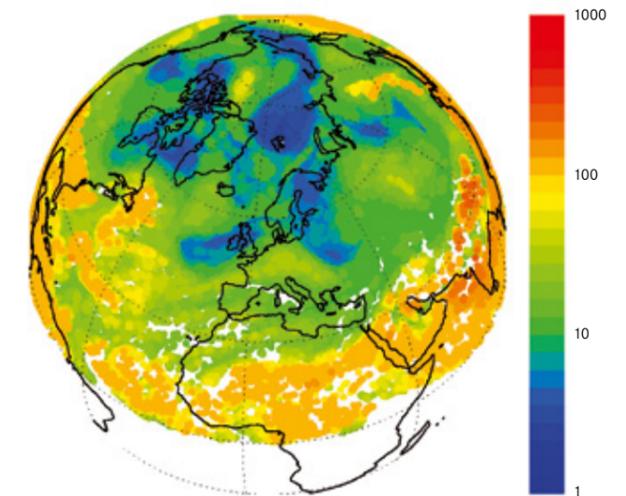


Abb. 5.3: Modellsimulation der Verteilung von Wasserdampf in 12 km Höhe im Sommer 2008. Deutlich zu erkennen sind die erhöhten Wasserdampfwerte (gelbliche Färbung) in den Tropen. (Grafik: FZJ)

Abb. 5.2: Das Ozonloch wird voraussichtlich bis Ende dieses Jahrhunderts verschwinden; jedoch zeigen Modellvorhersagen deutliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Modellresultate aus einem internationalen Modellvergleich sind in Farbe dargestellt, die Beobachtungen zum Vergleich in schwarz. Die Erholung der Ozonschicht hat deutliche Auswirkungen auf das globale Klimasystem. (Grafik: SPARC report on the evaluation of chemistry-climate models, WMO-TD No. \ 1526, WMO, Geneva, 2010)

6

Extreme Wetterereignisse - Stürme, Starkniederschläge, Hochwasser und Dürren

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



Abb. 6.1: Veranschaulichung der relevantesten extremen Wettersysteme und ihrer Folgen: Hitzeperioden mit Dürren, Tropische Wirbelstürme, Winterstürme, Hochwasser, Sturmböen und Tornados. (Waagrecht gelesen von links nach rechts. Foto 1: © VGMeril/PIXELIO, Foto 2: © Reuters, Foto 3: © picture-alliance/dpa, Foto 4: © Bundesregierung/Kühler, Foto 5: © dpa, Foto 6: © Georg Müller)

Die Erforschung extremer Wetterereignisse (Abb. 6.1) in ihrer regionalen Ausprägung und ihre Veränderung im Klimawandel in der Vergangenheit und in der Zukunft ist eine große Herausforderung unserer Zeit. Die Folgen extremer Wetterereignisse sind durch das aktuelle Wettergeschehen im Klimawandel und durch die Verletzlichkeit der Lebensräume und der technischen Infrastruktur bestimmt, die einem steten Wandel unterworfen sind. Hierbei gilt es, durch Nutzung aller verfügbaren Datensätze und durch sehr detaillierte Modellierung auch die selten auftretenden Extremereignisse besser als bisher abzubilden und mit Hilfe geeigneter statistischer Methoden zu quantifizieren. Damit besitzt das Thema hohe Anwendungsrelevanz, und die Ergebnisse dienen als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen.

Die beteiligten Helmholtz-Zentren haben sich innerhalb von REKLIM zusammengeschlossen, um gemeinsam die wesentlichen Gefährdungsarten und Folgen extremer Wetterereignisse im jetzigen und zukünftigen Klima zu erforschen bzw. abzuschätzen. Dabei wird auf die folgenden Themenbereiche genauer eingegangen.

Ermittlung früherer Extremereignisse durch Proxydaten¹⁶

Für einige Typen von Extremereignissen wurde die Verwendung von Proxy-Informationen (z.B. dokumentierte Sturmflutereignisse) vorgeschlagen, deren Verbindung mit physikalischen Zustandsvariablen noch nicht befriedigend geklärt ist. Solche Zusammenhänge werden daher mit Hilfe der regionalen Erdsystemmodellierung untersucht. Hierbei gehen modellbasierte Beziehungen zwischen saisonalen Zuständen des Klimasystems auf kontinentaler Skala und den zugehörigen Extremen ein.

Extremereignisse und Abflussmodellierung

Die hydrologischen Prozesse an der Erdoberfläche werden durch den Klimawandel beeinflusst, wodurch mit einem höheren Risiko von Extremereignissen wie Dürren und Hochwässern mit großen jährlichen Schäden zu rechnen ist. Für solche Ereignisse liegen vor der Zeit instrumenteller Beobachtungen (letzte 200 Jahre) Proxydaten vor, die mit einem hydrologischen Modell (mHM) validiert werden sollen. Hier wird ein umfassender Vergleich von modellierten Wassergehalten in tiefen Bodenschichten und Oberflächenabflüssen mit gemessenen Daten von Abflüssen und Hochwasserständen sowie Dürreproxys (z.B. Baumringen) durchgeführt.

