

Martin Kappas (Hrsg.)

Klimawandel und Hautkrebs



Martin Kappas (Hrsg.)

KLIMAWANDEL UND HAUTKREBS

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Dieser Titel ist als Printversion im Buchhandel
oder direkt bei *ibidem* (www.ibidem-verlag.de) zu beziehen unter der

ISBN 978-3-89821-874-0.

∞

ISBN-13: 978-3-8382-5874-4

© *ibidem*-Verlag
Stuttgart 2012

Alle Rechte vorbehalten

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und elektronische Speicherformen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in or introduced into a retrieval system, or transmitted, in any form, or by any means (electronical, mechanical, photocopying, recording or otherwise) without the prior written permission of the publisher. Any person who does any unauthorized act in relation to this publication may be liable to criminal prosecution and civil claims for damages.

Vorwort des Herausgebers

Das vorliegende Buch fasst die Beiträge einer interdisziplinären Projektgruppe (*CLIMAderm*) zusammen, die sich mit dem Einfluss des Klimawandels auf Hautkrebserkrankungen beschäftigt. Die Beiträge in diesem Buch basieren auf Vorträgen, die im Rahmen wissenschaftlicher Workshops an den Universitäten Göttingen (Februar 2007) und Hamburg (Juni 2007) gehalten wurden.

Die Workshops wurden von der folgenden dreiköpfigen Wissenschaftlergruppe initiiert:

- Prof. Dr. Matthias Augustin (CVderm-Competenzzentrum Versorgungsforschung bei Haut- und Allergierkrankungen, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf)
- Prof. Dr. Martin Kappas (Geographisches Institut der Universität Göttingen, Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung)
- Dipl.-Geogr. Jobst Augustin (Geographisches Institut der Universität Göttingen, Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung)

Hautkrebs (Melanom, Basaliom, Spinaliom) ist die häufigste Krebsart in Deutschland. Die Inzidenz hat in den letzten Jahrzehnten insbesondere wegen des veränderten Verhaltens der Menschen zugenommen. Der wissenschaftlich projizierte Klimawandel könnte in den nächsten Jahrzehnten sowohl das Verhalten der Menschen gegenüber UV-Licht wie auch die natürliche UV-Belastung verändern. Bislang liegen aber über den möglichen Zusammenhang zwischen Klimawandel und Hautkrebshäufigkeit noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Dieses Manko wurde von den Initiatoren erkannt und in ersten Problemskizzen formuliert. Gleichzeitig wurde von den Initiatoren hinterfragt, wie eine auf dieses Problem ausgerichtete Forschung in Deutschland zu organisieren sei, denn schon bei den ersten Vorgesprächen stellte sich heraus, dass nur ein breit angelegter, interdisziplinärer Ansatz der Fragestellung „Klimawandel und Hautkrebs“ gerecht werden kann. Die erheblich gewachsene Bedeutung dieses Forschungsfeldes erzeugt einen politischen Handlungsdruck und bedarf einer verbesserten Vermittlung von Wissen über die Kausalität von „Klimawandel und Hautkrebs“, damit die richtigen gesellschaftlichen

Entscheidungen für die Zukunft getroffen werden können. In diesem Fall steht insbesondere der in Zukunft wachsende Versorgungsbedarf von hautkranken Menschen im Vordergrund. Dazu benötigt die Politik zeitnah die nötigen wissenschaftlichen Bewertungen, auf denen sie ihre Entscheidungen fällen kann. Nach Ansicht der *CLIMAderm*-Initiatoren bedarf es einer intensiveren Vernetzung der deutschen Forschung zwischen den Bereichen „Klimawandel“ und „Hautkrebsforschung“. Aus unserer Sicht kann dieses Ziel nur durch eine konsequente Neuausrichtung der Forschungsstruktur erreicht werden. Hierzu wäre die Gründung eines interdisziplinären Exzellenz-Netzwerkes ein erster zentraler Schritt. Wenn auch der Begriff „Exzellenz“ in letzter Zeit etwas strapaziert wurde, so könnte dieses Netzwerk helfen, die in Deutschland zu dieser Thematik vorhandene „kritische Masse“ zu bilden, um eine weitere Fragmentierung der Forschung zu verhindern. Als Zielsetzungen dieses Netzwerkes stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- In welchem Ausmaß wird sich der Klimawandel auf die Prävalenz des Hautkrebses auswirken?
- Welche präventiven Maßnahmen wären sinnvoll?
- Mit welchen Auswirkungen ist bei einer sich verändernden Prävalenz zu rechnen?

Die aufgeführten Fragestellungen sollen in Zukunft in einem interdisziplinären, mehrstufigen wissenschaftlichen Projekt geklärt werden. Folgende Teilprojekte sind vorgesehen:

1. Zusammenhang zwischen Klimawandel und UV-Strahlung;
2. Auswirkungen veränderter UV-Strahlung auf die Haut;
3. Einfluss des menschlichen Verhaltens auf die individuelle UV-Exposition;
4. Bedeutung der UV-Exposition für die Hautkrebshäufigkeit;
5. volkswirtschaftliche und medizinische Bedeutung von Präventionsmaßnahmen.

