REKLIM Report

Helmholtz-Verbund
Regionale Klimaänderungen

September 2018

Regionale Klimaänderungen – Ursachen und Folgen

Im Fokus

- Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme
- Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten

Weitere Themen im Report:

Aktuelle Aktivitäten im Helmholtz-Forschungsverbund REKLIM

WissenschaftlerInnen und Wissenschaftler im Verbund

REKLIM Wissenstransfer

Aktivitäten der regionalen Klimabüros in der Helmholtz-Gemeinschaft

HELMHOLTZ
SPITZENFORSCHUNG FÜR GROSSE HERAUSFORDERUNGEN

Herausforderung Klimawandel

Klimaforschung im Verbund

Das Jahr 2018 ist mit zahlreichen Extremwetterereignissen gestartet und hat neben Stürmen im Frühjahr und einem späten Kälteeinbruch eine große Trockenheit, insbesondere in Nord- und Ostdeutschland hervorgerufen. Im Süden Deutschlands haben schwere kurzzeitige Niederschlagsereignisse zu lokalen Überschwemmungen geführt. Dem Frühjahr folgte eine langanhaltende Trockenheit und Hitzeperiode, mit großen Problemen für die Landwirtschaft und Schifffahrt, aber auch für Mensch und Natur. Aber nicht nur in Deutschland, auch weltweit treten Extremwetterereignisse auf, wie die großen Unwetter über Japan oder die schweren Waldbrände in Schweden, Griechenland und Portugal, aber auch Kalifornien. Der Untersuchung dieser Ereignisse und ihrer drastischen Folgen für Mensch und Umwelt widmet sich der Forschungsverbund „Regionale Klimaänderungen REKLIM“ seit 2009.

Prof. Dr. Peter Lemke vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven steht REKLIM als wissenschaftlichem Koordinator seit fast zehn Jahren vor und übergibt zum 1. September 2018 die wissenschaftliche Leitung an Prof. Dr. Peter Braesicke vom Karlsruher Institut für Technologie.

Was sind für Sie, Herr Prof. Lemke, die wichtigsten Errungenschaften des Verbundes in den letzten Jahren?

„Ziel des Verbundes war und ist es, die regionalen Auswirkungen der globalen Erwärmung zu bestimmen, um verlässliche Grundlagen für Entscheidungsträger in Politik, Behörden, Wirtschaft und Öffentlichkeit zu schaffen und eine verbesserte Basis für regionale Anpassungs- und Vermeidungsstrategien zu entwickeln. REKLIM hat sich in den vergangenen neun Jahren sehr erfolgreich etabliert. Dies lässt sich an den zahlreichen gemeinsamen Publikationen und den 30 erfolgreich abgeschlossenen Doktorarbeiten ablesen. 2014 wurde die erste internationale REKLIM-Konferenz in Berlin mit großem Erfolg durchgeführt. Aber insbesondere der Dialog mit gesellschaftlichen Akteuren zu regionalspezifischen Themen konnte durch die jährlichen Regionalkonferenzen in verschiedenen deutschen Städten sowie durch die jährlichen Berichte zu laufenden Forschungsaktivitäten zunehmend ausgebaut werden. So ist ein intensiver Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft entstanden, der Forschung in die Mitte der Gesellschaft rückt und die Ergebnisse in die Umsetzung bringt.“

Mit der Übergabe der wissenschaftlichen Koordination an Sie, Herr Prof. Braesicke, treten Sie in große Fußstapfen. Was sind die Herausforderungen und ihre Motivation, dieses Amt nun zu übernehmen?

„Als ich im Herbst 2013 an das KIT kam, war einer meiner ersten offiziellen Termine der Besuch der REKLIM Regionalkonferenz in München. Dort wurde ich dann als Topic-Sprecher für Thema 5 „angeworben“ und durfte REKLIM seitdem in dieser Rolle begleiten und mitgestalten. Mit hoch motivierten Kolleginnen und Kollegen und einem tollen Team in der Geschäftsstelle in Bremerhaven hat Peter Lemke REKLIM in den letzten Jahren gestaltet und erfolgreich weiterentwickelt. Ich bin sehr dankbar, dass ich auch Teil dieses Gestaltungsprozesses sein durfte und freue mich auf die weitere Entwicklung unseres Verbundes.

REKLIM bietet die Möglichkeit zur Zusammenarbeit über thematische Grenzen hinweg. Es verbindet Themen, Helmholtz-Zentren, Wissenschaftler/innen und gesellschaftliche Akteure und ermöglicht einen konstruktiven Austausch zu einem wichtigen Gegenwartsthema: dem regionalen Klimawandel und was er für den Menschen bedeutet! Themen und Strukturen wurden dahingehend immer weiterentwickelt und an neue Fragestellungen angepasst.

Mit der Staffelübergabe am 1. September 2018 von Peter Lemke an mich geht REKLIM als Forschungsverbund und Netzwerk aber noch einen Schritt weiter: Der wissenschaftliche Koordinator wird nun im Süden sitzen, während die Geschäftsstelle weiter im Norden agiert – ein schönes Sinnbild für die übergreifenden Strukturen, die REKLIM auch weiterhin fördern möchte. Und Peter Lemke wird noch bis Ende 2019 beratend zur Seite stehen und seine Erfahrung und Kompetenz in den Verbund einbringen!“

Prof. Dr. Peter Lemke (AWI)
Ausscheidender wissenschaftlicher Koordinator des Helmholtz-Verbundes REKLIM. (Foto: Susanna Mohr, KIT)

Prof. Dr. Peter Braesicke (KIT)
Zukünftiger wissenschaftlicher Koordinator des Helmholtz-Verbundes REKLIM. (Foto: Susanna Mohr, KIT)

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

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Forschungszentrum Jülich
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum
Helmholtz Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung
Karlsruher Institut für Technologie
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

BETEILIGTE UNIVERSITÄRE PARTNER

Europa-Universität Viadrina (EUV)
Universität Bremen (UHB)
Universität Heidelberg (UHD)
Universität Hamburg (UHH)
Universität zu Köln (UK)
KIT - Universitätsbereich (UKA)
Universität Leipzig (UL)
Technische Universität München (TUM)
Universität Potsdam (UP)

Impressum

Koordinierungsstelle Helmholtz-Verbund REKLIM
Wissenschaftlicher Koordinator:
Prof. Dr. Peter Braesicke (KIT)
Geschäftsführer:
Dr. Klaus Grosfeld (AWI)
Projektmitarbeiterin:
Dipl.-Geogr. Marietta Weigelt (AWI)

Kontakt für Anfragen:
Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

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

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

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

Herausgeber:
Helmholtz-Verbund REKLIM, 2018

Texte und Abbildungen:
Mitglieder des Helmholtz-Verbundes REKLIM

Redaktion und Konzeption:
Prof. Dr. Peter Lemke (AWI)
Prof. Dr. Peter Braesicke (KIT)
Dr. Klaus Grosfeld (AWI)
Dr. Renate Treffeisen (AWI)
Dipl.-Geogr. Marietta Weigelt (AWI)

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

Sprecherinnen und Sprecher der Themenschwerpunkte:

Thema 1: Dr. Burkhardt Rockel (HZG), Dr. Annette Rinke (AWI)
Thema 2: Dr. Klaus Grosfeld (AWI), Dr. Ingo Sasgen (AWI)
Thema 3: Dr. Birgit Heim (AWI), Dr. Heidrun Matthes (AWI), Prof. Dr. Torsten Sachs (GFZ)
Thema 4: Prof. Dr. Hans Peter Schmid (KIT), Dr. Andreas Marx (UFZ)
Thema 5: Prof. Dr. Peter Braesicke (KIT), PD Dr. Hendrik Elbern (FZJ, UK)
Thema 6: Prof. Dr. Michael Kunz (KIT), Dr. Frauke Feser (HZG)
Thema 7: Prof. Dr. Reimund Schwarze (UFZ), Prof. Dr. Beate Ratter (HZG)
Thema 8: Prof. Dr. Ralf Tiedemann (AWI), Prof. Dr. Achim Brauer (GFZ)

Sprecherinnen der Regionalen Helmholtz Klimabüros:
Dr. Insa Meinke (HZG)
Dr. Renate Treffeisen (AWI)

Gestaltung:
Koordinierungsstelle REKLIM

Druck:
Girzig+Gottschalk GmbH, Bremen

ClimatePartner
klimaneutral
Druck | ID 12164-1707-1001

Inhalt

IM FOKUS	1	Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme	4
	2	Meeresspiegeländerungen von globaler zu regionaler und lokaler Skala	8
	3	Regionale Klimaänderungen in der Arktis	10
	4	Landoberflächen im Klimasystem	12
	5	Atmosphärische Zusammensetzung und Klima: Wechselwirkungen von globalen zu regionalen Skalen	14
	6	Modellierung und Verständnis extremer meteorologischer Ereignisse	16
	7	Risikoanalyse und Risikomanagement für integrierte Klimastrategien	18
IM FOKUS	8	Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten	20
		Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im REKLIM Verbund	24
		REKLIM Wissenstransfer	26
		Die regionalen Klimabüros in der Helmholtz-Gemeinschaft	30
		Referenzen, Autoren und Fotonachweise	32

IM FOKUS 1

AWI | GEOMAR | HZG | KIT | UFZ

Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme

Wie hängt die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre-Ozean-Eis und Landoberflächen ab? Was sind Schlüsselprozesse und Rückkopplungsmechanismen, die in Klimamodellen berücksichtigt werden müssen? Welchen Einfluss haben natürliche und anthropogene Prozesse?

Meereis in gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Eis-Modellen

Während der letzten drei Jahrzehnte wird ein signifikanter, rapider Anstieg der oberflächennahen Lufttemperatur in der Arktis beobachtet. Dieser ist ungefähr doppelt so stark wie die globale Erwärmung, daher wird dieses Phänomen „Arktische Verstärkung“ genannt. Diese Erwärmung ruft andere dramatische Umweltveränderungen in der Arktis hervor, wie zum Beispiel den markanten Meereisrückgang. Dieser wird anhand von Satellitendaten seit circa 1979 dokumentiert. Die Klimamodelle haben jedoch immer noch Schwierigkeiten, diesen Meereisrückgang in der Arktis adäquat zu reproduzieren. Die meisten globalen Klimamodelle simulieren, verglichen mit Beobachtungen, einen zu schwachen Eisverlust. Dies zeigt, dass wichtige Schlüsselprozesse und Rückkopplungsmechanismen in den Modellen noch nicht gut genug beschrieben werden.

Das arktische Meereis spielt eine wichtige Rolle für das Klima der Erde. Durch das Meereis wird das arktische Klimasystem reguliert, indem es einfallende Sonnenstrahlung reflektiert und den Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean moduliert. Das Meereis in der Arktis ist ein wichtiger Indikator für den globalen Klimawandel und seiner Verstärkung. Folglich besteht ein breites Interesse an der Meereisbedeckung, dessen Variabilität und langfristigen Veränderungen. Im gekoppelten Klimasystem müssen wir verstehen, welche Rolle die regionalen Atmosphäre-Eis-Ozean-Rückkopplungen spielen und wie diese in den Modellen berücksichtigt werden können. Schlüsselfragen sind: Was sind die Mechanismen für den schnellen Meereisrückgang in der Arktis? Wie gelingt eine verlässliche Vorhersage und Projektion für die Zukunft?

Optimierung der Meereismodellparameter

Die Verbesserung und Optimierung numerischer Meereismodelle ist für aktuelle Klimasimulationen und zuverlässige Prognosen von großer Bedeutung. Um die Meereissimulation für den Arktischen Ozean zu verbessern, wurde innerhalb von REKLIM am AWI ein automatisches Parameteroptimierungssystem für gekoppelte Ozean-Meereismodelle entwickelt. Dieser Algorithmus ist ein stochastischer Optimierungsalgorithmus, der für die Erzielung einer optimalen Lösung für komplexe Systeme verwendet wird. Jüngste Fortschritte der parallelen Berechnungsumgebung ermöglichen es erstmals, den Algorithmus zur Optimierung der arktischen Meereissimulation anzuwenden (Sumata et al., 2013).

Das System ist auf die gleichzeitige Optimierung von 15 Modellparametern ausgelegt, um die wechselseitige Verknüpfung verschiedener physikalischer Prozesse zu berücksichtigen. Der Algorithmus sucht den optimalen Parametersatz, der den

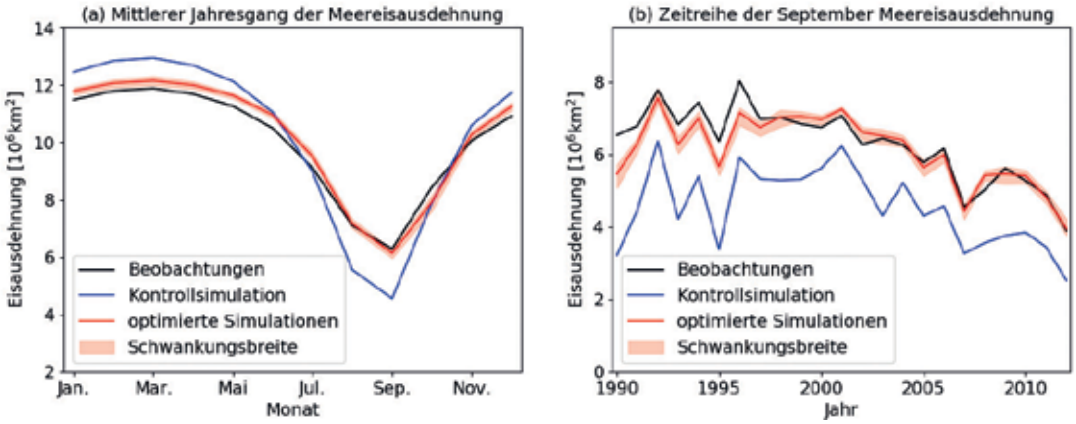


Abb. 1.1: Simulierte und beobachtete Meereisausdehnung im Arktischen Ozean, basierend auf Satellitenbeobachtungen (schwarz) und der NAOSIM Kontrollsimulation (blau) und optimierten Simulationen (rot), für 1990-2012. Der hellrote Bereich kennzeichnet die Schwankungsbreite (berandet durch das Minimum und Maximum der elf optimierten Simulationen). (a) Mittlerer Jahresgang der Meereisausdehnung und (b) Jahr-zu-Jahr Variation der September-Meereisausdehnung. Die Eisausdehnung ist definiert als die mit einer Eiskonzentration von mindestens 15 % bedeckten Meereisfläche. (Grafik: Hiroshi Sumata, AWI)

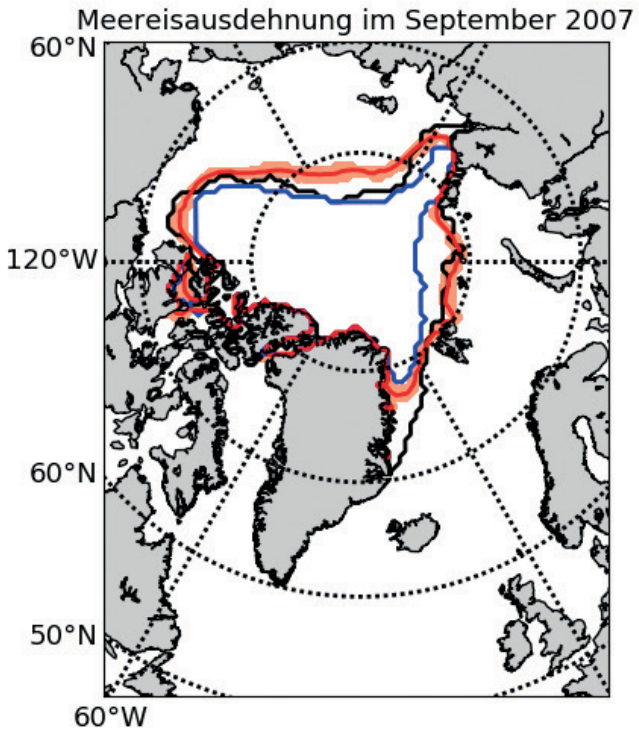


Abb. 1.2: Meereisausdehnung im September 2007. Schwarze Linie: beobachtete Meereisausdehnung, basierend auf Satellitenmessungen; blaue Linie: Eisausdehnung der NAOSIM Kontrollsimulation (keine Optimierung), rote Linie: Eisausdehnung der optimierten Simulationen. Der hellrote Bereich kennzeichnet die Schwankungsbreite der elf optimierten Simulationen. (Grafik: Hiroshi Sumata, AWI)

Fehler zwischen Modell und Beobachtung für drei Meereiseigenschaften (Eiskonzentration, Eisdrift und Eisdicke) minimiert. Das System wird für das gekoppelte Ozean-Meereismodell NAOSIM und eine Region angewandt, die den gesamten Arktischen Ozean und nördlichen Nordatlantik mit einem Assimilationsfenster von mehr als zwei Jahrzehnten (1990-2012) abdeckt. Der Algorithmus verbessert erfolgreich den simulierten Zustand des Meereises und teilweise des Ozeans (Abb. 1.1). Die Ausgangssimulation (Kontrollsimulation) dieses Regionalmodells hat sowohl im Winter als auch im Sommer große Fehler in der Meereisausdehnung im Vergleich zu Beobachtungsdaten. Im Sommer wird die Eisausdehnung unterschätzt und im Winter überschätzt (Abb. 1.1a). Durch die Optimierung ist die simulierte Eisausdehnung viel näher an der Beobachtung. Auch die Variation der Eisausdehnung von Jahr zu Jahr nähert sich der Beobachtung zufriedenstellend an (Abb. 1.1b).

Die Verbesserung findet sich auch in den räumlichen Mustern des Meereisfeldes. Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel für das im September 2007 beobachtete Meereis-Minimum. Die ursprüngliche Simulation weist eine geringere Eisausdehnung auf der atlantischen Seite der Arktis auf (nördlich des Eurasischen Plateaus), was sich durch die Optimierung verbessert hat. Das Optimierungssystem wird in Zukunft zur Verbesserung der Meereisfelder von laufenden Klimasimulationen eingesetzt werden.

Rückkopplungen zwischen Meereis und Atmosphäre

Mit dem Meereisrückgang verbundene veränderte Albedo (Rückstreuvermögen der Oberfläche) sowie Wärme-, Feuchte- und Impulsflüsse zwischen Eis-Ozean und Atmosphäre und damit zusammenhängende Rückkopplungsmechanismen haben das Potential, die Wolken und Strahlung als auch die vertikale Stabilität der untersten Luftschichten und die arktischen Zyklonen, d. h. Tiefdruckgebiete regional zu verändern. Diese wiederum stehen in Wechselwirkung mit sogenannten langen planetaren Wellen (großräumigen Luftmassenzirkulationen der Erdatmosphäre, z. B. polare Jetstreams), deren horizontale und vertikale Ausbreitung beeinflusst werden kann. Infolgedessen können hierdurch auch die großskalige atmosphärische Zirkulation und atmosphärische Fernwirkungsmuster (wie die Arktische Oszillation) beeinflusst werden (Dethloff et al., 2018).

Es wurden Ensemblesimulationen mit dem regionalen gekoppelten Atmosphäre-Meereis-Ozean-Modell HIRHAM-NAOSIM durchgeführt, um atmosphärische Rückkopplungen mit sommerlichen (September) Meereisanomalien zu untersuchen (Rinke et al., 2013). Es zeigt sich, dass die Stärke und die regionale Position der Meereisanomalie im späten Sommer

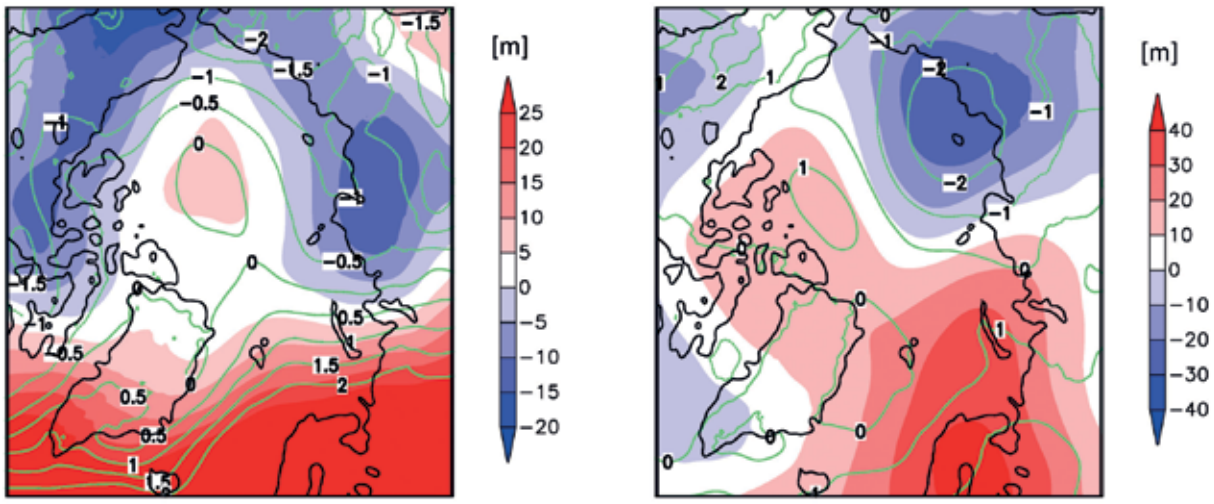


Abb. 1.3: Simulierte Differenzen im Bodenluftdruck (grüne Isolinien; hPa) und 500 hPa geopotentielle Höhe (Farbkontour; m) für die Modellsimulation "Geringe minus hohe Eisbedeckung" für Herbst (links) und Winter (rechts), basierend auf HIRHAM-NAOSIM Simulationen für 1979-2014. (Grafik: Ines Hebestadt, AWI)