Validierung Regionaler Erdsystemmodelle hinsichtlich der Extremwertstatistik von Stürmen, Niederschlag und hydrologischer Ereignisse

Die statistische Unsicherheit von Wiederkehrwerten selten auftretender, extremer Wetterereignisse aus Beobachtungs- und Modelldaten ist sehr groß und hängt von der Art der angepassten Verteilungsfunktion, der räumlichen und zeitlichen Dichte und der Repräsentativität der Daten ab. Deshalb werden verschiedene extremwertstatistische Verfahren angewendet, um aus einem *Ensemble*³ regionaler Klimamodelle die geeignetsten Modelle und Modellkombinationen zu ermitteln, Unsicherheiten der Ergebnisse zu verringern und diese quantifizieren zu können. Hierbei gehen umfangreiche Messdaten der operationellen Dienste (z. B. Deutscher Wetterdienst), aber auch bisher noch selten genutzte Informationen ein (z.B. von Ölplattformen, offshore Windparks, Versicherungsdaten).

Statistische Merkmale extremer Ereignisse in den letzten Dekaden

Die Gefährdung durch extreme Wetterereignisse, insbesondere die Veränderungen für die einzelnen Jahreszeiten, wird aus Ergebnissen regionaler Erdsystemmodelle für Zeiträume von Jahren bis Dekaden abgeleitet. Ihre Verbindung mit Zirkulationsindizes, mit deren Hilfe großräumige Schwankungsmuster im Klimasystem beschrieben werden, wird für verschiedene Regionen und Ereignisse erweitert, z.B. für Nordatlantische Stürme, Polartiefs, Taifune in Südostasien und Stürme im Mittelmeer. Auch die Verbindung zu extremen ozeanischen Ereignissen (Seegang, Extremwellen) wird untersucht.

Extremereignisse in Szenarien des zukünftigen Klimawandels

Das Ensemble hochaufgelöster regionaler Klimasimulationen aus Thema 1 dient als Grundlage zur statistischen Analyse von Winterstürmen, Starkniederschlagsereignissen, Binnen- und Küstenhochwässern sowie Trockenperioden. Durch die Merkmale der angepassten Verteilungsfunktionen, die Trends und Wiederkehrperioden wiedergeben, werden Änderungen der Extremwerte für zukünftige Zeiträume gegenüber dem Validierungszeitraum, einschließlich der statistischen Sicherheit ermittelt.

Hochwasserrisiko und Management

Für den Umgang mit der mutmaßlich zunehmenden Gefährdung durch Hochwasser, ist im politischen und administrativen Raum ein Wandel vom klassischen Konzept „Hochwasserschutz“ zum „Hochwassermanagement“ (siehe EU Hochwasser-Richtlinie 2007/60/EC) zu vollziehen. Aufbauend auf den naturwissenschaftlichen Simulationsergebnissen werden Konzepte für partizipative und integrierte Risikoabschätzung, Risikomanagement und Entscheidungsunterstützung entwickelt. Die Quantifizierung der Hochwasserfolgen wird dazu auch auf Auswirkungen auf die Umwelt, die Biosphäre und Biodiversität sowie die Kontamination durch mitgeführte Schadstoffe erweitert.

Bisherige Ergebnisse

Es wurde durch Arbeiten am GKSS deutlich, dass insbesondere dekadische Schwankungen die Sturmvariabilität in den Untersuchungsregionen im Pazifik und Nordatlantik bestimmen. Einheitliche Trends wurden dagegen nicht gefunden. GKSS und KIT untersuchen außerdem auf der Grundlage regionaler Klimasimulationen mit unterschiedlicher Auflösung die zu erwartenden Änderungen der Sturmhäufigkeiten in Deutschland und Europa. Eine leichte Zunahme der Sturmhäufigkeiten zeichnet sich für Norddeutschland bereits in den nächsten Jahrzehnten ab. Am KIT wurde eine detaillierte Gefährdungskarte für Winterstürme über Deutschland für die Vergangenheit erstellt, die auch vermehrt von Versicherungsunternehmen nachgefragt wird. Mit zukünftigen Trends des Niederschlags im Binnenland befasst sich das KIT anhand von regionalen Klimasimulationen mit Schwerpunktsetzung auf kleine und mittlere Einzugsgebiete. Komplementär dazu werden Abflussmodellierungen von GFZ und KIT durchgeführt. Das GFZ analysierte die Hochwassertrends der letzten 50 Jahre in allen großen Einzugsgebieten Deutschlands und entwickelt eine Methode für die bundesweite Hochwasserrisikoabschätzung unter Berücksichtigung potentieller Änderungen der Vulnerabilität durch Landnutzung. Am UFZ werden grundlegende Untersuchungen zu geeigneten Verteilungsfunktionen von Niederschlag und Abfluss sowie zur Generierung

synthetischer Niederschlagszeitreihen für Abflussberechnungen durchgeführt. Ein neues Thema ist die Ableitung von Trends schwerer Hagelereignisse und Konvektionsindizes am KIT, für die aus Versicherungsdaten und meteorologischen Messungen in den letzten Jahrzehnten eine Zunahme nachgewiesen werden konnte (Abb. 6.2). Hagel ist in Süddeutschland die Gefährdungsart mit den größten jährlichen Versicherungsschäden (Gebäude).

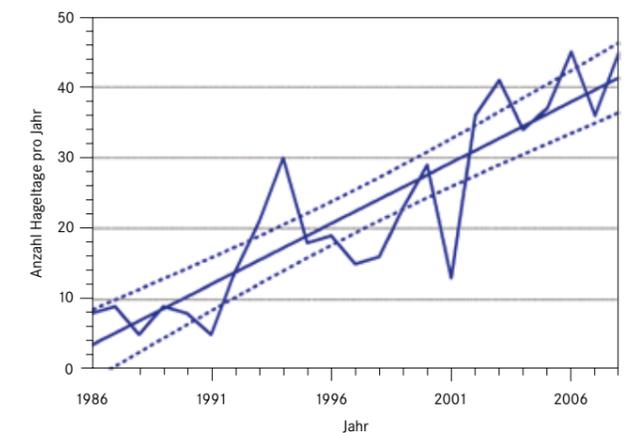


Abb. 6.2: Aus Versicherungsdaten abgeleitete Änderung der Anzahl von Hageltagen mit linearem Trend und Konfidenzintervallen (95% Signifikanz) in den letzten Jahrzehnten in Baden-Württemberg. Die Änderung ist konsistent mit Befunden über die Gewitterbereitschaft (sogenannte Konvektionsindizes). (Grafik: Michael Kunz, 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?

Um die Erderwärmung langfristig auf zwei Grad zu beschränken, bedarf es einer enormen weltweiten Kraftanstrengung. Die globalen Kohlenstoffemissionen müssten ab sofort stetig sinken, statt wie bislang stetig zu steigen. Nur wenn sie im Jahr 2050 noch halb so hoch sind wie 1990, kann das politische Ziel des Klimagipfels von Kopenhagen gelingen. Und selbst wenn die Trendwende beim weltweiten Kohlendioxidausstoß gelänge, müssten wir auf dem langen Weg zur Klimastabilisierung mit regionalen Temperaturanstiegen von 4 Grad Celsius und mehr rechnen. Die Anpassung an den Klimawandel wird damit zu einer globalen Notwendigkeit!

Anpassung an den Klimawandel bedeutet, dass wir unsere Verletzlichkeit gegenüber den Folgen der Erderwärmung verringern. Während wir uns in Deutschland besser für Hitze- und Starkregenereignisse rüsten müssen, geht es in anderen Ländern vornehmlich darum, Gefahren aus dem Meeresspiegelanstieg, extremen Wasserknappheiten und dem Verlust empfindlicher Ökosysteme wie zum Beispiel Korallenriffen zu begegnen. Die Länder des Südens werden die Hauptlast der Folgen der Erderwärmung tragen, während die Länder des Nordens davon sogar vorübergehend profitieren können. Aber mit der zunehmenden Erderwärmung werden sich auch diese Vorteile in ihr Gegenteil verkehren, so dass wir langfristig weltweit mit negativen Folgen des Klimawandels rechnen müssen.



Abb. 7.1: Klimaschutz und Klimaanpassung können sich wie bei der Wärmedämmung von Gebäuden synergistisch ergänzen oder im Konflikt stehen wie z.B. Klimaanlagen als Klimaanpassungsmaßnahme in Gebäuden. Zugleich müssen sich Maßnahmen zur Stärkung der Kohlenstoffbindung

in Wäldern oder in städtischen Grünkorridoren mit den Zielen Biodiversitäts- und Stadtentwicklungspolitik kohärent verbinden. Um Synergien auszuschöpfen, müssen integrierte Klimapolitiken eine Reihe von politischen Kohärenzeigenschaften erfüllen. (Grafik: UFZ)