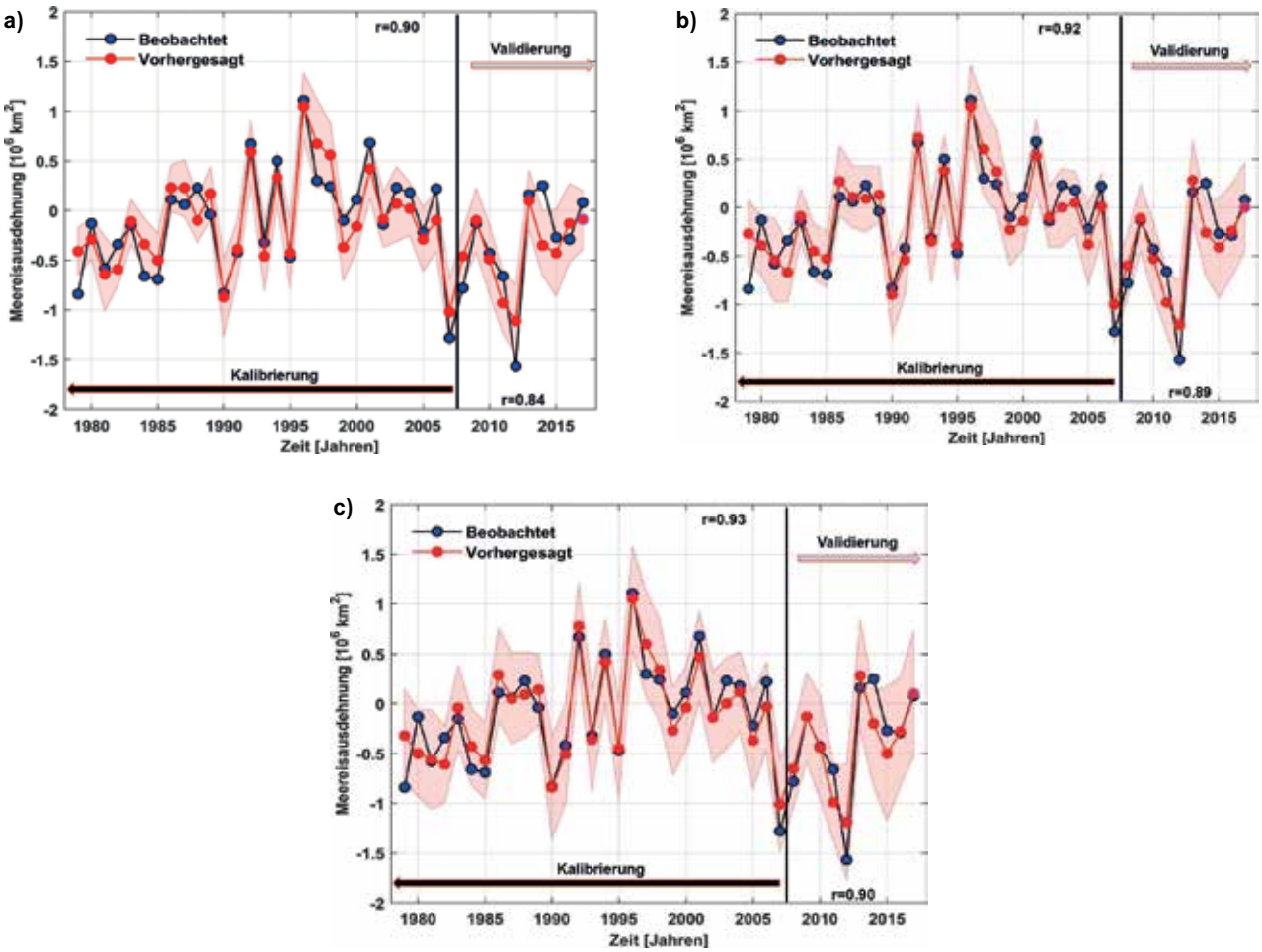


Abb. 1.4: Trend-bereinigte Anomalien der beobachteten (blaue) und vorhergesagten (rote) arktischen Meereisausdehnung im Zeitraum 1979-2017 basierend auf Datensätzen a) Mai, b) Juni und c) Juli relevanter klimatologischer Parameter von Atmosphäre und Ozean in identifizierten stabilen Regionen. Der Zeitraum 1979-2007 wurde für die Kalibrierung des statistischen Modells verwendet, während der Zeitraum 2008-2017 als Validierungsperiode angewendet wurde. Der schattierte Bereich repräsentiert die 95 % Unsicherheitsgrenzen. (Grafik: Monica Ionita, AWI)

bzw. Anfang Herbst und damit die Muster der turbulenten Wärme- und Feuchteflüsse an der Ozean-Atmosphäre-Nahtstelle die Rückkopplungsmuster in der atmosphärischen Zirkulation bestimmen. Diese variieren entsprechend stark von Jahr zu Jahr. Unabhängig davon simuliert man aber im folgenden Winter ein konsistentes atmosphärisches Muster, welches der Skandinavien/Ural Blockierung entspricht und einen veränderten Luftmassentransport (mehr nördlich als westlich) in Europa begünstigt. Dieses Phänomen kann zu verstärkten Kaltlufteinflüssen aus der Arktis in die mittleren Breiten führen, wie wir es auch im Winter 2017/2018 in Nordeuropa beobachtet haben (Abb. 1.3). Damit einhergehend kann auch ein Rückgang der Zyklonenaktivität in dieser Region im Winter in den Analysen festgestellt werden, was ebenso durch Beobachtungen gestützt wird (Rinke et al., 2017).

Meereisvorhersage – ein neuer statistischer Ansatz

Die Vorhersagbarkeit von Meereis ist komplex und hängt von verschiedenen atmosphärischen und ozeanischen Parametern ab. Um das Verständnis der möglichen Entwicklung eines monatlichen bzw. saisonalen Signals der Meereisentwicklung zu verbessern, konnte im Rahmen von REKLIM ein robustes statistisches Vorhersagemodell basierend auf verschiedenen ozeanischen und atmosphärischen Variablen entwickelt werden, um eine Schätzung der September Meereisausdehnung (SSIE) auf monatlicher Zeitskala zu berechnen. Das statistische Modell basiert auf einer Methodik von Ionita et al. (2008, 2015) und berücksichtigt verschiedene Variablen, um eine Schätzung von SSIE zu berechnen: Luftdruck auf Meeresniveau, Lufttemperatur, Niederschlagswassergehalt, zonale und meridionale Komponenten des Oberflächenwindes, Wärmegehalt der Ozeane integriert über die oberen 700 m, Meeresoberflächentemperatur und Wassertemperatur integriert über die obersten 100 m. Die Grundidee dieses Verfahrens besteht darin, Regionen mit stabilen Fernfeldverbindungen (sog. Fernwirkungen) zwischen den Prädiktoren (Wirkungsvariablen – hier die o. g. klimatologischen Parameter) und der Vorhersage (hier die Zeitreihe der Meereisausdehnung SSIE) zu identifizieren. Die SSIE wurde mit den potenziellen Prädiktoren der vergangenen Monate (Jahre) in einem beweglichen Zeitfenster von 21 Jahren korreliert. Die Korrelation gilt als stabil für diejenigen Gitterpunkte, bei

denen SSIE und die klimatologischen Parameter im Zeitraum 1979-2007 bei 95 %, 90 %, 85 % und 80 % für mehr als 80 % des betrachteten 21-jährigen Zeitfensters signifikant korreliert sind. Mit der neuen Methode konnte gezeigt werden, dass die Meereisausdehnung im September eine hohe Vorhersagegüte bis zu vier Monate im Voraus hat, basierend auf einer Verknüpfung unterschiedlicher atmosphärischer und ozeanischer Bedingungen der vorhergehenden Monate (Abb. 1.4). Dieses neue statistische Modell erfasst erfolgreich die Jahr-zu-Jahr Variabilität der SSIE. Der Ansatz könnte ein wertvolles Instrument zur Identifizierung relevanter Regionen und atmosphärischer Parameter sein, die für die Entwicklung des arktischen Meereises und für die Erkennung sensitiver bzw. kritischer Regionen in globalen, gekoppelten Klimamodellen für die Meereisbildung wichtig sind.

meereisportal.de – Informationen rund um das Thema Meereis auf einer Website

Die seit 2013 bestehende Wissensplattform (Abb. 1.5) wurde im Rahmen von REKLIM als Gemeinschaftsprojekt mit der Universität Bremen und dem Alfred-Wegener-Instituts Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung entwickelt und liefert umfassende Informationen in deutscher Sprache zum Thema Meereis (Grosfeld et al., 2016). Sie wird kontinuierlich erweitert und an die Anforderungen und Fragen der Nutzer angepasst. Auf der Seite finden sich regelmäßig Bewertungen der aktuellen Meereissituation der Arktis und Antarktis, leicht verständlich aufbereitete, wissenschaftliche Veröffentlichungen, wie auch Berichte von aktuellen Forschungsaktivitäten. Darüber hinaus bietet die Website ein umfangreiches Kartenarchiv von mehr als 40 000 Karten und zahlreiche Animationen der Meereisentwicklung.

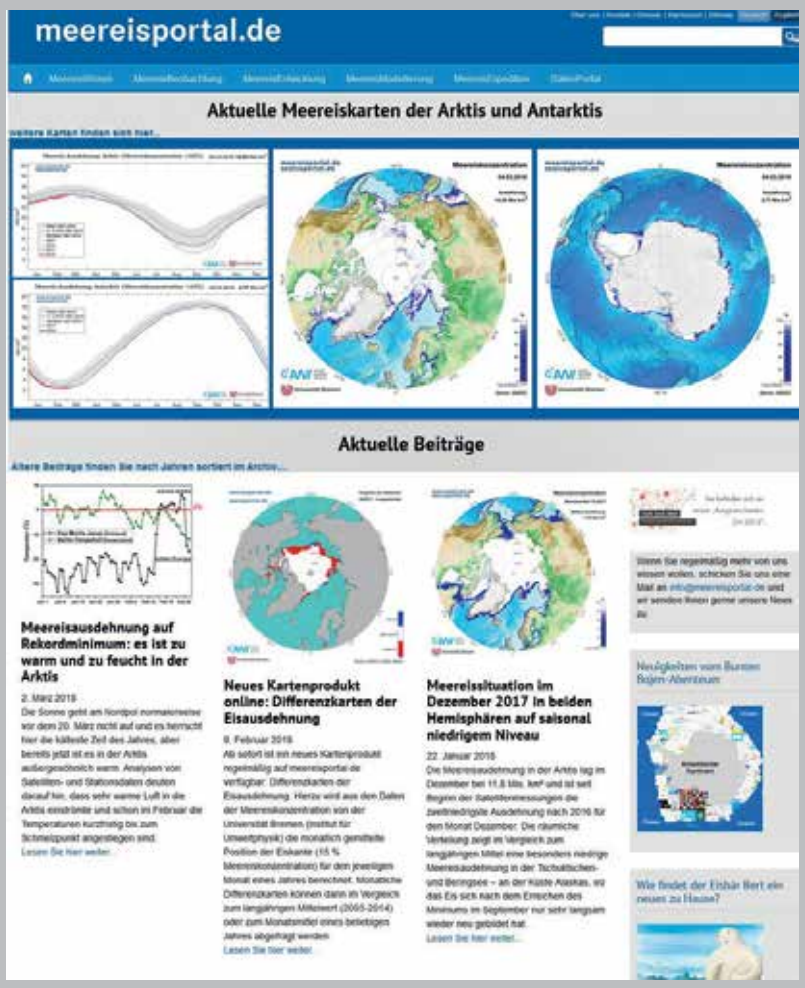


Abb. 1.5: Startseite der Webseite meereisportal.de mit Informationen zum Thema Meereis.

AWI | GEOMAR | GFZ | HZG

2 Meeresspiegeländerungen von globaler zu regionaler und lokaler Skala

Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen und wie reagiert der Meeresspiegel auf Schmelzwasser und Erwärmung?

Neustart von Satelliten-Schwerefeldmessungen zur Eismassenbilanzbestimmung

Am 22. Mai 2018 um 12:47 Uhr Ortszeit PST (21:47 Uhr deutscher Zeit) wurde vom Vandenberg Luftwaffenstützpunkt in Kalifornien (USA) der Nachfolger GRACE Follow-On (FO) der Schwerefeldmission GRACE in den Orbit geschossen. Der Launch sowie die Pressekonferenz im Vorfeld lässt sich unter https://www.youtube.com/watch?v=Tvdz5yFSwCY noch einmal ansehen. GRACE-FO setzt die Messungen der GRACE Mission fort, die über 15 Jahre lang einmalige Daten zur Massenbilanz der Eisschilde, der Gletscher und zum Meeresspiegelanstieg lieferte. Die wissenschaftliche Betreuung der aktuellen GRACE-FO Mission liegt, wie bei der Vorgängermission GRACE, beim Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) und bei der NASA. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt führt im Auftrag des GFZ den Missionsbetrieb durch. Das AWI ist an der Erstellung von Datenprodukten für die Polarregionen beteiligt und hat sich an den Kosten für die Falcon-9-Trägerrakete von SpaceX beteiligt.

GRACE ist die Abkürzung für „Gravity Recovery And Climate Experiment“, was man frei mit „Schwerefeld-Messung und Klimaexperiment“ übersetzen kann. Die Satelliten haben die Aufgabe, das Schwerefeld der Erde einmal pro Monat vollständig mit einer räumlichen Auflösung von rund 400 km zu vermessen. Das Messprinzip ist in Abb. 2.2 dargestellt: Die beiden Satelliten fliegen in einem Abstand von etwa 220 Kilometern hintereinander her und überprüfen mit einem Mikrowellenradar permanent ihren Abstand zueinander. Überfliegt der erste Satellit einen Bereich mit erhöhter Schwerkraft, wird er leicht angezogen und dadurch beschleunigt. Der Abstand zum zweiten Satelliten vergrößert sich. Diese Abweichung ist proportional zum Unterschied im Erdanziehungsfeld zwischen beiden Satelliten. Entscheidend für die Schätzung eines genauen Schwerefeldes und damit der Masseverteilung unter dem Satelliten ist die Messgenauigkeit des Mikrowelleninterferometers (KBR), mit dem sich der Abstand beider Satelliten auf einige Mikrometer genau bestimmen lässt.

Abb. 2.1: Launch des GRACE-FO Satellitenduos auf einer SpaceX Falcon 9 Trägerrakete vom Vandenberg Luftwaffenstützpunkt in Kalifornien, USA. (Quelle: NASA/Bill Ingalls)

Auch bei der GRACE-FO Mission kommt das KBR zum Einsatz. „Man hat auf bewährte Technik gesetzt, um schnell eine zweite Mission starten zu können und nicht zu viel Zeit zu verlieren und Datenlücken zu riskieren“, erklärt Ingo Sasgen. „Zusätzlich ist aber noch ein Laser Ranging Interferometer (LRI) an Bord, das während dieser Mission getestet wird. Es ist rund 25-mal genauer als das Mikrowellenradar und kann damit die Analyse des Schwerefeldes verbessern.“ Inzwischen wurde das LRI eingeschaltet und liefert, wie alle anderen Instrumente, Präzisionsmessungen entsprechend den Erwartungen. GRACE lieferte für Juni 2017 die letzte Monatslösung und das erste Schwerefeld von GRACE-FO wird für den Sommer 2018 erwartet, wodurch eine Datenlücke von etwa einem Jahr entsteht.

Für die Beobachtung der Massenbilanz der Eisschilde sind die GRACE/GRACE-FO Daten von entscheidender Bedeutung und der Meeresspiegelbeitrag konnte dadurch mit unerreichter Genauigkeit bestimmt werden (Abb. 2.3; aktualisiert nach Sasgen et al. 2012). Für das Grönländische Eisschild betrifft die Datenlücke Teile der Schmelzsaison in 2017 und 2018. Im Februar 2018 wurden in Nordostgrönland Oberflächentemperaturen aufgezeichnet, die kurzfristig über dem Gefrierpunkt lagen. Ob sich diese Anomalie auch in der Massenbilanz ausgewirkt hat, bleibt Spekulation. Zwar existieren Radarmessungen zur Eishöhenänderung durch den ESA-Satelliten CryoSat-2, die, mit typischerweise 5 km, eine deutlich höhere räumliche Auflösung haben und zeigen, an welcher Stelle sich genau die Mächtigkeit der Gletscher verändert hat. Die Radarstrahlen dringen allerdings ein wenig in den Schnee und das Eis ein, was die exakte Messung der Schnee- oder Eishöhe schwierig

Messprinzip von GRACE/GRACE-FO

Die GRACE/GRACE-FO-Messung wird von zwei identischen Satelliten (GRACE A und B) durchgeführt, die in einer nahezu polaren, erdnahen Umlaufbahn hintereinander die Erde umkreisen. Der Abstand zwischen den Satelliten wird dabei in einem Bereich von 220 km ± 50 km gehalten. Die Satelliten erfahren positive und negative gravitationsbedingte Beschleunigungen entlang der Bahn aufgrund der unterschiedlichen Massenverteilung darunter. Jeder Satellit wird die Schwerewirkung der Massen zu etwas unterschiedlichen Zeitpunkten erfahren, was eine relative Beschleunigung verursacht. Die Differenzbeschleunigung wiederum bewirkt eine Änderung des Abstandes der Satelliten, sowie eine Geschwindigkeitsdifferenz Δv, die proportional zur Massenverteilung ist. Der relative Abstand zwischen den Satelliten wird mit Mikrometergenauigkeit durch ein K/Ka-Band-Entfernungsmesssystem (KBR) gemessen.

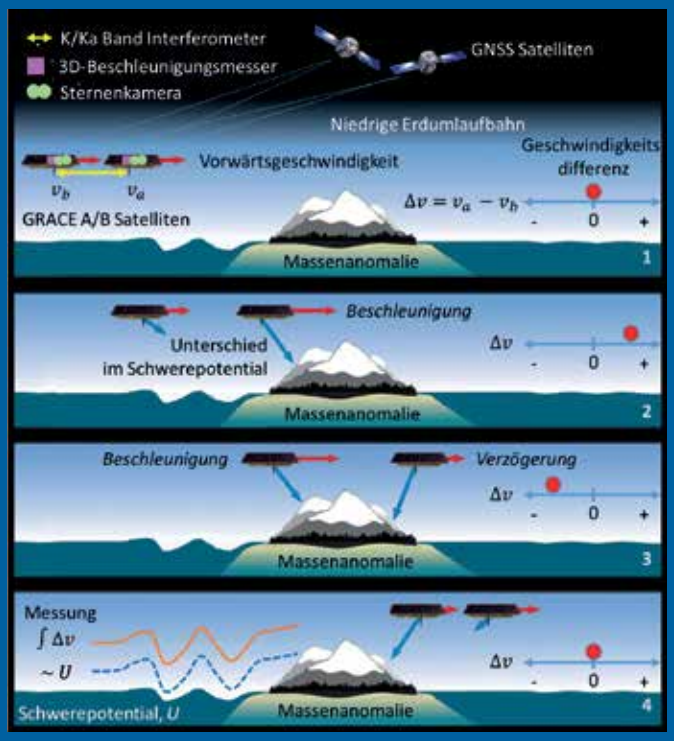


Abb. 2.2: Messprinzip der GRACE Satellitenmission zur Bestimmung des Erdschwerefelds. (Grafik: NASA/AWI)

Ein empfindlicher dreiachsiger Beschleunigungsmesser (ACC) misst Störkräfte, die nicht durch die Schwerewirkung der Erdmassen verursacht werden, wie z. B. den Reibungswiderstand der Restatmosphäre und den Strahlungsdruck der Sonne. Ein GPS-Empfänger an jedem Satelliten liefert Positionsdaten und die Zeitsynchronisation, und eine Doppelsternkamera (SCA) gibt Informationen über die Satellitenorientierung im Weltraum.

Die Satelliten überfliegen die gesamte Erdoberfläche innerhalb von etwa 30 Tagen. Dies ermöglicht eine monatliche Schätzung des Erdschwerefelds mit einer räumlichen Auflösung von 200 bis 400 km. Ein mittleres Feld wird aus den monatlichen Lösungen für die gesamte Missionsdauer bestimmt. Dabei müssen auch kurzperiodische Massenvariationen in der Atmosphäre und dem Ozean berücksichtigt werden, die sonst durch Aliasing-Effekte das Monatsfeld verschlechtern würden. Die Abweichungen vom mittleren Feld repräsentieren die zeitvariablen Schwerkraftänderungen, die hauptsächlich durch die Umverteilung von Wassermassen auf der Erdoberfläche verursacht werden, z. B. infolge von Massenverlusten der polaren Eisschilde oder die dadurch verursachte Meeresspiegeländerung.

macht. Hinzu kommt, dass sich die Schneeauflage nach und nach unter ihrem eigenen Gewicht kompaktiert und sich diese Höhenänderungen mit denen, die durch Massenänderung (z. B. das sommerliche Schmelzen) entstehen, überlagert. Idealerweise werden die Messungen beider Satellitensysteme kombiniert, was Teil gegenwärtiger Arbeiten in REKLIM Topic 2 ist. Das Ziel ist eine Karte der Eismassenänderungen, die sowohl kleinräumige Strukturen aber auch die Gesamtmassenbilanz des antarktischen Eisschilds mit höherer Genauigkeit wiedergibt. Diese Daten sollen zukünftig im gemeinsamen GRACE-Datenportal vom GFZ und AWI zur Verfügung gestellt werden http://gravis.gfz-potsdam.de/home.

Wie beim Vorgänger ist die Missionsdauer von GRACE-FO zunächst auf fünf Jahre angesetzt. Die tatsächliche Dauer wird unter anderem von der Bremswirkung des Strahlungsdrucks der Sonne bestimmt. Die Sonnenaktivität während der GRACE Mission war sehr gering, was die Lebenszeit der Mission um rund zehn Jahre verlängert hat. Ob in den kommenden Jahren ähnlich gute Bedingungen vorherrschen bleibt abzuwarten. Möglich ist eine Zeitreihe von insgesamt 30 Jahren, die für Klimamodelle als Basislinie für langfristige Projektionen eine aussagekräftige Zeitspanne darstellt. Die heute aufgenommenen Daten dürften somit noch in Jahrzehnten für die Klimaforschung von Bedeutung sein.

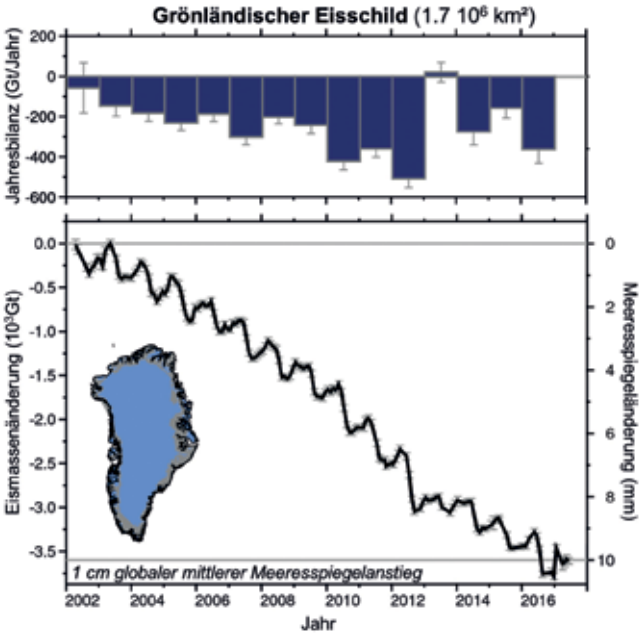


Abb. 2.3: Jährliche Massenbilanz des Grönländischen Eisschildes in Gt/Jahre (oben); integrierte Eismassenveränderung sowie berechnete Meeresspiegeländerung im Zeitraum April 2002 bis Juni 2017 (Lebenszeit der GRACE-Mission) (unten); nach Sasgen et al., 2012, aktualisiert.

3 Regionale Klimaänderungen in der Arktis

Wie wirkt sich der Klimawandel auf den arktischen Ozean, das Meereis und die Permafrostregionen aus? Was sind die Wechselwirkungen zwischen Kryosphäre, Landoberflächen, Ozean und Atmosphäre? Kann unser zunehmender Fortschritt in neuen Technologien und Messmethoden das Verständnis von klimarelevanten Prozessen in den hohen Breiten verbessern?