Globaler Wandel – Regionale Wirkung

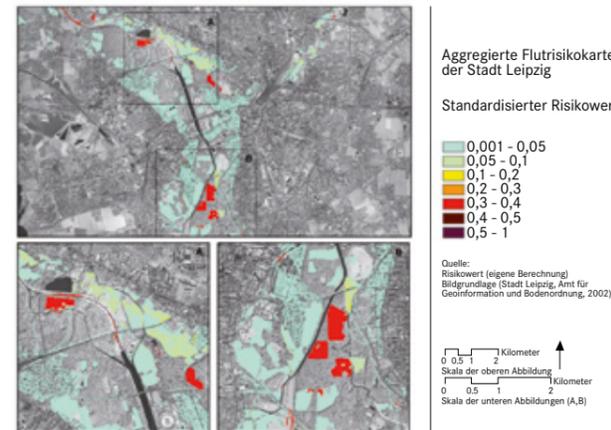
Die Wirkungen des Klimawandels zeigen sich auf regionaler Ebene. Beispiel Deutschland: Bei einem Szenario ohne Klimaschutzanstrengungen („Business as usual“) müssen je nach Emissionsszenario und Klimamodelltyp zwischen 2 und 3,5°C Temperaturanstieg bis 2100 in Kauf genommen werden. Diese Erwärmung wird sich hauptsächlich in der Variabilität der Niederschlagsmengen und einer Zunahme von extremen Wetterereignissen wie Überflutungen und Stürmen auswirken. Allerdings sind die Prognoseunsicherheiten für diese Klimafolgen sehr groß. Deshalb ist noch ein erheblicher Modellierungs- und auch Monitoringaufwand zur Überprüfung und Verbesserung der Modellvorhersagen zu betreiben, um zu fundierteren Prognosen des regionalen Klimawandels zu kommen. Das gilt erst recht für die ökologischen und ökonomischen Folgen des Klimawandels. Besonders gilt dies für die verletzlichen Regionen dieser Welt wie Zentralafrika oder viele Megastädte dieser Welt, in denen soziale und ökonomische Randbedingungen, wie Bildungsstand und ungleiche Einkommen, die Untersuchung und Bewältigung von Klimawandelfolgen erschweren.

Anpassungsmaßnahmen und ihre Kosten weitgehend unbekannt

Die Europäische Union (EU) hat mit ihrer Anpassungsstrategie aus dem Jahr 2009 den Anstoß zu einem Prozess gegeben, auf Länderebene geeignete Strategien in den verschiedenen Sektoren und Regionen auszuarbeiten und einen Prozess der politischen Willensbildung in den Ländern sowie auf der Ebene der Kommunen anzustoßen. Noch aber fehlt es an geeigneten Monitoring- und Indikatorensystemen, um den Erfolg der Anpassungsmaßnahmen effektiv und regelmäßig zu kontrollieren und die Anpassungspolitiken zwischen Europäischer Gemeinschaft, nationalen Regierungen, Regionen und Gemeinden wirksam zu koordinieren. Synergien suchen und Konflikte vermeiden ist auch hier die Zauberformel der nächsten Zeit. Zu einer wirksamen Strategie der Anpassung im Multiebenen- und Multisektorensystem der Europäischen Gemeinschaften kommen wir nur, wenn rechtliche, politische und ökonomische Synergien mit den Zielsetzungen in den Sektoren und auf den unterschiedlichen Ebenen gesucht bzw. Konflikte vermieden werden. Sonst bleibt es bei bloßen Absichtserklärungen. Die EU kann auch in dieser Frage globale Führungsqualitäten zeigen.



Abb. 7.2.a): Aggregierte multikriterielle Flutrisikokarte für Leipzig. (Grafik: Kubal, Haase, Meyer, Scheuer, 2009)



Während es bereits zahlreiche Studien zur Abschätzung der Kosten einer Verringerung der Emission von Treibhausgasen und einer Umstellung auf eine CO₂-arme Wirtschaftsweise gibt, fehlen solche Studien weitgehend mit Blick auf die Kosten der Anpassung an den Klimawandel. Die vorliegenden Studien sind zumeist auf Einzelsektoren wie z.B. die Landwirtschaft oder einzelne Regionen z.B. Flusseinzugsgebiete bezogen. In der Summe dieser Einzelstudien werden die vielfältigen Wechselwirkungen im ökonomischen System nicht betrachtet.

Integrierte sozioökonomische Konzepte gefragt

Es zeigt sich insgesamt: In der sozioökonomischen Analyse von Klimaanpassung bestehen noch große Forschungslücken und erhebliche Unsicherheiten, da viele unterschiedliche, natürliche und sozioökonomische Faktoren im Zusammenhang zu betrachten sind. Hier sieht Thema 7 seine Aufgabe: In der systemischen Erforschung von regionalen Klimawandelfolgen in Deutschland und den besonders verletzlichen Regionen dieser Welt, um Konzepte aufzustellen, mit denen die Folgen des Klimawandels bewältigt werden können.

Ziel aller Anpassungsmaßnahmen sollte es sein, Gefahren und Schäden für Ökosysteme, die menschliche Gesundheit sowie Infrastrukturen zu minimieren. Doch welche Anpassungsoptionen haben wir und welche sind die richtigen? Wie lassen sich Synergien und Konflikte vernünftig abwägen, um direkte oder indirekte negative Folgen vermeintlich sinnvoller Anpassungsmaßnahmen zu vermeiden? Beispiel: Die extensive Nutzung von Bioenergie als Strategie zur Senkung der Treibhausgasemissionen macht uns anfälliger gegen Klimaschwankungen, erhöht also die gesellschaftliche Verletzlichkeit. Die Einsparung von Heizenergie im

Abb. 7.2.b.): Wissenschaft (Prof. Dr. Christian Wissel, früherer Leiter der Sektion Ökosystemanalyse am UFZ) im Diskurs mit Interessensvertretern über Perspektiven der Landnutzung (Bielefeld 2005). (Foto: André Künzelmann)

Abb. 7.2: Entscheidungen im Rahmen einer integrierten Klimapolitik führen zu Risikoabwägungen, die letztlich nur in Diskursen mit Betroffenen getroffen werden können. Brauchen wir angesichts zunehmender Winterniederschläge neue Bemessungsgrundlagen für die kommunalen Entwässerungsinfrastrukturen? Wie können Frischluftkorridore in den hitzegefährdeten Städten sozialverträglich gestaltet werden, so dass gewachsene Nachbarschaften nicht zerstört werden? Die sozioökonomische Forschung kann diese Diskurse durch dynamische, an die lokalen Bedingungen anpassbare Entscheidungshilfen, wie z.B. Risikokarten (Abb. 7.2a) und Nachhaltigkeitsdialoge (Abb. 7.2.b) unterstützen.

Gebäudebestand durch Wärmedämmung dagegen dient zugleich dem Hitzeschutz. Klimaschutz (Mitigation) und Klimaanpassung (Adaptation) stehen insoweit nicht im Gegensatz zueinander. Das eine ohne das andere griffe jeweils zu kurz. Klimaanpassungsstrategien jedoch sind gekoppelt an die Wahrnehmung der Bedrohungen in einer regional-kulturell verankerten Gesellschaft. Deshalb ist es notwendig, die regional-kulturellen Konstruktionen von Bedrohung, Gefahr und Risiko zu analysieren und Handlungsstrategien an die jeweiligen Gesellschaften anzupassen. Was wir brauchen, ist eine integrierte sozioökonomische Klimaschutz- und Klimaanpassungspolitik (Abb. 7.1).

Beim gegenwärtigen Stand des ökonomischen Wissens kann die Optimierung nur über eine verbesserte Abstimmung von Klimaschutz und Klimaanpassung sowie die Integration von Klimazielen in die Maßnahmen der Umwelt-, Wirtschafts- und Sozialpolitik erfolgen. 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. Die regional-kulturelle Wahrnehmungsforschung und die Analyse gesellschaftlicher Diskurse, die nicht zuletzt durch die Medien mitgeformt werden, bekommen dabei einen mitentscheidenden Stellenwert. Risikowahrnehmung und Gefahrenwissen sind Rahmenbedingungen, die die Grundlage bilden für angepasste Anpassungs- und Vermeidungsstrategien. Die Erforschung innovativer Ansätze der ökonomischen Anpassungsforschung muss demnach an soziokulturelle Analysen gekoppelt werden – beides in ihren spezifischen regionalen Bezügen (Abb. 7.2).

Das Netzwerk der regionalen Helmholtz-Klimabüros

Klimaberatung: regional spezifisch, verständlich, solide

Die regionalen Helmholtz-Klimabüros und ihre Expertisen

 <p>GKSS FORSCHUNGSZENTRUM in der HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT</p>	 <p>HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ</p>	 <p>KIT Karlsruhe Institute of Technology</p>	 <p>AWI Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft</p>
<p>Norddeutsches Klimabüro GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH (GKSS)</p> <p>Küstenklima, Sturmfluten, Seegang</p> <p>www.norddeutsches-klimabuero.de Ansprechpartner: Dr. Insa Meinke insa.meinke@gkss.de</p>	<p>Mitteldeutsches Klimabüro Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) - Leipzig</p> <p>Klimafolgen und Anpassung in den Bereichen Biodiversität, Wasserhaushalt und Gesellschaft</p> <p>www.mitteldeutsches-klimabuero.de Ansprechpartner: Dr. Andreas Marx andreas.marx@ufz.de</p>	<p>Süddeutsches Klimabüro Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</p> <p>Kleinräumige Klimasimulationen, extreme Wetterereignisse</p> <p>www.sueddeutsches-klimabuero.de Ansprechpartner: Dr. Hans Schipper schipper@kit.edu</p>	<p>Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven</p> <p>Klimainformationen über Polargebiete und Meeresspiegelanstieg</p> <p>www.klimabuero-polarmeer.de Ansprechpartner: Dr. Renate Treffeisen renate.treffeisen@awi.de</p>