Um die Auswirkungen des Klimawandels in der Arktis zu erfassen müssen Land, Atmosphäre, das Meer, die Kryosphäre und die regionalen sozioökonomischen Effekte auf den Menschen umfassend erfasst und verstanden werden. Mit der Erwärmung der Arktis steigt die Dringlichkeit dieses Themas. Neue Forschungsstudien und -projekte bedienen sich moderner Messmethoden, um Teilaspekte in diesem Themenfeld zu adressieren.

Die Regionale Bedeutung von Methanemissionen aus Seen in Permafrostgebieten

Tauender arktischer Permafrost emittiert das Treibhausgas Methan. In der heterogenen Landschaft gelten insbesondere flache Seen als starke Methanquellen (Wik et al., 2016). Allerdings ist wegen der geringen Anzahl an lokalen Messungen nur wenig über die Bedeutung von Seenemissionen auf regionaler Ebene bekannt. Eine neue Studie untersuchte die regionale Rolle der Methanemissionen von Seen, basierend auf regionalen Flugzeugmessungen und Fernerkundungsdaten. Kohnert et al. (2018) analysierten zum einen, ob die Methanemissionen von Wasseroberflächen höher sind als die von Landoberflächen und zum anderen, ob die Anzahl an flachen Seen in einer Region positiv mit den Methanemissionen korreliert.

Die zwei Untersuchungsgebiete der Studie mit je einer Fläche von 1000 km² liegen im Mackenzie Delta in der kanadischen Arktis (Abb. 3.1a-c). Dort wurden während der Messkampagnen „Airborne Measurements of Methane Fluxes (AIRMETH)“ im Sommer 2012 und 2013 flugzeuggestützte Methanflussmessungen durchgeführt (Abb. 3.1b). Die Methanflüsse wurden mittels der Eddy-Kovarianz-Methode nach Metzger et al. (2013) berechnet. Innerhalb der Einflussbereiche der Flüsse wurde eine Methanflusskarte mit einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m erstellt (Kohnert et al., 2017) und auf die beiden Untersuchungsgebiete zugeschnitten (Abb. 3.1d).

Die Seen-Klassifikation in den Untersuchungsgebieten wurden aus der „Permafrost Region Pond and Lake (PeRL)“ Datenbank (Muster et al., 2017) übernommen, die auf Satellitendaten von TerraSAR-X basiert und eine Auflösung von 2,5 m hat. Um zwischen tiefen und flachen Seen zu unterscheiden, wurden Rückstreuungsdaten (Sentinel-1 SAR-Satellitendaten) aus dem Winter verwendet. Die Eisdecke in Seen im Mackenzie Delta kann eine Mächtigkeit von etwa zwei Metern erreichen. Daher frieren flachere Seen vollständig zu, während in tieferen Seen ganzjährig ungefrorenes Wasser unter der Eisschicht verbleibt. Diese Unterschiede in den Eisregimen führen zu verschiedenen Rückstreuungen der SAR-Signale. Tiefe Seen weisen eine hohe Rückstreuung auf, da das Signal an der Grenze zwischen Wasser und Eis zurückgestreut wird, während das SAR-Signal bei flachen Seen weitgehend durch das Eis in den Boden geleitet wird (Antonova et al., 2016). So wurden die Seen in den

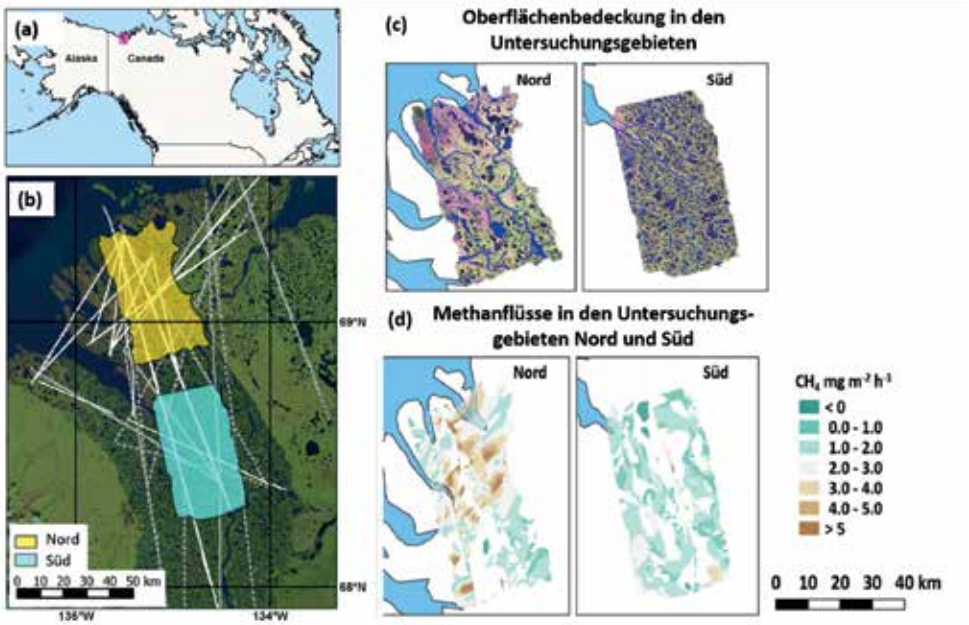


Abb. 3.1: (a) Lage des Mackenzie Deltas in Kanada. (b) Lage der Untersuchungsgebiete im Mackenzie Delta mit den Flugstrecken von 2012 (durchgehend) und 2013 (gepunktet). (c) Landoberfläche in den Untersuchungsgebieten. (d) Karten der Methanflüsse (Abbildungen verändert nach Kohnert et al., 2018).

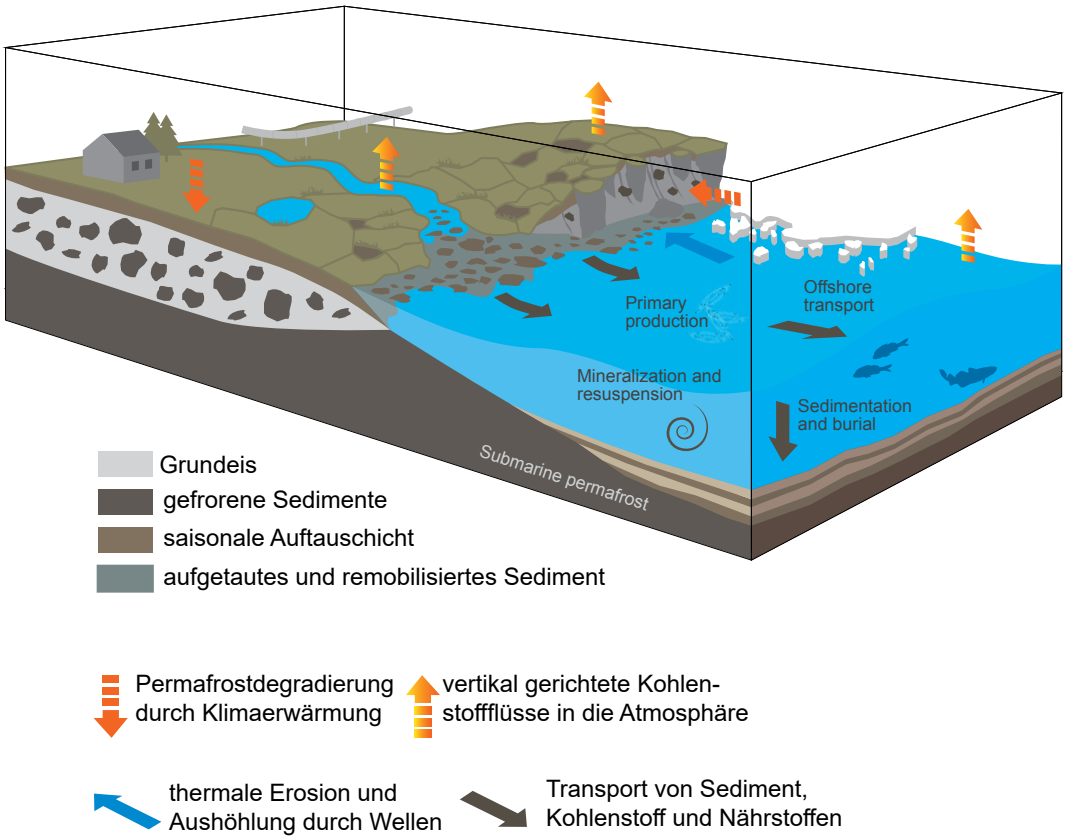


Abb. 3.2: Prozesse entlang arktischer Permafrostküsten: Küstenerosion führt zu vertikalen (Treibhausgase) und lateralen Kohlenstoffflüssen aus den Landoberflächen (rote Pfeile zeigen die Permafrostdegradierung durch sommerliches Auftauen und Küstenerosion an). Verstärkte Trübung und Einbringung von Nähr- und Schadstoffen ändert die Funktion der marinen Ökosysteme. Diese Veränderungen können große sozioökonomische Auswirkungen hervorrufen, wie z. B. die Zerstörung der Infrastruktur entlang der Küste sowie den Verlust von Jagdgründen, Wohnraum, und Kulturerbestätten (verändert nach Fritz et al., 2017).

Untersuchungsgebieten sowohl nach Größe als auch Tiefe klassifiziert und mit den Methanflüssen in Verbindung gebracht.

In beiden Untersuchungsgebieten waren die Methanemissionen von Wasser und Land nicht signifikant unterschiedlich. Die Anzahl an flachen Seen korrelierte nicht einheitlich mit den Methanemissionen. Im nördlichen Untersuchungsgebiet korrelierte die Anzahl nur schwach mit den Methanemissionen ($p < 0{,}2$). Im südlichen Untersuchungsgebiet gab es hingegen keine signifikanten Korrelationen ($\alpha = 0{,}5$). Die Ergebnisse deuten an, dass obwohl einzelne flache Seen starke Methanquellen sind oder Bereiche mit überdurchschnittlichen Methanemissionen aufweisen, sie nicht notwendigerweise auch auf regionaler Ebene als starke Methanquellen sichtbar sind. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn regionale Abschätzungen von Methanemissionen basierend auf einzelnen lokalen Messungen abgeleitet werden.

Horizon 2020 NUNATARYUK

NUNATARYUK ist ein Horizon 2020-Projekt, das die Auswirkungen des Auftauens von Küsten- und Unterwasser-Permafrost auf das globale Klima untersucht und gezielte und gemeinsam gestaltete Anpassungs- und Abmilderungsstrategien für die arktische Küstenpopulation entwickelt. NUNATARYUK bringt weltweit führende Spezialisten für Naturwissenschaften und Sozioökonomie zusammen.

Obwohl die arktischen und subarktischen Regionen von extremen Klima- und Landschaftsbedingungen gekennzeichnet sind, wurden sie schon vor Jahrtausenden vom Menschen besiedelt. Die Populationsdichte in den subarktischen und arktischen Regionen blieb in der prä-industriellen Zeit zirkumarktisch niedrig. Die Mehrheit der Menschen siedelte entlang der Meereskü sten und der Flussufer und im Laufe der Infrastrukturentwicklung verstärkt entlang der sich entwickelnden Infrastruktur. Heute bieten die subarktischen und arktischen Regionen einen Lebensraum für mehrere Millionen Menschen, die sich auf die unterschiedlichste Art und Weise an die Umweltbedingungen angepasst haben. Bergbau, Bohrungen, Infrastrukturausbau, die stets präsente Gefahr einer Havarie und die zunehmende Erwärmung in der Arktis bedrohen heute das empfindliche arktische Ökosystem. Die Erosion der arktischen Permafrostküsten in den Sommermonaten und der steigende Meeresspiegel haben in den zurückliegenden Jahren so stark zugenommen, dass die Küste in manchen Regionen 10 bis 25 Meter pro Jahr zurückweicht (Irrgang et al., 2018 ; Jones et al., 2008). Dadurch trüben die dabei abgetragenen Erdmassen verstärkt die arktischen Flachwasserbereiche und setzen Nähr- und Schadstoffe frei, welche auf das arktische marine Ökosystem einwirken (Abb. 3.2).

Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) rufen deshalb in der Fachzeitschrift Nature Climate Change (Fritz et al., 2017) dazu auf, die ökologischen, sowie sozio-ökonomischen Folgen arktischer Küstenerosion in den Fokus zu rücken. Um konkrete Aussagen zu den Folgen der sich verändernden arktischen Umwelt auf die dort lebenden Menschen machen zu können, braucht es einen interdisziplinären Forschungsansatz, welcher politische Entscheider und die arktische Bevölkerung von Anfang an mit einbezieht. Im EU-Forschungsprogramm Horizon 2020 wurde das Forschungsprojekt NUNATARYUK zusammen mit den arktischen Anrainerstaaten entwickelt. NUNATARYUK arbeitet mit den Stakeholdern vor Ort zusammen und wird von diesen beraten. Nur wenn Sozial- und Naturwissenschaften zusammen und in Interaktion mit den Stakeholdern zukünftige Szenarien und Risikoanalysen entwickeln, ist die Chance gegeben, eine nachhaltige Entwicklung der Nördlichen Breiten zu fördern und eine Anpassung an den Klimawandel vorzunehmen. Dies zeigen unter anderem die positiven Erfahrungen aus dem kanadischen ADAPT (Arctic Development and Adaptation to Permafrost in Transition) Projekt (Vincent et al., 2017).

Dr. Birgit Heim (AWI), Birgit.Heim@awi.de
Dr. Heidrun Matthes (AWI), Heidrun.Matthes@awi.de
Prof. Dr. Torsten Sachs (GFZ), tsachs@gfz-potsdam.de

FZJ | GEOMAR | GFZ | HMGU | KIT | UFZ

4 Landoberflächen im Klimasystem

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

Durch ihre Speicherfunktion und räumlichen Unterschiede tragen die Landflächen erheblich zur regionalen Ausprägung des Klimawandels bei. Zudem treten Klimafolgen vor allem an der Landoberfläche auf. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, welche zukünftigen Veränderungen der Wechselwirkung von Landflächen und der atmosphärischen Grenzschicht in Bezug auf Wasser-, Energie-, und Stoffflüsse zu erwarten sind. Zur Beantwortung dieser Fragen wird in Topic 4 eine kompartimentübergreifende Modellierung eingesetzt, die vorhandene Rückkopplungsmechanismen abbildet und gleichzeitig die regionale Schließung der Massen- und Energiebilanzen erfüllt.

Untersuchung zur Grundwasserneubildung im Müritz Nationalpark

Im Rahmen der hydrologischen Untersuchungen im GFZ-TERENO-Fokusgebiet Müritz-Nationalpark werden die Interaktionen zwischen Grundwasser und See, der Einfluss von Untergrundstrukturen auf die Grundwasserströme in der Region sowie die Grundwasserneubildung untersucht, insbesondere die Wechselwirkung mit der Vegetation und dem Niederschlagsangebot. Die gemessenen Daten zur Bodenfeuchte, Stammabfluss und Bestandsniederschlag wurden zur Kalibrierung und den Betrieb eines physikalisch basierten Computermodells mit dem Ziel verwendet, die Grundwasserneubildung abzuschätzen. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine möglichst genaue Implementierung der Wurzelwasseraufnahme sowie präferenzieller Flüsse in der ungesättigten Zone in das Computermodell für diese Abschätzung wichtig sind. Erstmalig wurde auch ein Datensatz zu räumlichen Mustern der Grundwasser-See-Interaktionen in ausreichender Auflösung erfasst, um systematisch Annahmen der zugrundeliegenden Prozesse und ihrer möglichen Vorhersage zu überprüfen (Tecklenburg & Blume, 2017). Am Messstandort für hydrogravimetrische Untersuchungen wurde im Oktober 2017 ein supraleitendes Gravimeter (iGrav) in einem Feldgehäuse installiert, das seitdem kontinuierliche Daten zu zeitlichen Variationen der Erdschwere liefert. Eine vorbereitende Publikation zur technischen Umsetzung und zur wissenschaftlichen Auswertung der gravimetrischen Messungen für die Bemessung von Wasserspeicheränderungen und der Ausweisung von Evapotranspirationsflüssen wurde in 2017 veröffentlicht (Güntner et al., 2017).

Kohlenstoff- und Methanemissionen aus wiedervernässten Moorgebieten

In zwei wiedervernässten Niedermooren des Observatoriums Nordostdeutsches Tiefland werden mittels Eddy-Kovarianz-Methode neben Energie- und Wärmeflüssen kontinuierlich die Emissionen von CO_2 und Methan gemessen. Demnach sind sowohl das küstennahe Hütelmoor als auch der Polder Zarnekow (Abb. 4.1a) seit ihrer Wiedervernässung 2005 bzw. 2010 kontinuierlich hohe Emittenten von Methan. Eine vergleichende geochemische und mikrobiologische Studie (Abb. 4.1b und c) zeigte eine Dominanz aus methanbildenden im Vergleich zu methanoxidierenden Organismen (Abb. 4.1d) trotz unterschiedlicher geochemischer Verhältnisse an beiden Standorten und weist damit mikrobiologische Treiber für die beobachteten Emissionen auf (Wen et al., 2018).

Modellierung von Bodenfeuchtigkeitsdaten mittels skalenkonsistenter Datenassimilation

Am FZJ lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Weiterentwicklung der Assimilation von Messdaten in das integrierte Grundwasser-Landoberflächen-Atmosphäre-Modell TerrSysMP. Das System ist jetzt in der Lage, multiskalige Bodenfeuchtigkeitsdaten (Cosmic-Ray-Sensoren, Fernerkundung) skalen-konsistent zu assimilieren. Ebenso gelingt es jetzt, Pegelstände in Flüssen und Grundwasserstände zu

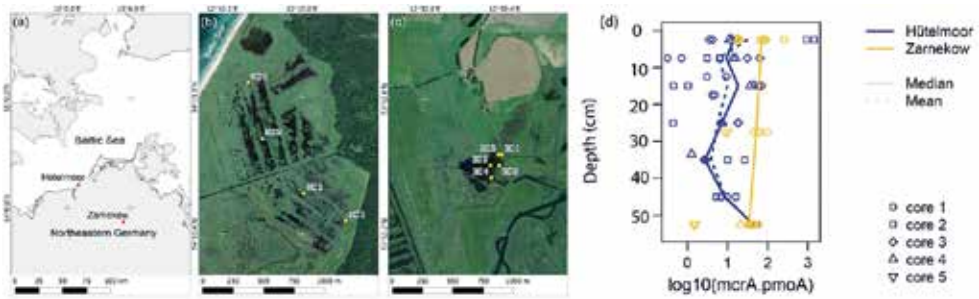


Abb. 4.1: Lage der wiedervernässten Niedermoore Hütelmoor und Zarnekow (a), der einzelnen Beprobungsstandorte (b, c) und Verhältnis der methanbildenden und methanoxidierenden Mikroorganismen bis circa 50 cm Bodentiefe an fünf Bohrkernen dargestellt anhand der funktionellen Gene mcrA (Methanbildung) und pmoA (Methanoxidation) (d). (Grafik: Wen et al., 2018)

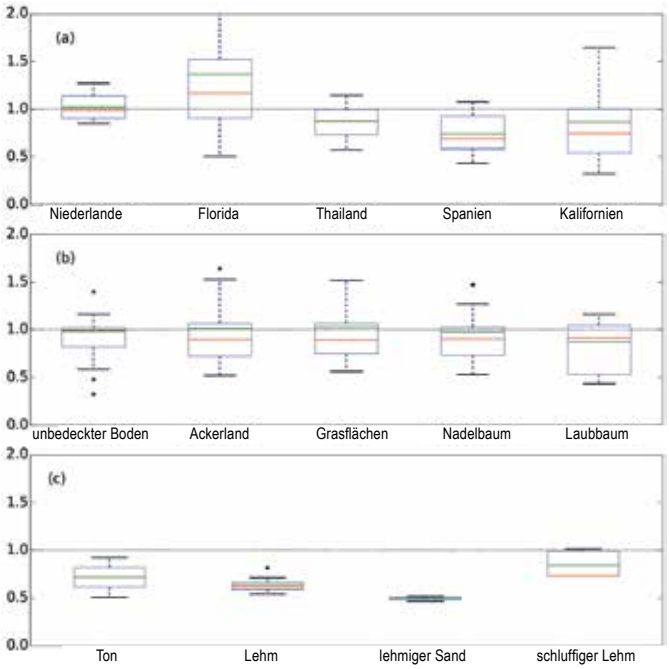


Abb. 4.2: Boxplot des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) für die Datenassimilierungsexperimente geteilt durch RMSE für Experimente ohne Assimilierung von Grundwasserständen. Werte kleiner als 1,0 deuten auf Verbesserung der Simulationsresultate. Resultate sind dargestellt als Funktion von „Klima" (a), Vegetationstyp (b) und Bodentexturtyp (c). In diesen Boxplots stellen die rote Linien den Median und die grünen Linien den Mittelwert dar. (Grafik: Harrie-Jan Hendricks Franssen, FZJ)

assimilieren. Zusätzlich wurde eine Methodik entwickelt, damit Grundwasserstände auch die Bodenfeuchtigkeit der ungesättigten Zone aktualisieren können, ohne dass dies zu numerischen Instabilitäten oder Instabilitäten in der Datenassimilierung führt. Die Assimilierung von Grundwasserständen wurde in 100 synthetischen Fällen (fünf Klimatypen x fünf Vegetationstypen x vier Bodentypen) getestet (Abb. 4.2). Die Assimilierung von Grundwasserständen verbessert die Charakterisierung der Bodenfeuchtigkeit in die Wurzelzone, falls der Grundwasserstand zwischen etwa 0,5 und 8 m tief ist. Resultate sind leicht besser für tiefwurzelnde Vegetation und Lehmböden.

Wasserverfügbarkeit für Landflächen im Klimawandel

Am UFZ wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes HOKLIM untersucht, wie der globale Temperaturanstieg zu einer Verstärkung von Bodenfeuchtedürren in Deutschland führt (Thober et al., 2018). Agrarische Dürren bezeichnen Ereignisse, bei denen weniger Wasser als im langjährigen Mittel im Boden enthalten ist. Diese Ereignisse erhöhen zumeist das Waldbrandrisiko oder reduzieren die Pflanzenproduktivität. Natürliche Ökosysteme speichern im Normalfall CO_2. In extremen Dürrejahren wie 2003 kann sich dieser Effekt umdrehen, so dass Ökosysteme zu Treibhausgasquellen werden. Darüber hinaus entstehen durch Dürren die größten Extremwetterschäden in Deutschland. Aus insgesamt 60 Klima-Hydrologie-Simulationen wurden die Veränderung zwischen Vergangenheit und den Erwärmungen von 1.5 °C, 2 °C und 3 °C gegenüber dem vorindustriellen Zustand sowie die Sicherheit der Aussagen bestimmt (Samaniego und Thober et al., 2018).