Der globale Klimawandel wirkt sich regional sehr unterschiedlich aus. Anpassungsstrategien an den Klimawandel müssen diese regionalen Unterschiede berücksichtigen, um beispielsweise Fehlinvestitionen zu vermeiden. Wegen des stetig wachsenden Beratungsbedarfs hat die Helmholtz-Gemeinschaft ein Netzwerk Regionaler Klimabüros aufgebaut (Abb. 8.1).

Die Regionalen Helmholtz-Klimabüros sind in die nutzenorientierte Klimaforschung der Helmholtz-Gemeinschaft eingebunden, die auch Klimaschutz, Klimafolgen- und Anpassungsforschung beinhaltet. Akteure und Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft erhalten somit von ihnen regional spezifisches, verständlich aufbereitetes und solides Klimawissen.

Die Helmholtz-Zentren, die im Bereich der Klima- und Klimafolgenforschung aktiv sind, bieten eine Vielfalt an klimarelevanten Forschungsschwerpunkten. Die bundesweite Verteilung ihrer Standorte und die bereits bestehende fachliche Vernetzung ermöglichen einen guten Austausch von Forschungsergebnissen zum Thema regionaler Klimawandel und dessen Folgen. Das Ziel der vier Regionalen Helmholtz-Klimabüros ist es, Forschungsergebnisse zum Klimawandel für bestimmte Regionen und Naturräume zu bündeln, verständlich aufzubereiten und zu vermitteln. Gleichzeitig verstärken sie den Dialog zwischen Klimaforschung und Öffentlichkeit in den Regionen. Informationsbedürfnisse aus der Öffentlichkeit werden erfasst und in die Forschungsprogramme der Zentren integriert.

Jedes Klimabüro vertritt dabei die regionalen Aspekte der Klimaforschung basierend auf der wissenschaftlichen Expertise des jeweiligen Helmholtz-Zentrums. Die Basis für ihre Expertise wird zusätzlich durch die Vernetzung der regionalen Klimabüros untereinander und durch Kooperationen mit Exzellenzinitiativen, Universitäten sowie Landes- und Bundesbehörden gestärkt. Somit kann innerhalb Deutschlands eine nahezu flächendeckende Kommunikation von regional spezifischem, solidem Klimawissen erfolgen.

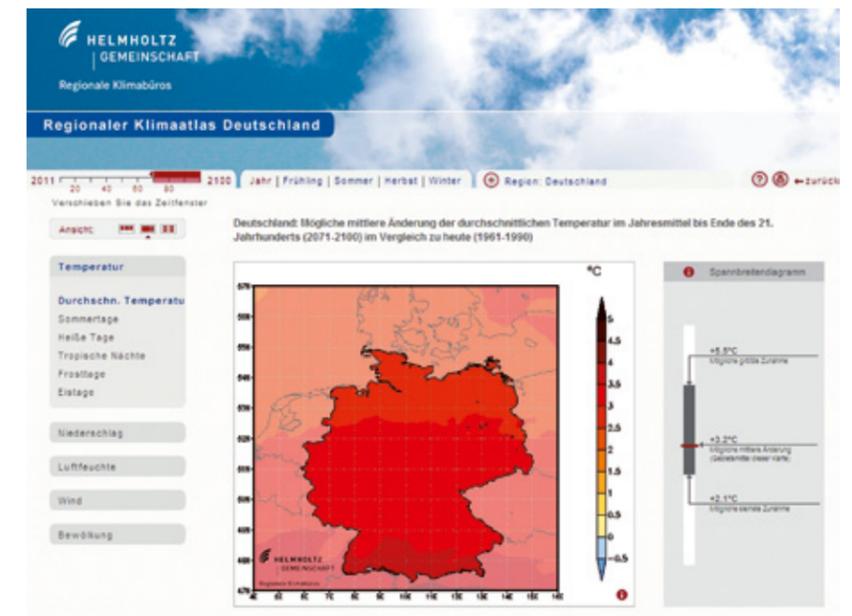
Informationen aus den jeweiligen klimaspezifischen Kernkompetenzen der einzelnen Klimabüros werden ausgetauscht und,

soweit möglich, auf die Bezugsregionen der übrigen Klimabüros übertragen. Informationsmaterialien zu bestimmten Fokusthemen und zum regionalen Klimawandel werden nach Möglichkeit gemeinsam weiterentwickelt. Unterstützt durch eine abgestimmte Außendarstellung (Internet, Tagungen, Workshops) koordinieren die Regionalen Helmholtz-Klimabüros untereinander themenspezifische Anfragen. Ergebnisse aus der Helmholtz-Klimainitiative REKLIM sind für die Entscheidungsprozesse der Anpassungsstrategien an den Klimawandel und Emissionsverminderung von besonderem Interesse. Den Regionalen Helmholtz-Klimabüros kommt bei der Kommunikation dieser Ergebnisse eine tragende Rolle zu.