Im historischen Zeitraum 1971-2000 liegt die durchschnittliche Anzahl der Dürremonate bei ungefähr zwei Monaten pro Jahr. Bei einer globalen Erwärmung von 3 °C steigt die durchschnittliche Dürredauer bundesweit um über 50 % (Abb. 4.3). Die am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen sind Rheinland-Pfalz, das Saarland und Baden-Württemberg. Im Norden Deutschlands (z. B. Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, nördliches Niedersachsen) nimmt die Zeit unter Trockenheit bei einer Erderwärmung von 3 °C ungefähr um ein Viertel zu. Eine Eindämmung der Erderwärmung auf 2 °C bzw. 1.5 °C würde den Anstieg der Dürredauer im deutschlandweiten Mittel auf ungefähr 18 % reduzieren. Bei einer Erderwärmung von 3 °C muss für natürliche Ökosysteme und landwirtschaftliche Flächen in Süddeutschland (z. B. Rheinland-Pfalz und Saarland, Baden-Württemberg und Bayern) mit einer deutlichen Verringerung der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen von bis zu 20 mm (entspricht 20 Liter pro Quadratmeter) gerechnet werden. Diese starken negativen Änderungen treten vor allem im Herbst (September bis Oktober) auf. In den Wintermonaten (Dezember bis Februar) kommt es hingegen zu leichten Zunahmen bei der Wasserverfügbarkeit in Süddeutschland. In den anderen Bundesländern sind die Winter ebenfalls feuchter als die Sommer.

Auf die gesamte Bundesrepublik bezogen zeigt die Studie, dass die Wasserverfügbarkeit innerhalb der Vegetationsperiode abnimmt, so dass sich eine Notwendigkeit zur Anpassung in der Landwirtschaft bei einem fortschreitenden Klimawandel ergibt. Weiterführende Informationen finden sich unter www.ufz.de/hoklim.

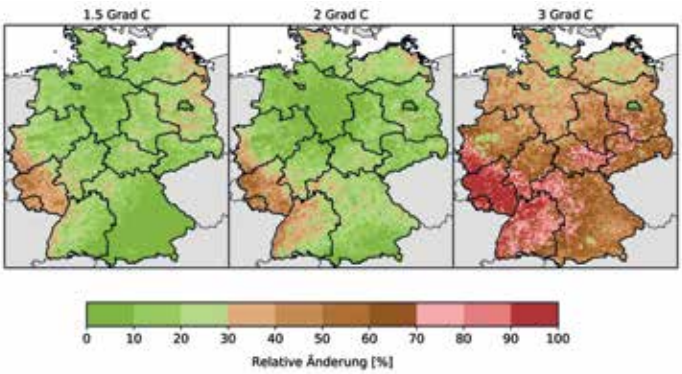


Abb. 4.3: Relative Zunahme von Dürren in Deutschland unter einer Erwärmung von 1.5 °C, 2 °C und 3 °C gegenüber 1971-2000 (Thober et al., 2018). In den meisten Klimasimulationen liegt das Jahr 2018 bereits im 30-jährigen Zeitraum, in dem 1.5 °C Erwärmung erreicht werden. (Grafik: Andreas Marx, UFZ)

AWI | DLR | FZJ | GFZ | HMGU | KIT | TUM | UK

5 Atmosphärische Zusammensetzung und Klima: Wechselwirkungen von globalen zu regionalen Skalen

Welche Faktoren bestimmen die Interaktion zwischen regionalem Klimawandel und atmosphärischer Zusammensetzung? Was sind die potentiellen Folgen von Klimawandel und Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme?

Die Stratosphäre ist eine Atmosphärenschicht, die von der Tropopause (circa 8 km (polar) bis 17 km (tropisch) Höhe) bis zur Stratopause (circa 50 km Höhe) reicht. In ihr befindet sich die das Leben schützende Ozonschicht (Abb. 5.1). Die Stratosphäre ist auf vielfältige Weise mit der uns umgebenden Troposphäre gekoppelt. Im Folgenden wird an Beispielen illustriert, wie Stratosphäre und Troposphäre verknüpft sind und im Klimasystem zusammenwirken.

Emissionen, anthropogenen oder natürlichen Ursprungs, wie beispielsweise von Vulkanen, Waldbränden etc., dringen in die Stratosphäre ein und beeinflussen ihre Zusammensetzung und die Strahlungsbilanz direkt oder aber durch Reaktionen mit anderen Substanzen, wie z. B. Ozon. Ähnliches gilt für den Wasserdampf, der in der Troposphäre in großen Mengen vorhanden ist, und der nur in kleinen Mengen in die Stratosphäre vordringen kann, dort aber im Klimawandel von großer Wichtigkeit ist. Das führt uns zur Ozonschicht: Ozon und seine Verteilung in der Stratosphäre werden von den dort vorhandenen Spurenstoffen beeinflusst. Ihre zukünftige Entwicklung ist besonders wichtig für unser Wohlergehen (Schutz vor gefährlicher UV-B-Strahlung) - und auch Ozonänderungen selbst haben wieder einen Einfluss auf unser Klima.

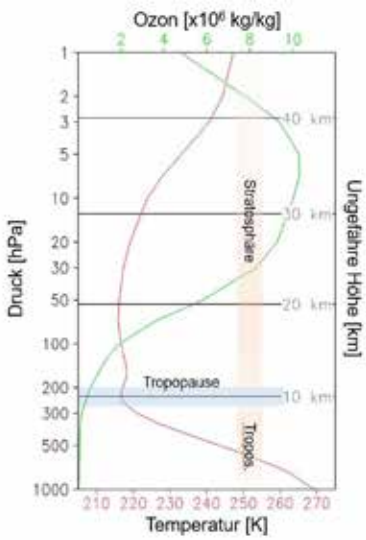


Abb. 5.1: Schema des Aufbaus der Erdatmosphäre bis circa 45 km Höhe (Datengrundlage ERA-INTERIM, Monatsmittel Januar 2017, 50° N). (Grafik: Peter Braesicke, KIT)

Emissionen und ihre „Inverse Modellierung“

Emissionen sind wichtig für die atmosphärische Zusammensetzung. Es gibt nicht nur anthropogene, sondern auch biogene Emissionen der Vegetation und Emissionen der Meeresoberflächen. Eine weitere Quelle ergibt sich aus besonderen, schwer vorhersagbaren Ereignissen wie Vulkaneruptionen, Mineralstaub aus Wüsten und Verbrennungsprodukte aus Waldbränden.

Die genaue Bestimmung von Spurenstoffhaushalten in der Atmosphäre ist jedoch schwierig. Im Allgemeinen ist man auf in-situ und Fernerkundungsdaten von Konzentrationen angewiesen, obwohl man eigentlich Emissionsstärken zur Berechnung benötigt. Die „Inverse Modellierung“ mit ihren vielfältigen Algorithmen bietet hier einen Ausweg aus dieser Problematik, sofern ausreichende Beobachtungsdaten vorliegen.

„Inverse Modellierung“ und raum-zeitliche Datenassimilation helfen, Emissionsstärken zu ermitteln. Hierzu wird die 4-dimensionale variationale (4D-var) Methode angewandt, die die Entwicklung des sogenannten adjungierten Modelles voraussetzt. Das zu Grunde liegende Modell ist das EURopean Air pollution Dispersion – Inverse Model (EURAD-IM), zusammen mit seiner adjungierten Version, das vom Helmholtz-Zentrum Jülich (IEK8) eingesetzt wird. Ein Beispiel für Fernerkundungsdatenassimilation mit 4D-var im Bereich der Tropopause liefert Abbildung 5.2. Hierbei werden abwärts gerichtete Flüsse von Ozon aus der Stratosphäre in die Troposphäre entlang eines Profils über Süd-Norwegen erfasst, die für die Luftqualität in Nordeuropa entscheidend sein können.

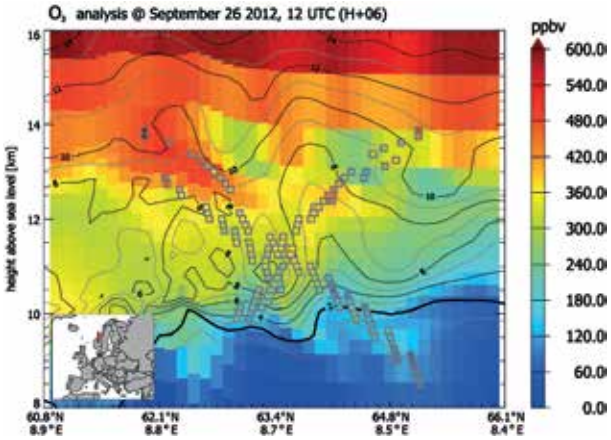


Abb. 5.2: Datenassimilationsgestützte Analyse der Ozonverteilung im Bereich einer Tropopausenfaltung am 26.09.2012 über Süd-Norwegen nach Assimilation von GLORIA-Daten (kleine Quadrate) eines Tomographiefluges mit dem Forschungsflugzeug HALO. (Quelle: Annika Vogel, 2016)

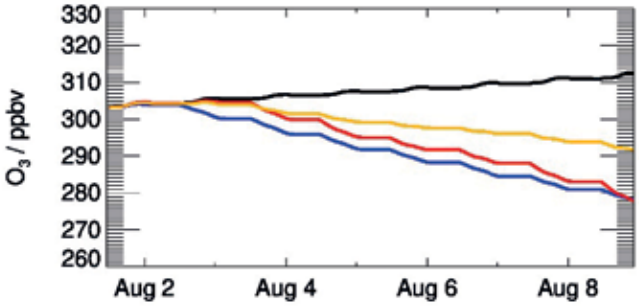


Abb. 5.3: Ergebnis von Box-Modell-Simulationen zum Einfluss der Cly-Konzentration (rot), der Sulphatmenge (gelb) sowie extrem erhöhtem Wasserdampf (blau) auf das stratosphärische Ozon in den mittleren Breiten. In schwarz ist der Referenzlauf gezeigt, welcher basierend auf Messungen mit bereits erhöhtem Wasserdampf (10.6 ppmv statt 5 ppmv) simuliert wurde. (Quelle: Sabine Robrecht, FZJ)

Einfluss von Wasserdampf auf die untere Stratosphäre

In Sturmsystemen, wie sie z. B. im Spätsommer in den USA auftreten, können erhebliche Mengen an Wasserdampf in die Stratosphäre der mittleren Breiten transportiert werden. Erhöhte Mengen an stratosphärischem Wasserdampf können in den mittleren Breiten zu einer Aktivierung normalerweise inerter, d. h. reaktionsarmer Chlorverbindungen und dadurch zum Abbau des stratosphärischen Ozons führen. Allerdings erfordert dieser Ozonabbau nicht nur erhöhte Wasserdampfkonzentrationen, sondern ist auch von weiteren Parametern, wie der Temperatur, der Menge an Sulphatpartikeln und der Gesamtkonzentration an anorganischen Chlorverbindungen (Cly), abhängig.

Um den Einfluss dieser Bedingungen auf das stratosphärische Ozon zu verdeutlichen, ist in Abbildung 5.3 das Ergebnis von 7-Tage-Boxmodell-Simulationen mit dem CLaMS (Chemical Langrangian Model of the Stratosphere) des Forschungszentrums Jülich (IEK7) gezeigt. Der dargestellte, realistische Fall basiert auf einer Messung im August 2013 mit erhöhtem stratosphärischem Wasserdampf (10.6 ppmv statt ~5 ppmv), der während der SEAC4RS-Kampagne (ER-2) über den USA mit dem Harvard Water Vapour (HWV) Instrument gemessen wurde. Unter diesen realistischen Bedingungen (schwarz) tritt im Modell eine geringe Ozonbildung auf. Im Gegensatz dazu würde eine Verdopplung der Cly-Konzentration (rot) oder ein Anstieg der Sulphatmenge (gelb) bei sonst gleichbleibenden erhöhten Wasserdampf-Konzentrationen zu einer Zerstörung des Ozons führen. Ebenso würde ein Ozonabbau bei stärker erhöhtem Wasserdampf von 20 ppmv (blau) auftreten. Wegen der starken Abhängigkeit dieses Ozonabbaus von den vorliegenden Bedingungen ist es notwendig, sowohl den Ozonabbaumechanismus als auch dessen Sensitivitäten detailliert zu analysieren. Da noch unsicher ist, wie viel Wasserdampf durch Sturmsysteme in die Stratosphäre der mittleren Breiten transportiert wird und ob der Klimawandel voraussichtlich zu erhöhten stratosphärischen Wasserdampf-Konzentrationen führen wird, wird dieses Verständnis dabei helfen, den Einfluss von Sturmsystemen und des Klimawandels auf die Ozonschicht der mittleren Breiten besser einzuschätzen.

Einfluss des Klimawandels auf die Entwicklung der Ozonschicht in den Tropen

Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht werden mit numerischen Klima-Chemie-Modellen erstellt. Im Rahmen einer international koordinierten Aktivität (CCMI) werden diese Studien im Auftrag der Weltorganisation für Meteorologie (WMO/UNEP) durchgeführt. Zum einen gilt es, den Einfluss der zurückgehenden Konzentrationen der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) auf Ozon zu quantifizieren, zum anderen die Bedeutung des Klimawandels auf die Ozonschicht zu bewerten. Die Ergebnisse dieser aktuellen Studien, an denen Mitarbeiter des DLR und des IPA beteiligt sind, werden im neuen Ozonbericht der WMO Ende 2018 ausführlich vorgestellt und diskutiert.

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass sich in den Tropen die Ozonschicht in einem zukünftigen Klima möglicherweise ausdünnen kann. Die Analysen von verschiedenen Höhenbereichen der tropischen Stratosphäre zeigen, dass sich in der unteren Stratosphäre (unterhalb von etwa 30 km) die Ozonwerte mit der Zeit aufgrund verstärkter, aufsteigender Luftmassentransporte in den Tropen reduzieren, ein unmittelbarer Effekt des Klimawandels. In der oberen Stratosphäre (oberhalb von etwa 30 km) werden leicht erhöhte Ozonwerte erwartet. Hier beeinflussen Temperaturänderungen, verursacht durch den Klimawandel, die Chemie der Ozonschicht. Insgesamt wird für das Klimaszenario RCP6.0 eine Reduzierung der tropischen Ozongesamtsäule ermittelt. Da die zukünftigen Ozonänderungen von dem jeweils angenommenen Klimaentwicklungsszenario abhängig sind, werden weitere numerische Studien benötigt, unterstützt durch eine begleitende Überwachung der Ozonschicht mittels globaler Messungen.

Chemie-Klima Wechselwirkung in polaren Breiten

Das Ozonloch auf der Südhemisphäre ist ein sichtbarer Beweis für den menschlichen Einfluss auf den atmosphärischen Teil des Klimasystems. Von Menschen produzierte FCKW sind die Ursache für rapide Ozonverluste im Frühjahr auf der Südhemisphäre, die sich im sogenannten Ozonloch manifestieren (Abb. 5.4). Dieses Ozonloch (obwohl in der Stratosphäre) hat einen Einfluss auf das bodennahe Klima. Um diesen Einfluss zuordnen zu können, benötigen wir präzise Messungen und aufwendige Modelle, an denen das KIT und das AWI arbeiten. In den Modellen kann getestet werden, wie sich das bodennahe Klima mit und ohne Ozonloch entwickelt. Daraus kann abgeleitet werden, welchen Einfluss das Ozonloch auf den Klimawandel hat. Modelstudien zeigen, dass Aspekte der inner-antarktischen Abkühlung und die Erwärmung der Antarktischen Halbinsel mit dem Ozonloch zusammenhängen können. In ähnlicher Weise kann gezeigt werden, dass die stratosphären-troposphären Kopplung auf der Nordhemisphäre besser funktioniert, wenn interaktives Ozon in Klimamodellen verwendet wird (häufig wird Ozon „nur“ als Randbedingung vorgeschrieben), insbesondere dann, wenn man den Einfluss des schwindenden Meereises auf die Zirkulation betrachtet. Daher verwenden mehr und mehr Klimamodelle interaktives stratosphärisches Ozon, um bestimmte Klimaänderungssignale besser modellieren zu können.

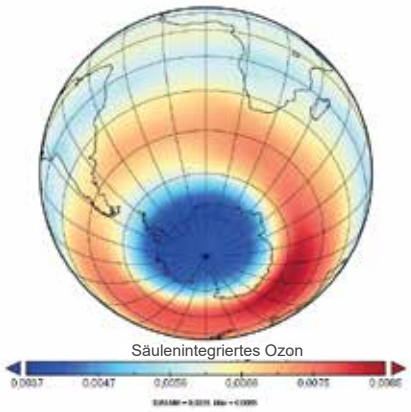


Abb. 5.4: Säulenintegriertes Ozon für den September 2016. Die niedrigen Werte (in dunkelblau) über der Antarktis sind das sogenannte Ozonloch. (Quelle: Visualisierung aus ERA-Interim Daten, Peter Braesicke, KIT)

AWI | GEOMAR | HZG | KIT | UFZ

6 Modellierung und Verständnis extremer meteorologischer Ereignisse

Wie und warum hat sich die Intensität und Häufigkeit extremer Wetterereignisse in den vergangenen Jahrzehnten verändert? Welche Änderungen sind in einem zukünftigen Klima zu erwarten?

„Wie und warum hat sich die Intensität und Häufigkeit extremer Wetterereignisse auf regionaler Skala in den vergangenen Jahrzehnten verändert? Welche Änderungen sind in einem zukünftigen Klima zu erwarten? Wie lassen sich die verschiedenen Extremereignisse möglichst realistisch abbilden und statistisch analysieren?“ Mit diesen und weiteren Fragen rund um meteorologische Extremereignisse beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von Thema 6 des REKLIM-Verbunds. Dazu kombinieren sie Ergebnisse globaler und regionaler Klimamodelle mit Daten verschiedener Beobachtungssysteme. Aus den Untersuchungen erhoffen sich die Wissenschaftler neue Erkenntnisse hinsichtlich der relevanten Austauschprozesse zwischen den verschiedenen Kompartimenten des Klimasystems sowie der räumlichen und zeitlichen Variabilität und Dynamik der Extreme. Im Fokus der Forschungsarbeiten stehen Dürren, tropische und außertropische Stürme, Starkniederschläge inklusive Hochwasser sowie schwere Gewitterereignisse eingeschlossen Hagel. Dieser Beitrag konzentriert sich auf Änderungen von Stürmen in der Arktis und auf Dürren in Europa.

Sturmänderungen über der Arktis in den letzten Jahrzehnten

In einer aktuellen Studie erforschten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und des Alfred-Wegener-Instituts Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Zusammenarbeit mit der Russischen Akademie der Wissenschaften das Auftreten und die Intensität von Stürmen über der Arktis. Die Stürme wurden in mehreren Reanalysedatensätzen (Rekonstruktionen des vergangenen Wetters mit aktuellen Modellen) detektiert und anschließend ihre räumliche und saisonale Verteilung untersucht. Diese, auf ein gleichmäßiges Gitter gebrachten und zeitlich vereinheitlichten Wetterdatensätze wurden für den Zeitraum von 1981 bis 2010 auf Häufigkeit, Größe und Intensität von Stürmen in den hohen Breiten analysiert. Die Häufigkeitsverteilungen der Ereignisse sehen in den unterschiedlichen Datensätzen sehr ähnlich aus (Abb. 6.1). Die größte Sturmaktivität liegt im Winter über dem Ozean, während im Sommer auch über Land und dem Nordpol Stürme auftreten. Schwache Stürme sind am häufigsten im Sommer zu finden (Abb. 6.1, oben), während die starken Stürme ihr Maximum im Herbst und Winter zeigen (Abb. 6.1, unten). Über die Jahrzehnte gibt es im Winter einen starken Rückgang der Anzahl der Stürme über der Barentssee und entlang der russischen Küste bei gleichzeitiger Zunahme der Sturmhäufigkeit über großen Teilen des zentralen Arktischen Ozeans (Abb. 6.2). Im Sommer (nicht dargestellt) zeigt sich eine Zunahme der Ereignisse von der Laptewsee in Richtung Grönland bis hin zum Kanadischen Archipel; über großen Teilen der Arktis dagegen eine Abnahme. Die verschiedenen Reanalysen weisen sehr ähnliche Trendmuster aus, allerdings gibt es in einzelnen Regionen größere Unterschiede in der Stärke der Änderungen.

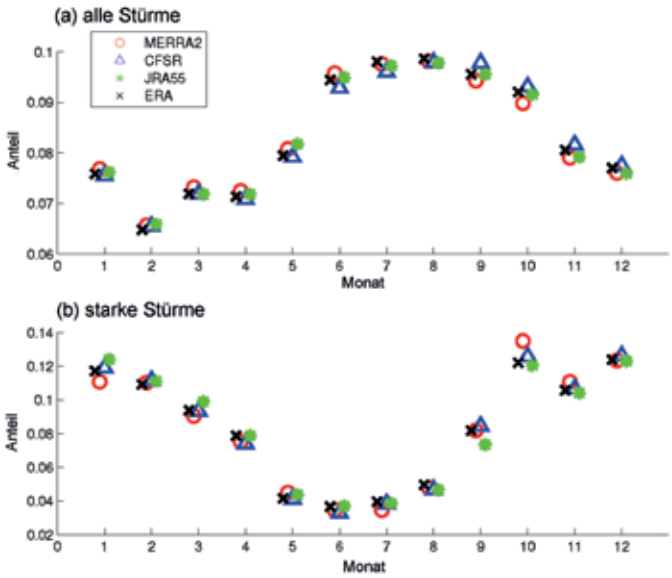


Abb. 6.1: Jährliche Sturmhäufigkeit (Anteil) für (a, oben) alle und (b, unten) starke Stürme auf der Basis von vier verschiedenen Reanalysdatensätzen (ERA-Interim, MERRA2, CFSR, JRA55). (Grafik: Zahn et al., 2018)

Klimawandel führt zu beispiellosen Dürren in Europa

„Die globale Klimaerwärmung wird das Problem der Dürren in Europa verschärfen – Dürren werden länger dauern, mehr Flächen beanspruchen und damit mehr Menschen betreffen.“ Das schreibt ein von Wissenschaftlern des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) koordiniertes internationales Autorenteam in Nature Climate Change, einem hochrangigen und viel gelesenen wissenschaftlichem Fachjournal. Die Wissenschaftler haben erstmals beschrieben, wie sich ein globaler Temperaturanstieg von 1 bis 3 °C europaweit auf die Verteilung von

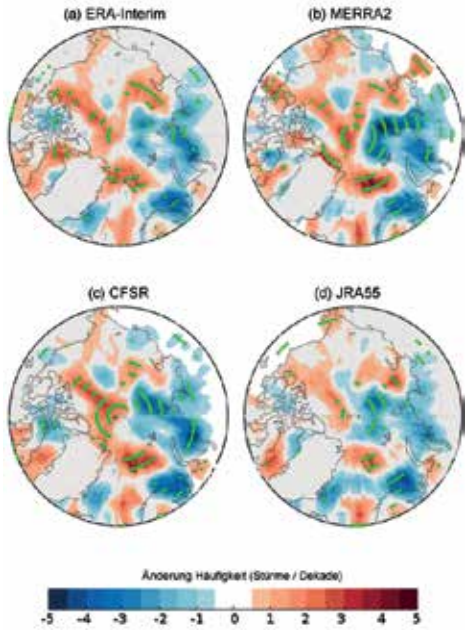


Abb. 6.2: 30-Jahrestrends (1981-2010) der Sturmhäufigkeit im Winter in jeder Gitterbox nach vier verschiedenen Reanalysedatensätzen (ERA-Interim, MERRA2, CFSR, JRA55). Die grünen Markierungen zeigen statistisch signifikante Regionen (90 % Niveau). (Grafik: Zahn et al., 2018)

Bodendürren auswirken kann (Samaniego et al., 2018). Nimmt die Temperatur um 3°C zu, dehnen sich die Dürregebiete auf 26 % der Fläche im Vergleich zu 13 % im Referenzzeitraum 1971-2000 aus (Abb. 6.3). Negative Folgen sind vor allem für die Region rund um das Mittelmeer zu erwarten, wo sich Dürregebiete gar auf 49 % der Fläche ausbreiten könnten. Die Anzahl der Dürremonate pro Jahr steigt in diesem Gebiet auch auf durchschnittlich 5,6 Monate, in Teilen der Iberischen Halbinsel sogar auf mehr als 7 Monate. Einhergehend nimmt der Wassergehalt im Boden bis zu einer Tiefe von zwei Metern in diesen Regionen während einer Dürre um 35 Millimeter ab. Mit anderen Worten, auf einem Quadratkilometer stehen 35 000 km³ weniger Wasser zur Verfügung. Das entspricht in etwa dem Wasserdefizit, das während der Dürreperiode im Sommer 2003 in weiten Teilen Europas geherrscht hat. Dürreereignisse dieser Intensität könnten bei einer Erderwärmung von 3°C künftig doppelt so häufig eintreten und in weiten Teilen Europas zum Normalzustand gehören.