Abb. 8.1: Das Netzwerk der regionalen Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft. (Grafik: Schipper, J.W., I. Meinke, S. Zacharias, R. Treffeisen, Ch. Kottmeier, H. von Storch, und P. Lemke, 2009, DMG Nachrichten 1-2009)

Abb. 8.2: Ein Beispiel unserer Arbeit (Screenshot der Internetseite „www.regionaler-klimaatlas.de“): Wie sich das Klima künftig in den einzelnen Bundesländern ändern kann, zeigt der Regionale Klimaatlas Deutschland, den die vier Regionalen Helmholtz-Klimabüros nach Vorbild des Norddeutschen Klimaatlas entwickelt haben. Unter www.regionaler-klimaatlas.de können mögliche zukünftige Klimaszenarien öffentlich abgerufen werden. Entscheidungsträger aus klimasensiblen Bereichen wie z. B. Landwirtschaft, Tourismus und Energieversorgung können sich im Klimaatlas anzeigen lassen, wie sich beispielsweise Temperatur, Niederschlag und Wind in unterschiedlichen Jahreszeiten in ihrem Bundesland ändern können. Auch Entscheidungsträgern in Ministerien und Behörden bietet der Regionale Klimaatlas Deutschland eine wissenschaftlich fundierte Basis zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. (Bild: Meinke, I., E. Gerstner, H. von Storch, A. Marx, H. Schipper, C. Kottmeier, R. Treffeisen und P. Lemke, 2010, Mitteilungen DMG 02/2010)



Ausblick

Klimaforschung beschäftigt sich mit einem komplexen System, das interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus physikalischen, geologischen und biologischen Disziplinen erfordert. Solch ein komplexes System wird auch auf lange Sicht nicht in allen Details vorhersagbar sein. Es gilt daher, zukünftige Mittelwerte und ihre Schwankungsbreite in allen Vorhersagen und Projektionen zu bestimmen und realistische Abschätzungen für das Auftreten von Extremereignissen zu treffen. Die entscheidende Herausforderung für REKLIM ist hier die Bereitstellung des notwendigen Wissens inklusive der Unsicherheiten für die Einschätzung zukünftigen Klimawandels und die entsprechenden notwendigen Adaptionen auf regionaler Basis. Dies soll durch ein verbessertes Verständnis der klimarelevanten Prozesse mithilfe von innovativen Beobachtungssystemen und optimierten numerischen Modellen erreicht werden. Ziel ist es,

Datensätze der gegenwärtigen und zu erwartenden Klimaänderungen in verschiedenen Regionen zu erzeugen, durch ihre Analyse Verbesserungsvorschläge für globale und regionale Klimamodelle zu machen und die Ergebnisse durch die Regionalen Klimabüros den politischen Entscheidungsträgern, der kommunalen Verwaltung, der Wirtschaft sowie der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Für Anpassungsmaßnahmen ist solch eine regionale Vorhersage unbedingt erforderlich. Allerdings reicht Anpassung alleine nicht aus. Eine international abgestimmte Vermeidungsstrategie und ihre Umsetzung sind für das Wohl aller Nationen von noch größerer Wichtigkeit.

¹**RESM**: Regionales Erdsystemmodell (Regional Earth System Model).

²**Aerosol**: Feste oder flüssige Schwebeteilchen in der Atmosphäre. (Der Durchmesser von klimarelevanten Aerosolen reicht von etwa 5 Nanometer bis zu einigen Mikrometern). Hauptbestandteile der Aerosole sind Sulfat, Kohlenstoff, Nitrat, Ammonium und Mineralien. Im Zusammenhang mit Luftverschmutzung werden Aerosole einer bestimmten Größenklasse (bis 10 Mikrometer) auch als Feinstaub bezeichnet.

³**Ensemblesimulation**: Mehrfache RESM Simulationen mit veränderten Anfangs- und/oder Randbedingungen.

⁴**Parametrisierung**: Vereinfachende numerische Beschreibung eines physikalischen Prozesses basierend auf empirischen Daten. Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung heutiger Modelle und aus Gründen der Rechenzeitökonomie können z. B. in einem komplexen Chemie-Klimamodell nicht alle physikalischen und chemischen Prozesse im Detail dargestellt werden, so dass Parametrisierungen erforderlich sind.