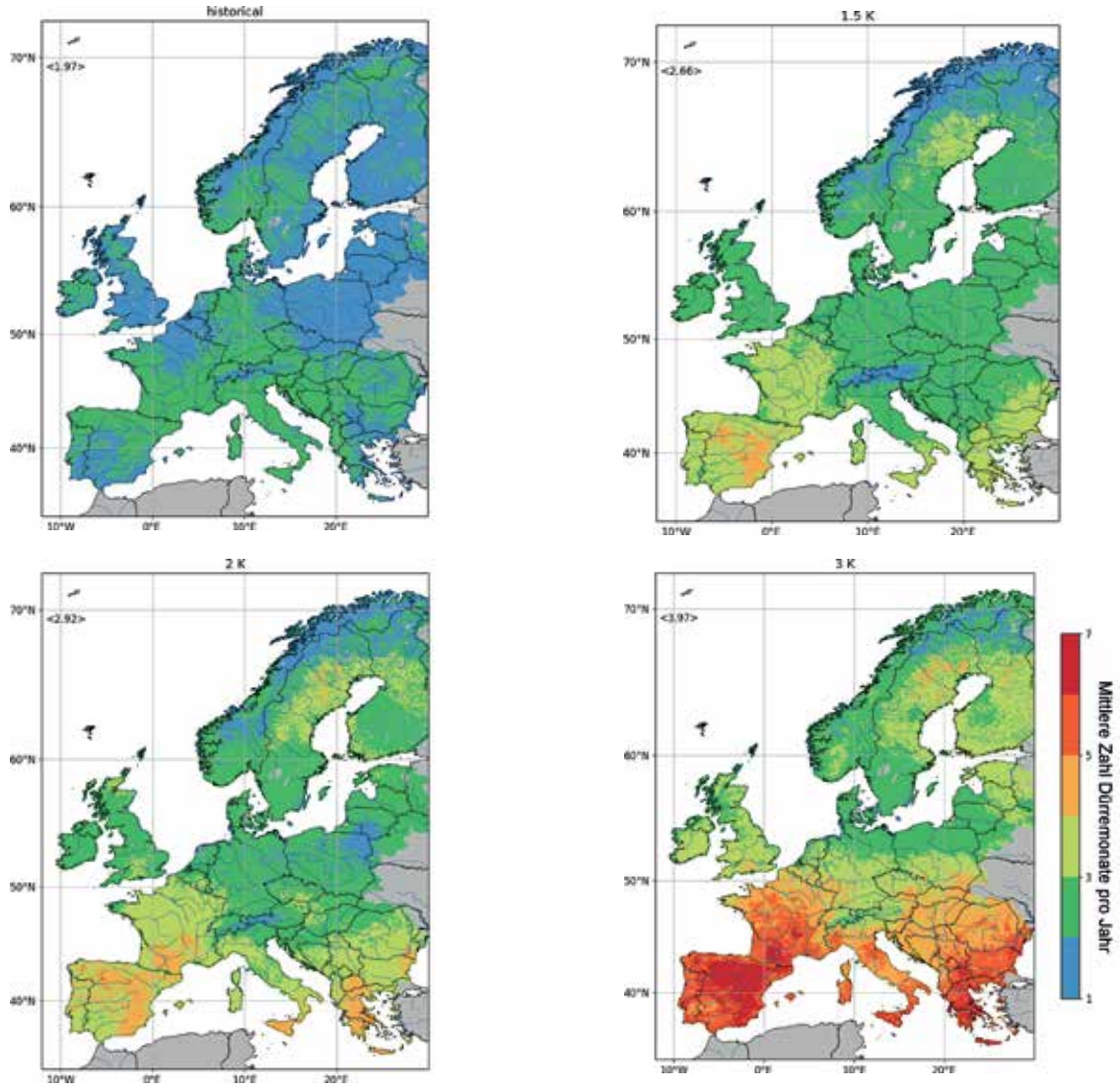


Abb. 6.3: Räumliche Verteilung der durchschnittlichen Dürremonate pro Jahr für den historischen Referenzzeitraum 1971 - 2000 (oben links) und bei Erderwärmungen von 1.5°C (oben rechts), 2°C (unten links) und 3°C (unten rechts). In den Karten ist der Multimodell-Median eines Ensembles bestehend aus 60 Simulationen dargestellt. Alle Ergebnisse wurden unter der Annahme berechnet, dass keine Anpassung an den Klimawandel erfolgt. (Grafik: Stefan Thober, UFZ)

HZG | KIT | UFZ | EUV | UHH | UKA

7 Risikoanalyse und Risikomanagement für integrierte Klimastrategien

Welche Klimarisiken und Klimavariabilität haben einen spezifisch regionalen Fokus und wie sind sie zu bewerten? Wie kann Klimakommunikation – auch mit unterschiedlichen sozialen und kulturellen Gruppen – verbessert werden? Wie lassen sich Klimaanpassungs- und Klimaschutzstrategien verbinden und dabei gleichzeitig die Lücke zwischen internationalen und regionalen Klimaaushandlungsprozessen schließen?

Narrative als ein strategisches Instrument zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Klimaanpassung und Katastrophenschutz

Klimaanpassung und Katastrophenschutz haben einen wichtigen Überschneidungspunkt – ohne Berücksichtigung der langfristigen Folgen des Klimawandels kann es keine wirksame Katastrophenvorsorge geben. Diese Notwendigkeit zur Zusammenarbeit hat bisher leider relativ wenig Eingang in die Politik und eine gemeinsame Praxis gefunden.

Beide Arbeitsgebiete streben die Verringerung der negativen Auswirkungen von Klimawandel und Naturkatastrophen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft mit Hilfe von Risikoanalysen an (Mitchell et al., 2010). Die Ziele der Risikominderung und -pfade dorthin werden jedoch durch unterschiedliche Gesetzgebungen auf verschiedenen Ebenen bestimmt (international z. B. das Sendai Framework vs. dem Paris Agreement). Die Umsetzung wird durch unterschiedliche Ministerien und Behörden national und lokal gesteuert. Ausgangspunkt für das gemeinsame Projekt ist, dass diese Akteursgruppen dasselbe Problem aus verschiedenen zeitlichen (langfristige Anpassung vs. unmittelbare Katastrophenhilfe) und räumlichen (globale Entwicklungen und Modelle vs. lokal/regionale Katastrophenanfälligkeit und Risikobewertungen) Perspektiven betrachten. Folglich werden Klimaanpassung und Katastrophenschutz durch andere Normen und Wertsysteme geprägt (aufbauend auf Birkmann & von Teichman, 2012).

Abb. 7.1: Gemeinsame Begrifflichkeit und geteilte Narrative sind die Schlüssel für den sozialen Prozess der Überwindung von Silodenken. (Grafik: PLCARD Strategic Narrative Cookbook)

Solche Unterschiede können nicht allein durch Informationsaustausch und zusätzliche finanzielle Mittel gelöst werden – die grundlegende Kommunikation scheitert vielmehr an einer unterschiedlichen Sprache und unterschiedlichen Geschichten („Narrativen") – ein gemeinsames Zielverständnis fehlt. Sozialwissenschaftliche und psychologische Studien zeigen jedoch, dass entsprechend konstruierte Narrative die Weltanschauung deutlich beeinflussen und das gewünschte Kooperationsverhalten steuern können. Die Konstruktion solcher Narrative ist jedoch keine triviale Aufgabe. Ein erfolgreiches Narrativ muss vor allem im Kontext der genau bestimmten Zielgruppen fest verankert sein. Das gelingt nur unter Berücksichtigung der bestehenden Normen und Werte der Zielgruppen, früherer Erfahrungen, sowie vieler persönlicher Faktoren, wie die Herkunft oder Ausbildung etc. Entscheidend für den strategischen Erfolg eines Narrativs ist auch die Glaubwürdigkeit des Erzählers („Narrators").

Im Rahmen des am UFZ durchgeführten EU-Projekts PLACARD (@Placard_EU) werden zurzeit verschiedene Forschungsfragen untersucht, wie z. B. begriffliche Unklarheiten, Strategien und Instrumente zur Konstruktion eines verbindenden Narrativs zur Verbesserung der Risikowahrnehmung und Katastrophenvorsorgemaßnahmen. Die Untersuchung des Potentials von Narrativen zur Gestaltung einer gemeinsamen „Kultur" für Klimaanpassung und Katastrophenvorsorge wird in REKLIM gemeinsam mit dem HZG und dem KIT an ausgewählten Beispielen (Hochwasser, Hitze, Dürre, Waldbrände, Stürme und Sturmfluten) untersucht. Die ersten empirischen Untersuchungen in den deutschen Küstengebieten haben verdeutlicht, dass die Gestaltung einer effektiven Kommunikation zwischen den lokalen Behörden und Bevölkerung von großen Bedeutung nicht nur für die Steigerung des gegenseitigen Vertrauens und der Risikowahrnehmung sind, sondern auch ein wichtiger Faktor für die Entwicklung eines gemeinsames Schutzverhaltens gegenüber Naturgefahren ist (Gonzalez-Riancho et al., 2017).

Klimavorverhandlungen in Bonn 2018: Die Schwächen des Paris-Abkommens werden offenbar

Für den Weltklimavertrag ist 2018 das Jahr der Entscheidungen. Die Versprechen von Paris müssen nun mit einem konkreten Regelwerk unterlegt werden. Professor Reimund Schwarze vom UFZ hat die Verhandlungen vor Ort in Bonn begleitet.

2018 ist das Jahr der Entscheidungen, erklärte UN-Klimachefin Patricia Espinosa zu Beginn der Frühjahrs-Klimakonferenz, der Vorverhandlungsrunde SB48 in Bonn. Denn in diesem Jahr müssen die Anstrengungen zum Erreichen der Ziele des Übereinkommens von Paris durch ein konkretes Regelwerk hinterlegt werden, damit es nicht leere Versprechungen bleiben. Auf dem Klimagipfel im Dezember 2018 (COP 24) im polnischen Katowice soll dies geschehen. Konkrete Beschlüsse zum „Paris Rulebook" reichen aber nicht. Auch die Beiträge und Anstrengungen der Staaten müssen bis dahin erhöht werden. Denn: Alle bisherigen Anstrengungen reichen weder aus, um das Zwei-Grad-Ziel von Paris einzuhalten, noch den weltweiten Temperaturanstieg auf 1,5 Grad zu begrenzen.

In diesem Entscheidungsjahr muss der sogenannte Ermöglichungsdialog („facilitative dialogue") des Paris-Abkommens Fahrt aufnehmen. „Vertrauen und Respekt" (Talanoa) heißen die Zauberworte, mit denen die fidschianische Präsidentschaft diesen Ermöglichungsdialog voranbringen wollte. „Das, um es vorweg zu nehmen, ist ihr gelungen: Vertrauen und gegenseitige Achtung herrschten in Bonn, wie in meiner Erinnerung auf keiner Konferenz zuvor. Nur vorangekommen ist man damit kaum", erläutert Schwarze.

„Der von manchen Beobachtern erhoffte ganzheitliche Entwurf eines Regelwerks für den Paris-Vertrag liegt nicht vor – und wird es auch nicht vor dem Gipfel in Katowice", so Schwarze. „Die Konturen sind nicht einmal erkennbar", ergänzt er. Ungelöste Probleme gibt es viele: Bei den einheitlichen Berichtssystemen der UN, bei der Verzahnung mit anderen politischen Prozessen wie der internationalen Luft- und Schifffahrt, bei den Marktmechanismen des Paris-Abkommens. In den Umsetzungsverhandlungen erweisen sich wichtige Festlegungen des Paris-Abkommens als nicht praktikabel. Ein Beispiel hierfür ist Artikel 6.2, der leider keinen fortgesetzten Emissionshandel des Kyoto-Protokolls darstellt. Weiterhin kann, ohne zusätzliche Absicherungsmaßnahmen gegen Missbrauch, auch Artikel 6.4 nichts außer Schlupflöchern für die Umgehung von Klimaschutz erzeugen. Hier muss Neues her, nicht nur Bestehendes umgesetzt werden. Das wurde in Bonn jedenfalls deutlich. „Vertrauen und Respekt" sind hierfür bestenfalls die Voraussetzung, nicht die Antwort.

Hinzu kommt, dass die Präsidentschaft der UN-Klimaverhandlungen im Dezember von Fidschi auf Polen übergeht. Wäre es nach dem früheren polnischen Umweltminister und ursprünglich vorgesehenen Konferenzpräsidenten Jan Szyszko gegangen, würde es wohl auf dem Klimagipfel in Katowice in erster Linie um den Erhalt der sauberen Kohle („clean coal") und die Bindung von Kohlendioxid in Wäldern gehen. Der als „Urwald-Abholzer von Białowieża" zwischenzeitlich in Verruf geratene Szyszko wurde aus dem polnischen Kabinett entlassen und als COP-24-Präsident abberufen. Konferenzpräsident in Katowice soll jetzt Michał Kurtyka werden, ein weitgehend unbekannter Vizeminister des Energieministeriums.

Abb. 7.2: Das Thema „Verlust und Schäden" auf dem sog. Suva-Dialogue bei Klimavorverhandlungen in Bonn 2018 an der Reimund Schwarze (UFZ) als Experte bei den Anhörungen beteiligt war. Sein Resümee: „Wenig Bewegung in der Sache". (Foto: Reimund Schwarze, UFZ)

„Dennoch werden sich die Gewichte des Ermöglichungsdialogs für das Paris-Abkommen deutlich in Richtung handfester ‚Energiepolitik' verschieben. Der angestoßene Talanoa-Prozess von Bonn wird damit schnell ins politische Fahrwasser kommen. Das muss er aber auch, denn eine erneute Vertagung bei den konkreten Vorschlägen zum ‚Regelwerk von Paris' auf Dezember würde in eine unerträgliche Kluft zwischen Handlungszwängen und Handlungsmöglichkeiten im Rahmen des Paris-Abkommens führen, die beim Gipfel in Katowice schwer zu überwinden wäre.", so Schwarze über den anstehenden Klimagipfel.

Neues UFZ-Projekt CLIMALERT: Informationsangebot für Entscheidungsprozesse in der Landwirtschaft

Im Projekt CLIMALERT (Laufzeit: 2017-2020) arbeiten Forschungsgruppen vom Leipziger Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) zusammen mit europäischen Partnern in Portugal und Spanien mit dem Ziel, ein verbessertes Informationsangebot für die kurz- und mittelfristige Bodenfeuchtevorhersagen sowie für die Frühwarnung von Extremereignissen (z. B. Dürren) für die Landwirtschaft zu entwickeln. Dazu werden bereits existierende Informationssysteme der Wetterdienste sowie aktuelle Vorhersagetechniken, z. B. der „Dürremonitor Deutschland", so aufgearbeitet, dass sie in der betrieblichen Praxis besser angewendet werden können. Es wird unter anderem ein Frühwarnsystem mit einer Webapplikation (App) gemeinsam mit Landwirten und Verbandsvertretern der Landwirtschaft sowie dem DWD entwickelt. Das Forschungsteam am UFZ, bestehend aus Hydrologen, Ökonomen und Sozialwissenschaftlern, arbeitet daran, agrarmeteorologische und Klima-Daten so aufzuarbeiten, dass kurz-, mittel- und langfristige Vorhersagesysteme praxistauglich und nutzerfreundlich auf die Bedürfnisse der Nutzer in der Landwirtschaft ausgerichtet sind. Das geplante Frühwarnsystem wirkt bei Entscheidungsprozessen hinsichtlich der Produktion, der Nutzung von natürlichen Ressourcen und der Entwicklung von kurz- bis längerfristigen Bewältigungs- und Anpassungsstrategien in Bezug auf klimatische Veränderungen mit.

IM FOKUS 8

AWI | GEOMAR | GFZ | HZG | UHB | UHD | UHH | UP

Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten

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

Mit andauernder globaler Erwärmung wird die Wahrscheinlichkeit starker und plötzlicher regionaler Klimawechsel immer größer. Allerdings fehlen uns Erfahrungswerte darüber, wie schnell solche Klimawechsel ablaufen, welches Ausmaß und welche Auswirkungen sie haben können. An dieser Stelle kommt die Paläoklimaforschung ins Spiel, weil es eine Reihe abrupter Klimawechsel während der Erwärmungsphase am Ende der letzten Eiszeit gegeben hat, die mit Hilfe von hochauflösenden natürlichen geologischen Klimaarchiven analysiert werden können. In der Regel sind das geologische Archive, wie Eiskerne und Sedimentkerne aus Seen und dem Ozean, in denen Informationen über den Ablauf und die Folgen zurückliegender Klimaerwärmungen abgespeichert sind. Hochaufgelöste Daten sind unverzichtbar für das Verständnis der Feinheiten rascher Klimawechsel, einschließlich der Schwellenwerte, Rückkopplungen und auch der regionalen Ausprägungen. Im Folgenden präsentieren wir neue Ergebnisse aus Baumringen und Sedimentkernen.

Schnelle Klimaänderungen in Baumringen

Ein wichtiges biologisches Klimaarchiv sind Baumringe, die ähnlich wie jahreszeitlich geschichtete Seeablagerungen (Warven) präzise jahrgenau datiert werden können. Ein besonderes Merkmal von jahresgeschichteten Seesedimenten und Baumringen ist die Möglichkeit der Erfassung von Veränderung der Jahreszeiten, selbst wenn diese vor tausenden von Jahren

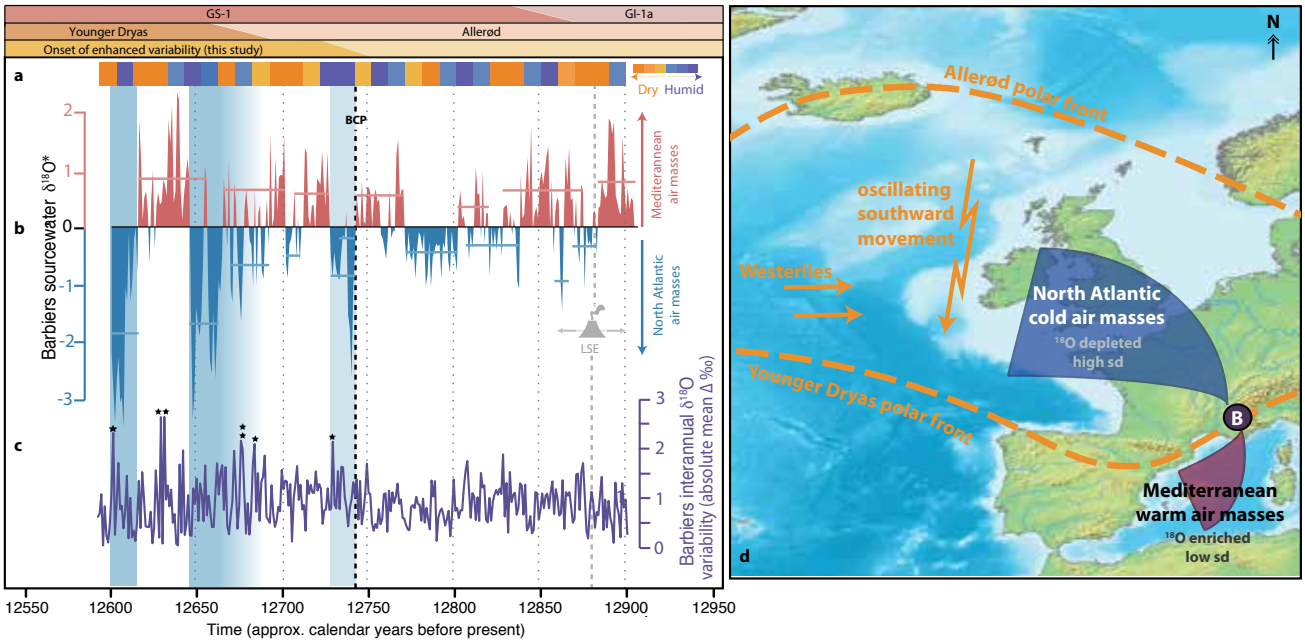
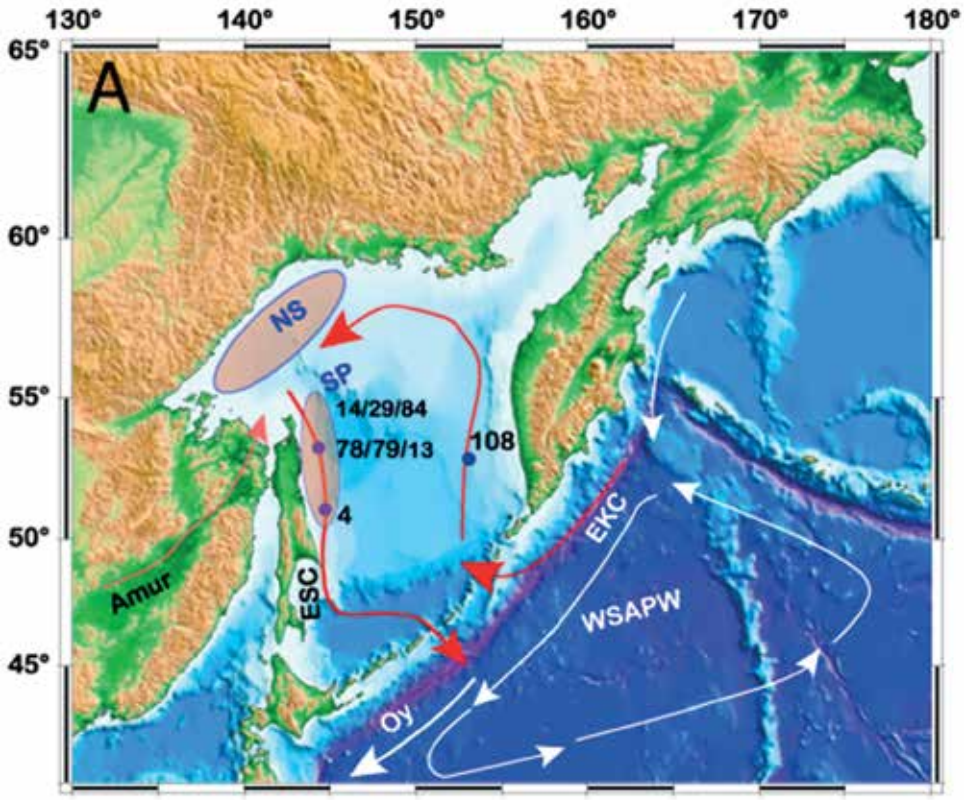


Abb. 8.1: Klimarekonstruktionen der Kiefern aus Barbiers: (a) Duales Isotopenmodell trockener und feuchter Phasen (10-Jahres-Mittelwerte), hergeleitet aus stabilen Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenverhältnissen; (b) modellierte Sauerstoff-Isotope des Bodenwassers von Barbiers ($\delta^{18}O$ in ‰ VSMOW); (c) daraus errechnete interannuelle Variabilität (mittlere durchschnittliche Veränderung, Sterne zeigen Extremwerte > 2 ‰); (d) Karte mit der Position von Barbiers (B) in Verbindung mit der vermuteten Polarfrontveränderung (vom Allerød zur Jüngeren Dryas) und den Änderungen der für Barbiers dominanten Luftmassen (Nordatlantik vs. Mittelmeer). (Quelle: Pauly et al., 2018)



Tab. 8.2: Untersuchungsregion mit großräumigen Strömungsmustern und Kernlokationen (blaue Punkte) im Ochotskischen Meer. Rosafarbene Bereiche kennzeichnen Regionen der Zwischenwasserbildung; ESC, East Sakhalin Current; NS, Northern Shelf Polynia; Oy, Oyashio Current; SP, Sakhalin Polynia. (Quelle: Lembke-Jene et al., 2018)

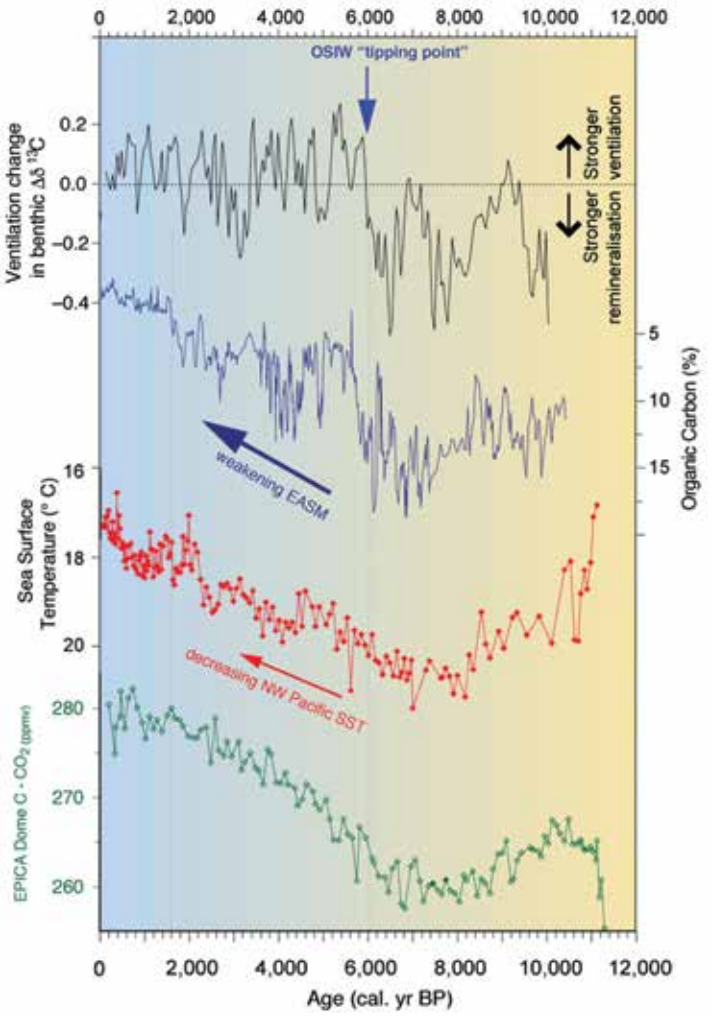
stattgefunden haben. Allerdings reichen Baumringzeitreihen aufgrund der beschränkten Lebenszeit von Bäumen meist nur wenige hundert und nur in seltenen Fällen tausende von Jahren zurück, so dass eine Analyse der schnellen Klimaänderungen am Ende der letzten Eiszeit mit Baumringen bisher nicht möglich war.

Der Fund von fossilen Hölzern im Süden Frankreichs hat es uns erstmals ermöglicht, den aus grönländischen Eiskernen und mitteleuropäischen Seesedimenten bekannten plötzlichen Kälteeinbruch der Jüngeren Dryas auch in Baumringen zu untersuchen. Die Jüngere Dryas war der letzte große Kälteeinbruch der Eiszeit vor etwa 12 700 Jahren, der zu einer etwa 1100 Jahre langen Kaltzeit geführt hat. Dieser Kälteeinbruch hat sich während der Erwärmung des Klimas am Ende der letzten Eiszeit ereignet. Deshalb wird angenommen, dass das Abschmelzen der Eiszeitgletscher zu einer Störung der nordatlantischen Meeresströmung und einer Ausdehnung des Meereises vor allem im Winter geführt hat, was diesen Kälterückschlag ausgelöst hat. Heute befinden wir uns wieder in einer Phase rasch schmelzender Gletscher, so dass Störungen der Ozeanzirkulation ein mögliches Zukunftsszenario darstellen.

Der kleine Bestand fossiler Kiefern, der in Südfrankreich entlang der Flussufer von Barbiers in den Ausläufern der französischen Alpen entdeckt wurde, ermöglicht es erstmals, den Kälteeinbruch der Jüngeren Dryas auch im Mittelmeer mit großer zeitlicher Präzision zu untersuchen. Anhand von ^{14}C-Datierungen können wir nachweisen, dass diese Bäume in der wärmeren Zeit (dem sogenannten Allerød) vor der Jüngeren Dryas aufgewachsen sind und einige der Bäume auch den plötzlichen Kälteeinbruch überlebt haben und damit Zeugen dieses Klimawechsels waren.

In unserer Arbeit haben wir nicht nur die klassische Form der Baumringdickenmessungen genutzt, sondern eine neue Methode zur paläoklimatischen Analyse angewendet. Dabei haben wir für mehrere 300-jährige Baumringchronologien, die eine Zeitspanne von ungefähr 12 900 - 12 600 Jahren vor heute abdecken, jahrgenaue Messungen von stabilen Kohlen- und Sauerstoffisotopen (δ^{13}C; δ^{18}O) durchgeführt. Mit diesen Daten konnte das lokale Bodenwasser (Niederschlag) und die relative Feuchtigkeit rekonstruiert werden, was uns völlig neue Einblicke in die hydrologische Variabilität dieser Zeit ermöglichte.

Das Untersuchungsgebiet liegt in einer Übergangsklimazone, wo kalter, δ^{18}O-armer Niederschlag vom Nordatlantik auf warmen, δ^{18}O-angereicherten Niederschlag vom Mittelmeer (Abb. 8.1d) trifft, der größtenteils in der Winterzeit fällt. Die rekonstruierten Bodenwassersignaturen (Abb. 8.1b) zeigen etwa vor 12 740 Jahren beginnend eine deutliche Veränderung der Quelle der Niederschläge. Zu sehen ist diese Veränderung in einer zunehmenden Variabilität der Sauerstoffisotope des Bodenwassers (Abb. 8.1c). Es treten vermehrt dekadische und sub-dekadische Phasen mit zunehmend negativeren Isotopenwerten auf (blau markiert in Abb. 8.1b). Das zeigt eine Verschiebung der Windsysteme mit einem zunehmend größeren Anteil von kalten Luftmassen, die aus dem Atlantikraum kommen, während warme Luftmassen aus dem Mittelmeerraum seltener werden. Besonders markant ist auch die Zunahme extremer polarer Luftvorstöße, Winterniederschläge und Winterstürme zu Beginn der Jüngeren Dryas. Unsere



Tab. 8.3: Rekonstruktion der Zwischenwasserdurchlüftung im Vergleich zu Änderungen in den grönländischen Lufttemperaturen, nordpazifischen Wasseroberflächentemperaturen, atmosphärischen CO_2 Gehalten und dem Ostasiatischen Monsun. (Quelle: Lembke-Jene et al., 2018)

Ergebnisse beweisen, dass die Polarfront beim Beginn der Jüngeren Dryas sich nicht gleichmäßig nach Süden verlagerte, sondern eher sprunghaft. Eine weitere Erkenntnis unserer Studie ist, dass es nicht Absenkungen der Mitteltemperatur waren, die einen Stress für die Umwelt und besonders die Vegetation bedeuteten, sondern die Häufung von kurzfristigen extrem kalten Wintern. Grundsätzlich zeigt diese Studie, dass sich fossile Baumringe ausgezeichnet auch für die Analyse schneller Klimawechsel eignen.

Schnelle Veränderungen im O_2-Gehalt des Nordpazifiks

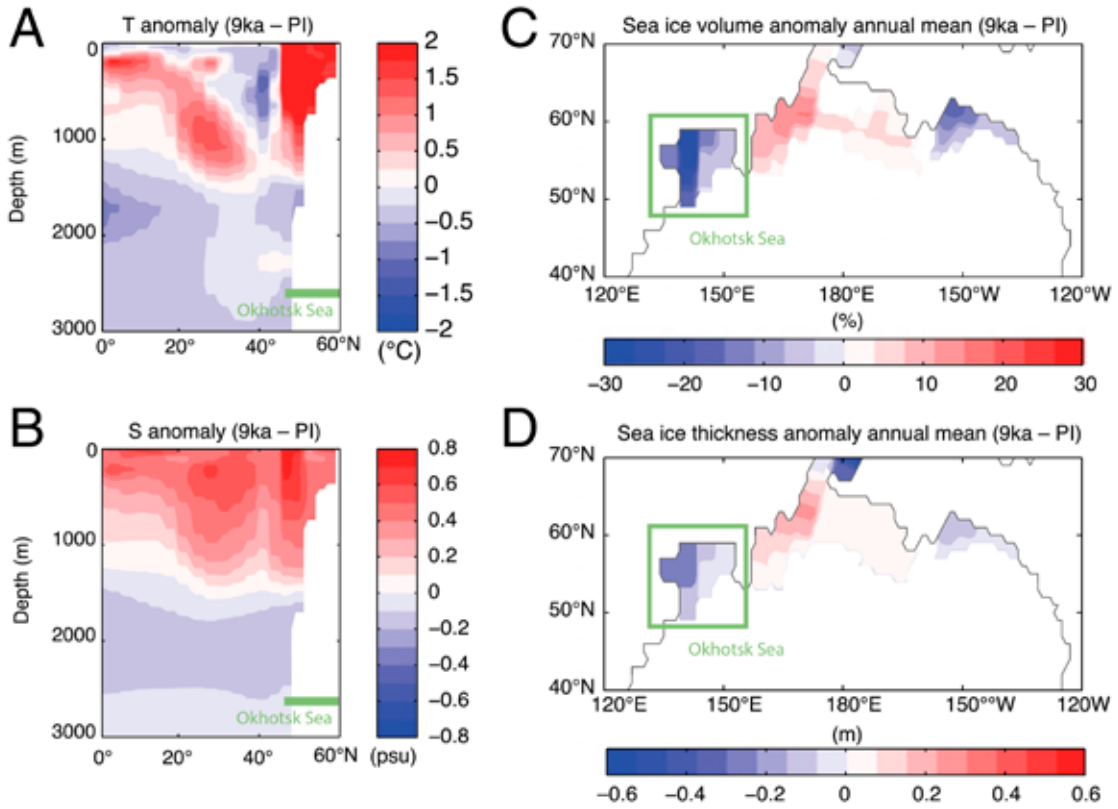
Der Pazifik beherbergt die größten Sauerstoffminimumzonen im Weltozean, von denen man annimmt, dass sie sich unter dem zukünftigen Klimawandel intensivieren und ausweiten, mit erheblichen Konsequenzen für Meeresökosysteme, biogeochemische Kreisläufe und Fischerei. Derzeit kommt es im Nordpazifik zu keiner tiefgreifenden Durchlüftung aufgrund einer ganzjährig stabilen Schichtung in der Deckschicht. Salzarmes Oberflächenwasser verhindert dort die Bildung von Tiefenwasser und damit auch den Transport von Sauerstoff in die Tiefe. Allerdings findet heute eine Durchlüftung des Zwischenwasserstockwerks statt. Grund dafür ist die Bildung von sauerstoffreichem Zwischenwasser im Ochotskischen Meer, ein Randmeer, das mit dem Nordwestpazifik über tiefe Schwellen verbunden ist (Abb. 8.2). Diese Passagen bilden ein wichtiges Zuluftventil für den Nordpazifik. Während der Wintermonate bildet sich im Zuge der Meereisbildung salzreiches und sauerstoffreiches Oberflächenwasser auf den nördlichen Schelfflächen des Ochotskischen Meeres. Die relativ schweren und frischen Wassermassen sinken ab und fließen in den Nordpazifik, wo sie das Zwischenwasserstockwerk mit Sauerstoff versorgen. Das Ochotskische Meer friert im Winter bis zur Nordspitze Japans (Hokkaido) zu, was der geographischen Breitenlage von Nizza entspricht. Es ist damit die südlichste Region auf der Nordhalbkugel, in der sich Meereis bildet und reagiert daher auch besonders empfindlich auf Klimaänderungen.

Neuere Studien weisen auf eine Abnahme der O_2-Gehalte und steigende Temperaturen im Zwischenwasserbereich des Nordpazifiks in den letzten Jahrzehnten hin. Die Ursache dieser Veränderungen lässt sich jedoch weder eindeutig anthropogenen Einflüssen oder langfristigen natürlichen Schwankungen zuordnen. Die langfristigen Schwankungen im Durchlüftungsgrad sind möglicherweise groß und verdecken anthropogene Einflüsse auf die natürlichen Hintergrundverschiebungen auf Zeitskalen von Jahrtausenden. Die Erfassung der langfristigen Schwankungen ist schwierig, da sie außerhalb der Reichweite von instrumentellen Datensätzen liegen und daher aus geologischen Archiven wie Sedimentkernen zu rekonstruieren sind.

Unsere Daten aus dem Ochotskischen Meer zeigen, dass die heutige Ausbreitung und Intensität der Durchlüftung eine relativ junge Erscheinung ist, mit wenig bis keiner Ventilation vor 6000 Jahren. Unsere Rekonstruktionen basieren auf $\delta^{18}C$ Werten benthischer Foraminiferen (am Meeresboden lebende, einzellige Kalkschaler), die als Anzeiger für Änderungen in den Nährstoffkonzentrationen den Durchlüftungsgrad von Wassermassen reflektieren (Abb. 8.3). Die Entwicklung über den Zeitraum der letzten 10 000 Jahre impliziert einen Kipppunkt vor etwa 6000 Jahren mit einem raschen, generellen Wechsel in der Zwischenwasserdurchlüftung. Das frühe Holozän kennzeichnet eine Phase mit hohem Nährstoffbestand aus der Oxydation von organischem Material (Remineralisierung), während nach 6000 Jahren ein viel höheres Niveau mit verbesserter Zwischenwasserdurchlüftung erreicht wird. Zyklische Schwankungen von 1500 bis 1800 Jahren überlagern diese langfristige Veränderung in der Basislinien-Ventilationsanpassung, was auf einen Anfachungsmechanismus hindeutet, der im Zusammenhang mit Veränderungen der globalen thermohalinen Zirkulation steht.

Komplementäre Paläoklimamodell-Ergebnisse weisen ebenfalls für das frühe mittlere Holozän auf ein wärmeres, salzigeres Nordpazifisches Zwischenwasser hin, das sich von seinen heutigen Bedingungen unterscheidet (Abb. 8.4). Während dieser Zeit wechselte das Ochotskische Meer von einer Sauerstoffquelle zu einer -senke durch eine Kombination aus Meereisverlust, höheren Wassertemperaturen und Remineralisierungsraten, die eine gute Durchlüftung verhinderten. Wir schätzen die Abnahme im Durchlüftungsgrad des Nordpazifischen Zwischenwassers auf 30 – 50 %, was annähernd zu hypoxischen Bedingungen in der modernen Quellregion der nordpazifischen Durchlüftung führte. Gleichzeitig erhöhten sich die mittlere Nährstoffkonzentration und Kohlenstoffspeicherung im Zwischenwasserbereich.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass ozeanische biogeochemische Rückkopplungsmechanismen unter früheren oder zukünftigen wärmeren Bedingungen die Richtung ändern oder sogar umkehren können. Eine zukünftige Abnahme der O_2-Gehalte im Zwischenwasserbereich des Nordpazifiks ist wahrscheinlich, da davon auszugehen ist, dass die zukünftigen globalen Wasseroberflächentemperaturen den frühholozänen Temperaturen ähneln oder diese sogar deutlich übertreffen werden. Sollte sich im Zuge der Klimaerwärmung auch weniger Meereis im Ochotskischen Meer bilden, entsteht weniger salzreiches Zwischenwasser. Damit würde auch das Schwungrad an Dynamik verlieren, das den Zwischenwasserbereich im Nordpazifik bis an den Äquator belüftet.



Tab. 8.4: Modellergebnisse (Erdsystemmodell COSMOS). Ergebnisse sind als Anomalien dargestellt, berechnet als Differenzen aus den Szenarien 9 ka minus PI (vorindustriell). (A) Jährliche Mitteltemperatur (T) - Anomalie, dargestellt auf einem Schnitt entlang 150° E vom Äquator bis 60° N. Der Transekt geht direkt in das Ochotskische Meer nördlich von 42° N. (B) Wie in A, aber für jährliche mittlere Salzgehalts (S) -Anomalie. (C) Meereisvolumen-Anomalie 9 ka minus PI, berechnet aus Meereiskonzentration multipliziert mit Meereisdicke. (D) Wie C, aber für Meereisdicke. (Quelle: Lembke-Jene et al., 2018)

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im REKLIM-Verbund

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

Die Arbeiten des REKLIM-Forschungsverbundes sind auf insgesamt neun Helmholtz-Zentren und neun universitäre Partnerinstitute verteilt. REKLIM als Verbund arbeitet zentrenübergreifend und will damit Themen angehen, die allein nicht bearbeitet werden können und daher Mehrwerte zu der eigenen Forschung schaffen. Aber wer steht hinter dieser Arbeit und warum begeistert die Arbeit im Verbund die Wissenschaftler*innen? Dieser Frage gehen wir in dieser Rubrik nach und stellen seit Jahren insbesondere Doktorand*innen und Nachwuchswissenschaftler*innen, aber auch etabliertere Wissenschaftler*innen vor. So geben wir REKLIM ein Gesicht und zeigen diejenigen Menschen, die hinter der Forschung stehen und ohne die diese Forschung auch nicht möglich wäre.

Julia Hagemann (AWI)

Julia Hagemann studierte Geowissenschaften an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU). Nach einem Praktikum am GEOMAR in Kiel und einem Auslandsaufenthalt auf Spitzbergen am University Centre in Svalbard (UNIS) wurde ihr Interesses an paläoklimatologischen und ozeanischen Prozessen geweckt. Ihre Masterarbeit schrieb sie anschließend am Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC) unter der Fragestellung, wie sich die verschiedenen Sammeltiefen planktischer Foraminiferen auf die Mg/Ca- Wassertemperaturrekonstruktion auswirken. Derzeit rekonstruiert sie im Rahmen ihrer Doktorarbeit am AWI und in Kooperation mit dem MPIC anhand von Biomarkern die Wassertemperatur vor der südchilenischen Küste. Dieses Projekt hat seinen Fokus auf der Rekonstruktion von Wasseroberflächentemperaturen für eine Zeit, in der es wärmer war als heute – dem letzten interglazialen Maximum vor etwa 125.000 Jahren – und trägt zum **REKLIM Thema 8** bei. Letztendlich soll dieses Projekt dazu beitragen, den derzeitigen Klimawandel mit seinen Auswirkungen auf die hohen Breiten besser zu verstehen. Mit den Daten sollen Änderungen von Atmosphären-, Wassertemperatur und Eisverteilung erfasst werden. Sie liefern damit wertvolle Daten für künftige Klimamodelle.

„REKLIM erleichtert die Zusammenarbeit zwischen den unterschiedlichen Disziplinen, vor allem dem Abgleich im Feld aufgenommener Daten und Modellierungen. Eine enge Zusammenarbeit für eine annähernd kalkulierbare Zukunft ist hier unvermeidlich.“

Marleen Braun (KIT)

Marleen Braun hat am KIT Meteorologie studiert und hat in ihrer Masterarbeit am IMK-ASF Spurengasdaten des GLORIA Instruments ausgewertet. Für ihre Promotion ist sie nun in die Modellierung der Spurengase gewechselt und beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen zwischen dem Ozon in der Stratosphäre und dem bodennahen Klima. Diese Wechselwirkung ist besonders in der Antarktis deutlich ausgeprägt. Allerdings soll mit dem Modell (ICON-ART) und neuen Detektionsverfahren diese Verbindung auch für die Arktis aufgezeigt werden. Die Arbeiten von Marleen Braun und ihrer Kollegin, Dr. Jennifer Schröter, sind im ***REKLIM Thema 5*** verortet und tragen dort zum besseren Verständnis regionaler Klimaprojektionen in hohen Breiten bei.

Anna M. Irrgang (AWI)

Während ihres Bachelorstudiums der Geographie an der Philipps-Universität Marburg hat Anna ein Praktikum am U.S. Geological Survey Pacific Science Center in Santa Cruz, Kalifornien, absolviert. Dort wurde bereits ihr erstes Interesse für das Forschungsgebiet der arktischen Küsten geweckt. Besonders fasziniert sie dabei die arktische Küstenmorphologie und die vielschichtigen Zusammenhänge mit dem sich global verändernden Klima. Während ihres Masterstudiums an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel spezialisierte Anna sich auf diesen Themenkomplex und konnte in Kooperation mit einer Forschergruppe des Geological Survey of Canada im Jahr 2012 an einer Expedition in die kanadische Arktis teilnehmen, um Daten für ihre Masterarbeit zu erheben.