⁵**Albedo**: Rückstrahlvermögen nicht selbst leuchtender Oberflächen für einfallende Strahlung. Die Albedo wird aus dem Quotienten von reflektierter zu einfallender Lichtmenge berechnet. Ihre Werte liegen zwischen 0 und 1.

⁶**HIRHAM-NAOSIM**: Gekoppeltes regionales Erdsystemmodell der Atmosphäre (HIRHAM) und des Ozeans (NAOSIM).

⁷**Permafrost**: Ganzjährig gefrorener Untergrund (Boden, Sediment, Gestein).

⁸**HIRHAM-LSM**: Gekoppeltes regionales Erdsystemmodell der Atmosphäre (HIRHAM), der Landoberfläche und des Bodens (LSM).

⁹**COSMO-CLM**: Consortium for Small Scale Modelling - Climate Mode. Nichthydrostatisches regionales Klimamodell. Das Konsortium ist ein Zusammenschluss mehrerer europäischer Wetterdienste.

¹⁰**COSMO-ART**: Consortium for Small Scale Modelling - Aerosols² and Reactive Trace gases. Regionales Klimamodell mit atmosphärischem *Aerosolblock*².

¹¹**Satellitenmission GRACE**: (Gravity Recovery And Climate Experiment). Die Zwillingssatelliten der amerikanisch-deutschen Gemeinschaftsmission GRACE liefern ein hochgenaues globales Modell der statischen und zeitvariablen Komponenten des Gravitationsfeldes der Erde.

¹²**Thermohaline Zirkulation**: Mit diesem Begriff wird die durch Temperatur- und Salzkonzentrationsunterschiede hervorgerufene, dichtegetriebene Meereströmungen bezeichnet. Zusammen mit den windgetriebenen Strömungen sorgt die dichtegetriebene Zirkulation für den Massen- und Wärmeaustausch innerhalb der Weltmeere, die zusammen das umgangssprachlich genannte globale Förderband („ocean conveyor belt“) bilden.

¹³**Eis-Albedo-Rückkopplung**: Eis reflektiert viel eingestrahktes Sonnenlicht (hohe Albedo) während die dunkle Wasseroberfläche einen großen Teil der Einstrahlung absorbiert und in Wärme umwandelt. Bei Verringerung der hellen Eisfläche im polaren Ozean kann im Wasser entsprechend mehr Strahlung absorbiert werden und das erwärmte Wasser führt zu weiterem Abschmelzen des Eises. Dieser Kreislauf setzt sich weiter fort und bildet eine positive Rückkopplung.

¹⁴**TERENO**: TERrestrial ENVIRONMENTAL Observatoria (terrestrisches Umweltobservatorium), www.tereno.net

¹⁵**Radiookkultation**: Spezielle Messanordnung zweier Satelliteninstrumente, bei der die Änderung eines Radiosignals während der Durchdringung der Atmosphäre beobachtet wird. Aufgrund der Satellitenbahnen von Sender und Empfänger kann so ein mittleres Vertikalprofil der atmosphärischen Dichte und des Wasserdampfes erstellt werden.

¹⁶**Proxydaten**: Indirekte Klimazeiger, wie beispielsweise Baumringe, Pollen, Warven, Eisbohrkerne, Sedimentkerne, etc.

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

Marietta Weigelt
Tel.: 0471-4831-1750
E-Mail: Marietta.Weigelt@awi.de
www.reklim.de

Herausgeber:
Helmholtz-Verbund REKLIM, 2010

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

Gestaltung:
© KLEMM BREMEN.DE

Druck:
müllerDitzen AG, Bremerhaven
www.muellerditzen.de



Fotonachweise: Foto Vorwort U2+Seite 1: Natural II, Foto Seite 2: Alfred-Wegener-Institut, Fotos Seite 3 waagrecht von links oben nach rechts unten: Foto 1: Peter Lemke, Foto 2: André Künzelmann, Foto 3: Heidi Kassens, Foto 4: Johannes Käbbohrer, Foto 5: Matthias Mauder, Foto 6: AeroArt, Foto 7: Hannes Grobe, Foto 8: © dpa, Foto 9: André Künzelmann, Foto 10: AWI Rechenzentrum, Foto 11: Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Foto 12: Torsten Sachs, Foto 13: Hand Oerter, Foto 14: © VGMeril/PIXELIO, Foto 15: realnature.tv, Foto 16: © Georg Müller, Foto 17: ESA, Foto 18: Forschungszentrum Jülich, Foto 19: IMK-IFU, Foto 20: © picture-alliance/dpa, Foto Schlusswort Seite 22/23: Hans Oerter

AWI | DLR | FZJ | GFZ | GKSS | HMGU | 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

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Karlsruher Institut für Technologie

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

www.reklim.de