Nach dem Masterstudium setzte Anna ihre wissenschaftliche Arbeit mit einem DBU-Promotionsstipendium in der Jung-Forschergruppe von Hugues Lantuit am AWI in Potsdam fort. Zu dem Thema ‚Erosion von Permafrostküsten und deren Auswirkungen auf die natürliche und menschliche Umwelt‘ untersuchte Anna von 2014 bis 2017 Küstenerosion im Yukon und zeigte durch ihre interdisziplinären Analysen sowie durch Zusammenarbeit mit der Inuvialuit-Bevölkerung die Notwendigkeit der Küstenuntersuchungen für die dort lebenden Menschen auf. Anna verteidigte ihre Doktorarbeit im April 2018 an der Universität Potsdam.

Derzeit ist Anna zum einen in dem EU-Projekt INTERACT im

Bereich Data Science tätig und zudem verantwortliche, ausführende Direktorin (Executive Director) für das Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). Politische Aktivität für GTN-P und neue Forschungsfragen zum Thema der arktischen Küsten kann Anna durch ihre Arbeit im interdisziplinären EU-Forschungsprojekt ‚Nunataryuk' verbinden, welches im Rahmen des Horizon 2020 Programms gefördert wird. In dem Nunataryuk Projekt werden Sozial- und Naturwissenschaften zur Klimaveränderung in den Hohen Breiten und die Auswirkungen auf die sich verändernden Umwelten und den dort lebenden Menschen untersucht. Das Nunataryuk Projekt ist Teil des **REKLIM Topics 3** und wird in diesem Newsletter vorgestellt.

Qiang Wang (AWI)

Qiang Wang widmete sich seit seiner Doktorarbeit am Alfred-Wegener-Institut der Entwicklung und Anwendung des Finite Elemente Meereis Ozean Modells (FESOM). FESOM ist ein gemeinschaftlich am AWI entwickeltes globales Ozean-Zirkulationsmodell. Aufgrund seiner flexiblen Funktionalität und der Nutzung von unstrukturierten Gittern ermöglicht es neuartige Experimente für die Ozean- und Klimaforschung. Qiang ist einer der zentralen Entwickler von FESOM und spielt dabei eine Schlüsselrolle in der Modellentwicklung, Codierung und Umsetzung von Ideen. Obwohl er hauptsächlich an **REKLIM Thema 2** beteiligt ist, haben seine Simulationen auch zu anderen Topics beigetragen. Qiangs Forschungsinteresse gilt der Dynamik des Arktischen Ozeans und des Meereises, klimatischen Verbindungen zwischen der Arktis und den mittleren Breiten, der Ozean-Schelfeis Wechselwirkungen und der Auswirkung regionaler Ozeandynamik auf die globalen Zirkulationsmuster und das Klima.

„Mir gefällt, dass in REKLIM Forscher aus verschiedenen Disziplinen und Institutionen zusammenzuarbeiten. Es erleichtert mir nicht nur multidisziplinäre Forschung voranzutreiben, sondern hilft mir auch, neue Ideen und meine wissenschaftliche Karriere zu entwickeln."

Stephan Thober (UFZ)

Stephan Thober hat an der Universität Greifswald Mathematik mit dem Schwerpunkt Stochastik studiert. Nach seiner Diplomarbeit begann er im Januar 2011 als Doktorand am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung innerhalb des WESS-Projektes (www.wess.info) in der Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Luis Samaniego. Er befasste sich zunächst mit der Auswertung und dem statistischen Herunterskalieren von Klimamodelldaten für die hydrologische Modellierung. Die dabei entwickelten Methoden konnte Stephan Thober dann im Rahmen des REKLIM-Projektes in **Thema 6** anwenden.

Der Schwerpunkt lag hier zunächst darauf, die Vorhersagegüte von saisonalen meteorologischen Prognosen in Bezug auf landwirtschaftliche Dürren zu untersuchen. Nach seiner Doktorarbeit war Stephan Thober im EDgE (http://edge.climate.copernicus.eu) tätig und leitete das BMBF-finanzierte HOKLIM Projekt (www.ufz.de/hoklim). In diesen Projekten lag der Forschungsschwerpunkt auf den Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Dürren in Europa.

„Das Besondere an REKLIM ist für mich, dass es eine Plattform bietet Ideen über Zentrengrenzen und Disziplinen hinweg auszutauschen. Ebenfalls bietet REKLIM eine exzellente Möglichkeit, verschiedene Aspekte von zukünftigen Auswirkungen zu beleuchten: z. B. langfristige Trends und Extremereignisse."

Sabine Robrecht (FZJ)

Sabine Robrecht hat Chemie mit dem Schwerpunkt physikalische Chemie an der Universität Bielefeld studiert. Ihre Masterarbeit hat sie am Forschungszentrum Jülich über chemische Prozesse unter Ozonlochbedingungen angefertigt. In ihrer Doktorarbeit befasst sie sich dort derzeit mit der Ozonchemie in der unteren Stratosphäre bei erhöhten Wasserdampfkonzentrationen über Nordamerika. Ein Fokus liegt dabei auf Ozonabbauprozessen, welche in Kombination von tiefen stratosphärischen Temperaturen und durch Konvektion in die Stratosphäre injiziertem Wasser auftreten könnten. Die Analyse dieser Prozesses und dessen Sensitivitäten fügt sich gut in **REKLIM Thema 5** ein.

„Mir gefällt, dass REKLIM durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit besonders vielseitig ist. Dadurch konnte ich einen Überblick über die vielfältigen Zusammenhänge im Klimasystem gewinnen."

Simon Gruber (KIT)

Simon Gruber studierte Meteorologie am Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). In seiner Arbeit am KIT im Rahmen des **REKLIM Themas 1** beschäftigt er sich mit der hochaufgelösten numerischen Simulation von Zirruswolken im arktischen Winter mit einem Wettervorhersagemodell.

Sein Schwerpunkt liegt hierbei auf der Suche nach einem besseren Verständnis der Änderung von Wolkeneigenschaften durch natürliches und anthropogenes Aerosol vor dem Hintergrund des Klimawandels. Die Arbeiten liefern zudem wichtige Beiträge zur verbesserten Prozessdarstellung im Modellsystems ICON-ART.

"Um fundierte Erkenntnisse aus Klimamodellen abzuleiten, ist ein tiefgehendes Verständnis der ablaufenden Prozesse und deren Zusammenspiel wichtig. Hier bietet das REKLIM-Projekt eine einmalige Chance, Wissen aus verschiedensten Disziplinen und Blickwinkeln zusammenzuführen."

Gabriela Michalek (UFZ)

Gabriela Michalek hat sich seit Anfang ihres Promotionsstudiums in Umweltökonomie mit interdisziplinären Forschungsfragen beschäftigt. In ihrer Dissertation untersuchte sie u. a. Nudges (psychologische Verhaltensanstöße) als ein neues Instrument der Klimapolitik, komplementär zu den etablierten ökonomischen Ansätzen.

Als Post-Doc am UFZ Leipzig seit 2016 arbeitet sie weiter an der Schnittstelle von Umweltökonomie, Psychologie und Soziologie. Im Rahmen des EU-H2020-Projekts PLACARD und im neuen **REKLIM Thema 7** („Awareness, Perception, Adaptation, Resilience") erforscht sie zurzeit das Potenzial von Narrativen zur Auslösung bestimmter Verhaltens- und Wahrnehmungsmuster in Bezug auf Maßnahmen zur Klimaanpassung und Katastrophenvorsorge. Gabriela setzt auch ihre Forschung im Bereich Nudges fort, indem sie psychologische Konzepte der Gewohnheitsbildung in „grüne" Nudging-Interventionen integriert, um die Dauerhaftigkeit von Verhaltensänderungen zu erreichen.

„An dem REKLIM-Projekt finde ich den interdisziplinären und institutsübergreifenden Wissensaustausch besonders wertvoll und bereichernd."

REKLIM Wissenstransfer

Wissen schaffen für die Gesellschaft
„Vom Wissen zum Handeln“

klimafit – Vom Klimawissen zum Klimaschutz

Das Wissen über den Klimawandel, seine Ursachen und regionalen Ausprägungen ist eine wichtige Voraussetzung zum eigenen Handeln, um im Klimaschutz tätig zu werden und sich für eine nachhaltige Entwicklung unseres Planeten einzusetzen. Deutschland hat ambitionierte Ziele zur Emissionsreduktion im Klimaschutzplan 2050 festgelegt: bis 2050 sollen die Emissionen um mindestens 80 bis 95 Prozent reduziert werden. Klimaschutz ist damit eine Gesellschaftsaufgabe aller Bürgerinnen und Bürger.

Hier setzt das Projekt *klimafit* an, das seit März 2017 versucht, mit einem innovativen Kursformat an Volkshochschulen, den globalen Klimawandel regionalspezifisch aufzubereiten, wissenschaftliche Grundlagen zu vermitteln und ein Verständnis für die Klimaschutz- bzw. Anpassungsmaßnahmen der Kommunen zu schaffen Das Projekt bringt eine Reihe von wichtigen Akteuren zusammen (siehe Abb. WT1). Damit soll der wichtige Dialog zwischen Bürger/innen und der Klimaforschung gestärkt und Klimamultiplikatoren innerhalb der Kommunen ausgebildet werden. Gefördert wird das Projekt von der Robert Bosch Stiftung sowie der Klaus Tschira Stiftung und wird gemeinsam vom WWF Deutschland, der Helmholtz-Klimainitiative REKLIM, regionalen Bildungsträgern und Volkshochschulen durchgeführt (Abb. WT2).

Abb. WT1: Die verschiedenen Akteure, die das Projekt klimafit zusammenbringt. Das Projekt ist in vielen Aspekten sehr innovativ: den Partnern, dem Format des Kurses und dem Ort der Durchführung. (Grafik: Renate Treffeisen, AWI)

Abb. WT2: Der klimafit „Projektbegleiter“. (Quelle: WWF Deutschland)
Weitere Informationen zum Projekt klimafit unter www.reklim.de/klimafit.

Erfolgreicher Auftakt in Baden-Württemberg

Nach Durchführung einer Pilotstudie in Emmendingen (Süd-Baden) startete der Kurs *klimafit* im Rahmen der ersten Projektphase (Prototypentwicklung) im Wintersemester 2017/2018 an sechs ausgewählten Standorten (Stuttgart, Heidelberg, Bühl, Offenburg, Emmendingen und Bad-Säckingen) in Baden-Württemberg (Abb. WT3). 115 Bürger/innen haben daran teilgenommen und ihre Zertifikate als Klimamultiplikator/innen erhalten (Abb. WT4). Diese Standorte bieten aufgrund der gleichmäßigen räumlichen Verteilung und der unterschiedlichen Strukturen und Größenverhältnissen optimale Voraussetzungen, um anhand dieser unterschiedlichen Rahmenbedingungen Erfahrungen für die Weiterentwicklung von *klimafit* zu erhalten. An fünf Kursabenden wurde der im Blended Learning-Format angelegte Kurs durchgeführt. Er verbindet Präsenzveranstaltungen mit E-Learning („Massive Open Online Courses“ – MOOCs), um eine vertiefende Beschäftigung mit dem Thema außerhalb der Präsenzveranstaltungen zu ermöglichen. Die Kursabende beinhalten interaktive Elemente, zudem gibt es Beiträge und Live-Chats mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Helmholtz-Forschungsverbundes REKLIM und weiteren regionalen Klimawissenschaftlerinnen und Klimawissenschaftlern, die die globale Perspektive auf die regionale Ebene übertragen. Wichtiger Bestandteil des Kurses ist die aktive Einbindung der Kommunen ins Kurskonzept über kommunale Klimaschutzmanager/innen oder Vertreter/innen der Kommunen.

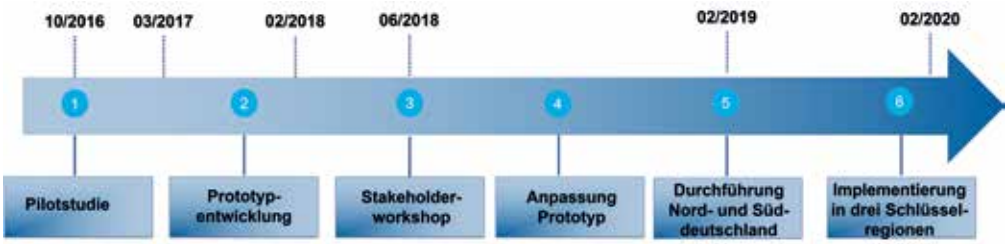


Abb. WT3: Projektablauf klimafit (Grafik: Renate Treffeisen, AWI)

Evaluierung: Prototyp

Das Projekt *klimafit* wird von einer umfassenden Evaluierung begleitet. Ziel der ersten Evaluierungsphase war es, Anpassungsbedarfe und Optimierungspotenziale des Kurses zu identifizieren, bevor der Kurs in weiteren Regionen angeboten und etabliert wird. Dabei sollten Angaben über Erwartungen und Einschätzungen der Teilnehmenden bezüglich der inhaltlichen und methodischen Qualität des Kurses erfasst sowie überprüft werden, inwiefern die wesentlichen Ziele des Kurses erreicht wurden. Die Evaluation teilte sich in eine quantitative ex-ante- und ex-post-Befragung der Teilnehmenden mit Fragebögen an den sechs Prototypstandorten. Zusätzlich wurden mit jeweils zwei Teilnehmenden aus den sechs Kursen qualitative Interviews geführt, um Ergebnisse und Tendenzen aus den quantitativen Befragungen spezifizieren und vertiefen zu können.

Zentrale Fragestellungen der Evaluation waren:

- Wie zufrieden sind die Teilnehmenden mit der Struktur des Kurses? Welche organisatorischen Veränderungsbedarfe bestehen?
- Wie wurde das Blended-Learning-Format durch die Teilnehmenden angenommen und wo bestehen gegebenenfalls Anpassungsbedarfe?
- Hat der Kurs zu Lernprozessen und Wissenszuwachs bei den Teilnehmenden geführt und in welchen Themenbereichen?
- Hat der Kurs die Motivation, Handlungskompetenz und Selbstwirksamkeitseinschätzung der Teilnehmenden erhöht, damit diese sich zukünftig im Themenfeld Klimawandel / Klimaschutz engagieren?
- Hat der Kurs dazu beigetragen, dass sich die Teilnehmenden untereinander und in der Region stärker vernetzen?

Grundlage für die Evaluierung bildet der „logical model approach“ (Julian et al., 1995). Dieses Konzept ist als Evaluations- und Planungsinstrument zu verstehen, das die Möglichkeit bietet, Verbindungen zwischen Input, Output, Ergebnissen (Outcome) und potentiellen Auswirkungen (Impact) zu betrachten. Um Output und Outcome bewerten zu können, wurden Indikatoren entwickelt, die in Fragen für die Vor- und Nachbefragung der Teilnehmenden überführt wurden. Die Erfassung des Impacts ist mit dieser Form der Evaluation jedoch nicht möglich.

Die Prototypentwicklung war mit einem enormen Erkenntnisgewinn für die Weiterentwicklung des Kurses verbunden. Dazu zählen Aspekte wie z. B. die Zusammensetzung der Teilnehmenden, technischer Herausforderungen im Blended-Learning-Format, Einbindung und Benutzung der MOOCs, Moderation und Kursleiter/innen, des didaktischen Konzeptes, der Standortauswahl oder der Umsetzung der inhaltlichen regionalen Schwerpunkte im Kurskonzept.

Ergebnisse der ex-ante Befragung

Die Befragung vor Beginn der Kurse hat wichtige Informationen über die Zusammensetzung der Kursteilnehmenden und ihren persönlichen Hintergrund sowie ihr Vorwissen geliefert. Die Altersstruktur im Kurs lag mit 52 % der Kursteilnehmenden schwerpunktmäßig im Bereich 45-65 Jahre. Mit zusätzlich 15 % über 65-jährigen Teilnehmenden sind gut zwei Drittel aller Personen älter als 44 Jahre. Am kleinsten ist die Gruppe der unter 25-jährigen mit nur 6 % der Teilnehmenden. Etwas mehr als ein Viertel (27 %) der Teilnehmenden sind zwischen 25 und 44 Jahre alt. Mit 64 % hat eine deutliche Mehrheit der Kursteilnehmenden einen Hochschulabschluss. Die Berufszuordnung der Teilnehmenden ist sehr heterogen. Mit 23 % entfallen fast ein Viertel der Angaben auf „Wirtschaftsunternehmer“ und 17 % der Antworten sind auf „selbständig“ entfallen. 12 % der Antworten entfielen auf die Kategorie „andere“. Einen beruflichen Bezug zum Klimawandel hat gut die Hälfte der Teilnehmenden.

81 % der Teilnehmenden besucht mit dem Kurs *klimafit* zum ersten Mal eine Weiterbildung zum Thema Klimawandel. Allerdings haben etwa 45 % angegeben, an Klimaschutz-Initiativen teilzunehmen. Gut die Hälfte (51 %) der Teilnehmenden schätzen ihre Kenntnisse zum Themenfeld „normal“ ein, mehr als ein Drittel (35 %) sogar als „eher hoch“ oder „hoch“. „Eher niedrige“ gaben dagegen nur 13 % der Teilnehmenden an.

Bei der Abfrage nach konkreten Informationen zum Klimawandel fällt auf, dass sich die meisten Teilnehmenden (62 bzw. 53 %) „gut“ oder „sehr gut“ über die Ursachsen und die globalen Folgen des Klimawandels informiert fühlen. Über die regionalen Folgen fühlen sich jedoch nur 26 % entsprechend „gut“ oder „sehr gut“ informiert, 43 % nur „teilweise“ und 31 % „nicht so gut“ oder „gar nicht“. Ebenfalls auffällig ist die vergleichsweise geringe Kenntnis von Anpassungsmaßnahmen im Alltag: Drei Viertel (75 %) sind hier „gar nicht“ bis „teilweise“ informiert.

Abb. WT4: Zertifikatsübergabe im Rahmen des Kurses klimafit in Stuttgart (Foto: VHS Stuttgart)

Abb. WT5: Ergebnisse der Diskussionen an den vier Thementischen während des Stakeholder Workshops „Kommunen werden klimafit“ in Hamburg (Quelle von links nach rechts: www.riesenspatz.de, Eli Breuing, Marie-Pascale Gafinen, Angela Gerlach, Tina Nispel)

Mehr als die Hälfte der Teilnehmenden nimmt aus persönlichem Interesse an dem Kurs teil, bei vielen spielte zusätzlich auch die Möglichkeit der beruflichen Weiterbildung eine Rolle für die Kurswahl. Die Information über die Veranstaltung hat ein Großteil der Teilnehmenden über die Medien, Familie, Freunde und Bekannte oder aus dem VHS-Programm erhalten. Die Erwartungen an den Kurs sind sehr gemischt, mit recht deutlichem Schwerpunkt auf „individueller Wissenserweiterung“. Viele der Teilnehmenden erhoffen sich außerdem „Informationen zum aktuellen Forschungsstand“, „Argumentationshilfen“ und das „Aufzeigen eigener Handlungsoptionen“.

Exemplarische Ergebnisse aus der ex-post Befragung

Insgesamt zeigt sich eine hohe Zufriedenheit der Teilnehmenden an dem Kurs. 95 % der Teilnehmenden gab an, dass ihnen der Kurs „sehr gut“ (64 %) und „gut“ gefallen hat und würden den Kurs weiterempfehlen. Der organisatorische Rahmen, also Dauer, Umfang und Beginn des Kurses wurden als passend bewertet. Die Mischung aus analogen und digitalen Lernformaten im Kurs *klimafit* wird von den Teilnehmenden ebenfalls als sehr positiv bewertet. Die Online-Angebote werden als wichtige Wissens- und Vertiefungsressource angesehen. Der Wunsch nach mehr Austausch und Möglichkeiten zur Vernetzung untereinander zeigt die hohe Bedeutung der Präsenzveranstaltung für die Teilnehmenden.

Es ist hervorzuheben, dass 71 % der Teilnehmenden angeben, dass sich ihre Erwartungen an den Kurs „voll und ganz“ erfüllt haben. Dies gilt in hohem Maße, vor allem im Bereich der allgemeinen Wissensvermittlung zum Thema Klimawandel und bezüglich des lokalen Klimaschutzes. Es wird jedoch auch hier deutlich, dass sich viele Teilnehmende mehr Informationen zu den eigenen Handlungsmöglichkeiten wünschen und dass die Vernetzung mit Gleichgesinnten im Kurs nicht optimal integriert war. Weitere exemplarische Ergebnisse der ex-post Befragung sind der Tabelle WT1 zu entnehmen.

Tab. WT1: Exemplarische Ergebnisse aus der ex-post Befragung

Aspekt der Befragung	Ergebnis der Evaluierung
Kursthemen	Bezüglich der Kursthemen findet über die Hälfte der befragten Personen die Aufbereitung und Vermittlung der jeweiligen Themen „genau richtig“. Bei den Themen „Ursachen des Klimawandels“ und „Auswirkungen des Klimawandels“ beträgt der Anteil jeweils 74 %.
Unterrichtselemente und Kursformat	Insgesamt sind die Teilnehmenden mit den unterschiedlichen Unterrichtselementen sehr zufrieden. So gab mehr als die Hälfte der befragten Personen an, die jeweiligen Unterrichtselemente „sehr gut“ bzw. „gut“ zu finden. Besonders herauszustellen sind hierbei die Elemente „Präsentation des Kursleiters“ und „weiterführende Materialien“. Diese wurden von 53 % bzw. 60 % mit „sehr gut“ bewertet. In diesem Zusammenhang wurde angemerkt, dass die verschiedenen Medien und Materialien von hoher Qualität und sehr informativ seien.
Lernerfolge	91 % der Teilnehmenden gaben an, „viel“ oder „etwas“ über die regionalen Folgen des Klimawandels dazugelernt zu haben, so dass der Lernerfolg in diesem Themenbereich am größten ist. Auch die Lernerfolge in den Themenbereichen Klimaschutzmaßnahmen, Klimaanpassung und globale Folgen werden mit 82 %, 81 % und 78 % als hoch bewertet. 70 % sagen, dass sie „viel“ oder „etwas“ über die Ursachen des Klimawandels gelernt hätten.

Stakeholder-Workshop

Am 05. Juni 2018 fand in Hamburg der eintägige Stakeholder-Workshop „Kommunen werden klimafit“ statt. Eingeladen waren unterschiedliche Akteure aus Bereichen des Klimaschutzes und der Klimaanpassung, Vertreter/innen von Bundes- und Landesebene sowie aus Kommunen. Ziel des Workshops war es, über die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und zukünftigen Gestaltung von *klimafit* gemeinsam zu diskutieren. Darüber hinaus galt es, ein stärker handlungsorientiertes Kurskonzept und weitere Ansätze zur Aktivierung der Bevölkerung zu mehr Akzeptanz für Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. In Rahmen der Zielsetzung des Workshops wurden vier Thementische entwickelt, welche eine Diskussionsgrundlage für die Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Kurses bildeten. Die vier Thementische umfassten folgende Schwerpunkte:

1. die Durchführung und Qualität des Kurses
2. die Teilnehmergewinnung und Qualifizierung zu Multiplikatoren,
3. die Planungssicherheit sowie die Finanzierungsmöglichkeiten zur Verstetigung des Kurses und
4. die Netzwerkbildung und die Handlungsaktivierung.

Anhand gewählter stereotypischer Beispielfiguren („Personas“) wurden die vier Themenfelder diskutiert. Die Personas wurden auf Basis der Erfahrungen der schon durchgeführten *klimafit*-Kurse in Südwestdeutschland entwickelt. Ergebnisse aus den vier Thementischen sind in der Abb. WT5 abgebildet.

Das Kursformat wird nun in einer weiteren Phase für die Region Norddeutschland auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus Durchführung, Evaluation und Stakeholderworkshop weiterentwickelt (siehe Abb. WT3). Geplant ist die Durchführung des Kurses in Norddeutschland im Frühjahr 2019 bisher an folgenden Standorten: Bremen, Bremerhaven, Eckernförde, Emden, Greifswald, Hamburg und Rostock. Der Erfolg in Südwestdeutschland führt darüber hinaus dazu, dass das überarbeitete Kurskonzept dort erneut auch an mindestens sechs Standorten angeboten wird.

Begleitforschung durch REKLIM

Die Anpassung an und der Umgang mit dem Klimawandel stellen derzeit eine der größten Herausforderungen für Forschung, Politik, Verwaltung und Gesellschaft dar. Auch wenn das wissenschaftliche Wissen über den Klimawandel und seine Folgen beständig wächst, internationale Abkommen und politische Maßnahmen beschlossen werden oder Verwaltungen Klimaschutzprogramme auf unterschiedlichen Ebenen auflegen, so passiert gesellschaftlich betrachtet trotz all dieser Maßnahmen nicht viel in Sachen Klimaschutz.

Genau an diesem Punkt setzt die Begleitforschungsstudie zum Projekt *klimafit* an, die gemeinsam von der REKLIM-Koordinierungsstelle und der Uni Hamburg durchgeführt wird. Sie untersucht das Paradoxon zwischen mehr Klimawissen und einem ausbleibenden klimaschützenden Handeln von Bürger/innen auf der Grundlage von qualitativen Interviews und mit Hilfe von Beobachtungsstudien in VHS-Kursen zum Thema Klimawandel. Konkret fragt sie: Welche klimabezogenen Wissensstrukturen und -formen liegen bei den Teilnehmern vor und nach den Kursen vor? Gibt es einen Wissenszuwachs im Rahmen der Kurse und wie sieht dieser Prozess aus? Da mehr oder auch besseres Wissen nicht automatisch klimafreundliche Praktiken und Alltagsroutinen nach sich ziehen, erfolgt auf Grundlage der gewonnenen Daten in einem zweiten Schritt eine Analyse, wie das Phänomen Klimawandel „vergesellschaftet“ und zu einem lokalen oder regionalen Anknüpfungspunkt für ein klimaschützendes Handeln gemacht werden kann. Das Ziel besteht darin herauszufinden, welche sozialen Elemente, Prozesse und Potenziale dazu beitragen können, dass sich aus den Kursen heraus „communities of climate practices“ entwickeln, die sich der Klimafrage „von unten“ annehmen und in konkrete Aktivitäten wie z. B. Schaffung von Grünzügen übersetzen lassen. Das Wissen über diese Prozesse ist für Entscheidungsträger in Gesellschaft und Politik von besonderer Relevanz, weil mit ihm sozial eingebettete Formen und gesellschaftliche Potenziale der Klimaanpassung und -mitigation geplant, gefördert und durchgeführt werden können.

Die regionalen Klimabüros in der Helmholtz-Gemeinschaft

Klimaberatung: regional spezifisch, verständlich, solide

Süddeutsches Klimabüro
Zehn Jahre Süddeutsches Klimabüro am KIT

Das Süddeutsche Klimabüro am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) folgt einer langjährigen Strategie, basierend auf den drei Schwerpunkten „Bewusstsein bilden“, „Dialog fördern“ und „Wissenschaften koppeln“ (Abb. K1). Daraus ist in den letzten zehn Jahren ein vielfältiges Kommunikationsangebot entstanden. Dieses umfasst neben themenspezifischen Vorträgen und Informationsbroschüren auch eine aktive Beteiligung in Beratungsgremien und Arbeitsgruppen. Nicht zuletzt führte diese Strategie zur erfolgreichen Beantragung von mehreren wissenschaftlichen Projekten mit dem Ziel, regionale Klimasimulationen für weitere Forschungsbereiche sowie die Öffentlichkeit aufzubereiten und zu vermitteln.

In diesen inter- bis transdisziplinären Projekten steht eine gleichwertige Betrachtung von Stakeholdern und Klimaforschung im Fokus. Neben Projekten mit Verknüpfungen zur Landwirtschaft und dem Bauwesen wurde beispielsweise eine Befragung in den circa 150 Städten Baden-Württembergs sowie wirtschaftlichen Unternehmen durchgeführt. Das Ziel war es, neue Kenngrößen für die Anpassung an den Klimawandel zu bestimmen. Die Rückmeldungen aus den Befragungen sowie die Experteninterviews zeigten einen großen Bedarf an einer branchenspezifischen Aufbereitung von Klimawissen auf Grundlage der bei den Stakeholdern vorhandenen Erfahrung. Die daraufhin mit regionalen Klimamodellen berechneten Klimakenngrößen quantifizierten den Einfluss des regionalen Klimawandels auf Städte und Unternehmen. So konnten die Auswirkungen greifbarer gemacht werden.

Abb. K1: Beispiele aus der Arbeit des Süddeutschen Klimabüros (Grafik: Hans Schipper, KIT)

Das Süddeutsche Klimabüro konnte damit zeigen, wie die regionale Klimaforschung bei einer Vielzahl von Entscheidungen als Grundlage dienen kann. Vor allem die Bereitschaft der beteiligten Wissenschaftler/innen, sich auf die Bedarfe der Stakeholder einzulassen, wurde von diesen als sehr wertvoll erachtet.

Mitteldeutsches Klimabüro
Der Deutsche Dürremonitor

Am Mitteldeutschen Klimabüro am Helmholtz Zentrum für Umweltforschung wurde im letzten Jahr der dialogbasierte Wissenstransfer vorangetrieben. Auf der Basis von europaweiten Klimafolgenstudien wurden die Auswirkungen einer globalen Erwärmung von 1.5, 2 und 3 Grad Celsius auf Deutschland und die Bundesländer im BMBF-geförderten Projekt „Hoklim“ quantifiziert. Eine Broschüre mit der Zusammenfassung der Ergebnisse ist unter www.ufz.de/hoklim verfügbar. Auf zahlreichen Regionalveranstaltungen, vor allem in Mitteldeutschland, wurden die Ergebnisse mit regionalen Entscheidungsträgern diskutiert.

Darüber hinaus hat die Trockenheit 2018 in zahlreichen Bereichen große Schäden angerichtet. Beispiele sind Ertragsrückgänge in der Landwirtschaft, Waldbrände, vertrockneter Aufwuchs und Schädlingsausbreitung im Forst, Einschränkungen in der Binnenschifffahrt oder der Stromerzeugung (Abb. K2). Vor diesem Hintergrund hat sich der am Mitteldeutschen Klimabüro entwickelte „Deutsche Dürremonitor“ (www.ufz.de/duerremonitor) als gefragte Informationsquelle gezeigt. Im

Abb. K2: Die Auswirkungen der Dürre 2018 zeigten sich auch bei Bäumen: Junge Bäume und auch ältere Flachwurzler warfen bereits im Juli in Leipzig ihre Blätter. (Foto: Andreas Marx, UFZ)

Dr. Hans Schipper (KIT), janus.schipper@kit.edu | Dr. Andreas Marx (UFZ), Andreas.Marx@ufz.de

Juli 2018 wurde die Webpräsenz mehr als 18000-mal besucht. Neben nationalen und regionalen Tageszeitungen nutzten auch zahlreiche Fernsehsender und Radiosendungen die Daten, Informationen und Abbildungen des Dürremonitors.

Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg
87 Seiten fundiertes Wissen über die Brennpunkte unseres Planeten

Klimaforschung verständlich machen – mit diesem Ziel konzipierte und realisierte das Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg das neue Magazin „Auf den Spuren des Wandels“, das im Februar 2018 veröffentlicht wurde (Abb. K3). In Artikeln, Interviews und Infografiken erfahren die Leserinnen und Leser, warum Klimaforschung in den Polargebieten so wichtig ist. Wer sich auf diese kurzweilige und informative Lektüre einlässt, geht gewappnet in die nächste Diskussion zum Klimawandel.

Die Arktis erwärmt sich mehr als doppelt so schnell wie der Rest des Planeten. In kaum einer Region ist der Klimawandel deutlicher spürbar. Doch gibt es dort im Sommer bald wirklich kein Meereis mehr? Wieso entstehen an der arktischen Infrastruktur Schäden in Milliardenhöhe? Und was für Auswirkungen hat das alles auf unsere Breiten? Tag für Tag sammeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) unzählige Daten und arbeiten mit ausgefeilten Klimamodellen daran, Antworten auf all diese Fragen zu erhalten. Ihre Mission ist es, Klimaveränderungen in den Polarregionen genau zu untersuchen und zu verstehen, um Aussagen über die zukünftige Entwicklung unseres Klimas zu machen.

Das neue Magazin zur Klimaforschung in den Polargebieten bringt dieses Wissen nun zusammen. In fünfzehn Beiträgen erfahren die Leserinnen und Leser, wie diese wichtigen Daten zustande kommen und was sie uns über die Zukunft unseres Planeten verraten. Sie erhalten fundiertes Wissen darüber, wie Forschungsexpeditionen ins Eis, Untersuchungen im Labor und Klimamodelle zum Verständnis des Klimas beitragen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erzählen, was sie immer wieder aufs Neue in die Polargebiete treibt. Komplexe Themen wie beispielsweise der Anstieg des Meeresspiegels werden außerdem mithilfe von Infografiken visualisiert. Das Magazin kann hier online heruntergeladen werden (https://www.awi.de/forschung/klimawissenschaften/klimamagazin).

Abb. K3: Das neue Klimamagazin „Auf den Spuren des Wandels“ (Quelle: AWI)

Norddeutsches Küsten- und Klimabüro
Zweiter Hamburger Klimabericht veröffentlicht

Der Klimawandel ist nicht nur eine globale Herausforderung. Auch in der Metropolregion Hamburg müssen Politik, Verwaltung und Gesellschaft handeln. Wie können Folgen des unvermeidlichen Klimawandels bewältigt werden? Wie soll die Verminderung von Emissionen in der Stadt organisiert werden? Der Zweite Hamburger Klimabericht des KlimaCampus Hamburg, koordiniert durch Dr. Insa Meinke vom Norddeutschen Küsten- und Klimabüro am Helmholtz-Zentrum Geesthacht, fasst dazu den aktuellen Stand der Wissenschaft zusammen.

Der Hamburger Klimabericht (Abb. K4) stellt als Grundlage den aktuellen Forschungsstand zusammen und verdeutlicht die erforderlichen Reaktionen auf den Klimawandel in Norddeutschland. Mehr als 70 Autoren haben die Forschungsergebnisse systematisch zusammengetragen. Alle Beiträge wurden einem wissenschaftlichen Begutachtungsprozess unterzogen, der von einem Lenkungsausschuss überwacht wurde. Der zweite Klimabericht folgt dem ersten Bericht aus dem Jahr 2010. Beide Berichte wurden vom Norddeutschen Küsten- und Klimabüro des Helmholtz-Zentrums Geesthacht koordiniert. Das Wissen ist seitdem erheblich angewachsen, besonders im Bereich Klimawandel und Gesellschaft. Hierzu zählen u. a. Klimaschutz, Governance und Nachhaltigkeit. Am 24. Oktober 2017 wurde der Bericht in der Handwerkskammer Hamburg offiziell vorgestellt und in den Hamburger Kontext eingeordnet.

Die Hamburgische Nachhaltigkeitspolitik mit 20-jähriger Geschichte bietet Ansätze, Klimawandel und nachhaltige Entwicklung zu verknüpfen. Diese können basierend auf den Vorschlägen der Wissenschaft weiter ausgebaut werden. Der Hamburger Klimabericht kann unter https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-55379-4.pdf im open access heruntergeladen werden.

Abb. K4: Titelseite des Hamburger Klimaberichts

Weitere Informationen:
www.klimabuero-polarmeer.de
www.norddeutsches-klimabuero.de
www.mitteldeutsches–klimabuero.de
www.sueddeutsches-klimabuero.de

Dr. Renate Treffeisen (AWI), Renate.Treffeisen@awi.de | Dr. Insa Meinke (HZG), Insa.Meinke@hzg.de

Referenzen, Autoren und Fotonachweise

Referenzen:

Thema 1:

Dethloff, K., Handorf, D., Jaiser, R., Rinke, A. and Klinghammer, P., 2018: Dynamical mechanisms of Arctic amplification, Ann. N.Y. Acad. Sci., doi:10.1111/nyas.13698

Grosfeld, K., Treffeisen, R., Asseng, J., Bartsch, A., Bräuer, B., Fritzsch, B., Gerdes, R., Hendricks, S., Hiller, W., Heygster, G., Krumpen, T., Lemke, P., Melsheimer, C., Nicolaus, M., Ricker, R. and Weigelt, M., , 2016: Online sea-ice knowledge and data platform <www.meereisportal.de> , Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research & German Society of Polar Research, 85 (2), pp. 143-155, .doi: 10.2312/polfor.2016.011.

Ionita, M., Lohmann, G., and Rimbu, N., 2008: Prediction of Elbe discharge based on stable teleconnections with winter global temperature and precipitation, J. Clim., 21, 6215–6226, doi:10.1175/2008JCLI2248.1.

Ionita, M., Dima, M., Lohmann, G., Scholz, P. and Rimbu, N., 2015: Predicting the June 2013 European flooding based on precipitation, soil moisture and sea level pressure , J. Hydrometeorology, 16 (2), pp. 598-614 . doi: 10.1175/JHM-D-14-0156.1

Rinke, A., Dethloff, K., Dorn, W., Handorf, D., and Moore, J.C., 2013: Simulated Arctic atmospheric feedbacks associated with late summer sea ice anomalies, J. Geophys. Res. 118, 7698–7714, doi:10.1002/jgrd.50584.

Rinke, A., Maturilli, M., Graham, R.M., Matthes, H., Handorf, D., Cohen, L., Hudson, S.R. and Moore, J.C., 2017: Extreme cyclone events in the Arctic: Wintertime variability and trends, Envir. Res. Lett., doi:10.1088/1748-9326/aa7def.

Sumata, H., Kauker, F., Gerdes, R., Koeberle, C., and Karcher, M., 2013: A comparison between gradient descent and stochastic approaches for parameter optimization of a sea ice model, Ocean Science, 9 (4), 609-630, doi:10.5194/os-9-609-2013.

Thema 2:

Sasgen, I., van de Broeke, M. R., Bamber, J., Rignot, E., Sorensen, L., Wouters, B., Martinec, Z., and Simonsen, S. B., 2012: Timing and origin of recent regional ice-mass loss in Greenland. Earth Plant. Sci. Lett., 333-334, 293-303 p., doi:10.1016/j.epsl.2012.03.033.

Thema 3:

Antonova, S., Duguay, C.R., Kääb, A., Heim, B., Langer, M., Westermann, S. and Boike, J., 2016: Monitoring bedfast ice and ice phenology in lakes of the Lena River delta using TerraSAR-X backscatter and coherence time series, Remote Sensing, 8, 903.

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H., 2017: Collapsing Arctic coastlines, Nature Climate Change, 7(1), 6-7, DOI: 10.1038/nclimate3188.

Irrgang, A., Lantuit, H., Manson, G., Günther, F., Grosse, G. and Overduin, P.P., 2018: Variability in Rates of Coastal Change Along the Yukon Coast, 1951 to 2015, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123, (4), 779-800. DOI: 10.1002/2017JF004326.

Jones, B., Hinkel, K.M., Arp, C., Eisner, W.R. , 2008: Modern erosion rates and loss of coastal features and sites, Beaufort Sea coastline, Alaska. Arctic, 61(4), 361-372. DOI: 10.14430/arctic44.

Kohnert, K., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J. and Sachs, T., 2017: Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada, Scientific Reports, 7, 5828.

Kohnert, K., Juhls, B., Muster, S., Antonova, S., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J. and Sachs, T., 2018: Toward understanding the contribution of waterbodies to the methane emissions of a permafrost landscape on a regional scale—A case study from the Mackenzie Delta, Canada, Global Change Biology, https://doi.org/10.1111/gcb.14289.

Metzger, S., Junkermann, W., Mauder, M., Butterbach-Bahl, K., Trancón, Y., Widemann, B., Neidl, F., Schäfer, K., Wieneke, S., Zheng, X.H., Schmid, H.P. and Foken, T., 2013: Spatially explicit regionalization of airborne flux measurements using environmental response functions, Biogeosciences, 10, 2193-2217.

Muster, S., Roth, K., Langer, M., et al., 2017: PeRL: A circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake Database, Earth System Science Data, 9, 317-348.

Vincent, W.F., Lemay, M. and Allard, M., 2017: Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach, Arctic Science, 3, 39–64.

Wik, M., Varner, R.K., Walter, A.K., MacIntyre, S. and Bastviken, D., 2016: Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release, Nature Geoscience, 9, 99-106.

Thema 4:

Güntner, A., Reich, M., Mikolaj, M., Creutzfeldt, B., Schroeder, S., and Wziontek, H., 2017: Landscape-scale water balance monitoring with an iGrav superconducting gravimeter in a field enclosure, HESS, 21, 3167-3182, 10.5194/hess-21-3167-2017.

Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E.F., and Marx, A., 2018: Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts, Nature Climate Change, DOI: http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5.

Tecklenburg, C. and Blume, T., 2017: Identifying, characterizing and predicting spatial patterns of lacustrine groundwater discharge, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5043-5063, https://doi.org/10.5194/hess-21-5043-2017.

Thober, S., Boeing, F. and Marx, A., 2018: Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland, Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad, URL: www.ufz.de/hoklim.

Wen, X., Unger, V., Jurasinski, G., Koebsch, F., Horn, F., Rehder, G., Sachs, T., Zak, D., Lischeid, G., Knorr, K.H., Böttcher, M., Winkel, M. and Liebner, S., 2018: Predominance of methanogens over methanotrophs contributes to high methane emissions in rewetted fens, Biogeosciences Discuss., 1-37.

Thema 5:

Vogel, A., 2016: Upper tropospheric chemical composition analysis by 4D-variational assimilation of airborne limb-imaging retrievals, Master thesis, Univ. of Cologne.

Thema 6:

Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E.F. and Marx, A., 2018: Climate change will re-define soil drought in Europe, Nature Climate Change, 8, 421-426, DOI: http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5.

Zahn, M., Akperov, M., Rinke, A., Feser, F. and Mokhov, I., 2018: Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different re-analysis data. J. Geophys. Res., 123 (5), 2737-2751, doi: 10.1002/2017JD027439.

Thema 7:

Birkmann, J. and von Teichman, K., 2012: Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: key challenges—scales, knowledge, and norms, Sustain. Sci. (2010) 5, 171–184, doi: 10.1007/s11625-010-0108-y.

Gonzalez-Riancho, P., Gerkensmeier, B. and Ratter, B.M.W., 2017: Storm surge resilience and the Sendai Framework: Risk perception, intention to prepare and enhanced collaboration along the German North Sea coast, Ocean & Coastal Management, 14, 118-131.

Mitchell T., van Aalst M. and Villanueva P.S., 2010: Assessing progress on integrating disaster risk reduction and climate change adaptation in development processes, Strengthening Climate Resilience Discussion, Paper 2, Institute of Development Studies.

PLACARD Project Strategic Narrative Cookbook, 2018: URL: https://www.placard-network.eu/using-narratives-to-help-integrate-cca-drr/#cookbook.

Thema 8:

Lembke-Jene, L., Tiedemanna, R., Nürnberg, D., Gonga, X., and Lohmann, G., 2018: Rapid shift and millennial-scale variations in Holocene North Pacific Intermediate Water ventilation, PNAS, vol. 115, no. 21, 5365–5370, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1714754115.

Pauly, M., Helle, G., Miramont, C., Büntgen, U., Treydte, K., Reinig, F., Guibal, F., Sivan, O., Heinrich, I., Riedel, F., Kromer, B., Balanzategui, D., Wacker, L., Sookdeo, A. and Brauer, A. (in press), 2018: Subfossil trees likely reveal enhanced Mediterranean hydroclimate variability at the onset of the Younger Dryas, Scientific Reports.Zhang, X., Knorr, G., Lohmann, G. and Barker, S., 2017: Abrupt North Atlantic circulation changes in response to gradual CO2 forcing in a glacial climate state, Nature Geoscience, doi:10.1038/ngeo2974.

Wissenstransfer:

Julian, D.A., Jones, A. and Deyo, D., 1995: Open system evaluation and the logical model: program planning and evaluation tools, Evaluation and Program Planning, 18(4), 333-341.

Beitragende Autorinnen und Autoren:

Thema 1: K. Dethloff, W. Dorn, R. Gerdes, K. Grosfeld, M. Ionita, F. Kauker, M. Karcher, G. Lohmann, A. Rinke, P. Scholz, H. Sumata, R. Treffeisen (alle AWI)

Thema 2: I. Sasgen, K. Grosfeld (beide AWI), F. Flechtner (GFZ)

Thema 3: M. Fritz, B. Heim, A. Irrgang, H. Lantuit (alle AWI), K. Kohnert, T. Sachs (beide GFZ)

Thema 4: I. Heinrich, A. Marx (beide UFZ), H.-J. Hendricks Franssen (FZJ)

Thema 5: H. Elbern, R. Müller, S. Robrecht (alle FZJ), A. Vogel, (FZJ/Uni Köln), M. Dameris (DLR), P. Braesicke (KIT), E. Romanowsky (AWI)

Thema 6: F. Feser (HZG), M. Kunz (KIT), S. Tober (UFZ)

Thema 7: R. Schwarze (UFZ)

Thema 8: A. Brauer (GFZ), R. Tiedemann (AWI)

Wissenstransfer: K. Grosfeld, R. Treffeisen (beide AWI), M. Döring (Universität Hamburg)

Fotonachweise:

Foto Umschlag außen: AWI/Martin Schiller, Fotos Seite 1 waagerecht 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.

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

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Forschungszentrum Jülich
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum
Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
Helmholtz -Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung
Karlsruher Institut für Technologie
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

www.reklim.de

REKLIM
Helmholtz-Verbund
Regionale Klimaänderungen