Die Aufzählung der Teilprojekte verdeutlicht, dass eine große Anzahl von Fachdisziplinen (Klimatologie, Meteorologie, Geographie, UV-Biologie, Dermatologie, Epidemiologie, Medizin-Soziologie, Umweltpsychologie, Gesundheitsökonomie) beteiligt ist.

Die vorliegende Buchveröffentlichung folgt diesem multidisziplinären Ansatz und verknüpft Beiträge der unterschiedlichen Fachdisziplinen. In der Reihung der Beiträge spiegelt sich die logische Kette des Ansatzes „*CLIMAderm*“ wieder, indem ausgehend von grundlegenden klimatologischen Betrachtungen im Beitrag von *M. Kappas* und *J. Augustin* zunächst auf die schleichenden Auswirkungen des Klimawandels und die Bedeutung der Klimafolgenforschung eingegangen wird. Tendenzen des Klimawandels lassen sich aus Klimaprojektionen der Klimamodelle ableiten, die im Beitrag von *D. Jacob* und *C. Teichmann* beispielhaft anhand regionaler Klimaprojektionen mittels REMO vorgestellt werden. Aufbauend auf die Aussagen und Projektionen zum Klimawandel wird im folgenden Beitrag von *G. Seckmeyer* auf den Zusammenhang zwischen Klimawandel, Ozon und UV-Strahlung eingegangen. Im Beitrag von *M. Steinmetz* und *M. Wallasch* werden erste Ergebnisse der Gesamt-ozonbestimmung aus UV-Messspektren des bundesweiten solaren UV-Monitoring Systems in Deutschland vorgestellt. Das Thema „Messen, Bewerten und Informieren“ steht im Folgebeitrag von *M. Wallasch* und *M. Steinmetz* im Vordergrund. Nach den klimatologischen Grundlagen zum Klimawandel und Darlegung des Messnetzes zum bundesweiten UV-Monitoring wird im Beitrag von *P. Köpke* die solare UV-Dosis und deren Abhängigkeit von atmosphärischen Bedingungen und menschlichem Verhalten erklärt. Der Folgebeitrag von *C. Stick*, *L. Pielke-Harms* und *H. Sandmann* nimmt die Punkte des menschlichen Verhaltens auf und differenziert noch stärker zwischen Sonnen-Exposition und UV-Exposition. Dadurch wird eine deutliche Brücke zwischen den rein klimatologisch orientierten Beiträgen zu den „verhaltensorientierten“ bzw. menschenorientierten Forschungsansätzen geschlagen. Die Folgen zu hoher UV-Strahlendosen sind Bestandteil des Beitrags von *R. Greinert*, *E.-W. Breitbart* und *B. Volkmer*, die die Wirkung der UV-Strahlung auf DNA-Schäden und Hautkrebs untersuchen. In der logischen Kette stehen nach Erkrankung bzw. Schädigung durch UV-Strahlung die klinischen und versorgungswissenschaftlichen Aspekte des Hautkrebses im Beitrag von *M. Augustin* im Mittelpunkt. Die Hautkrebs-Prävention als folgerichtiges wichtiges Arbeitsfeld im Zusammenhang mit der Versorgungsforschung bildet den Inhalt des Beitrags von *E.-W. Breitbart*, *B. Volkmer*

und *R. Greinert* und leitet über zum Beitrag von *A. Katalinic* und *R. Pritzkeleit* zur Registrierung von Hautkrebs sowie neueren Methoden und aktuellen Ergebnissen der Hautkrebsstatistik. *A. Trojan* und *O. v. d. Knesebeck* gehen auf das sich ändernde Expositionsverhalten des Menschen unter sich verändernden Klimabedingungen ein und sprechen somit die soziologische Dimension des *CLIMAderm*-Projektes an. Die volkswirtschaftliche Betrachtung des Hautkrebses im Beitrag von *B. Raffelhüschen*, *T. Hackmann* und *C. Hagist* schließt die logische Kette des *CLIMAderm*-Ansatzes 1) Klimawandel 2) Strahlung und Wirkung 3) Verhalten und Exposition 4) Epidemiologie und Versorgung sowie 5) volkswirtschaftliche Konsequenzen ab.

Aus der Sicht eines Geographen sind mir interdisziplinäre Forschungsansätze vertraut, da die Geographie aus sich heraus eine Wissenschaft par excellence an der Schnittstelle zwischen Natur- und Gesellschaftswissenschaften verkörpert und somit in ihren Arbeits- und Lösungsansätzen Fachgrenzen überwindet. Aus dem praktischen Arbeiten ist mir aber auch bewusst, dass die interdisziplinäre Forschung in der Wissenschaft noch nicht ausreichend honoriert wird bzw. einen zu geringen Stellenwert zugeschrieben bekommt. Mit dem Forschungsprojekt *CLIMAderm* soll versucht werden, diesem Umstand entgegen zu wirken.

Martin Kappas

Göttingen, Januar 2008

Inhalt

Vorwort

M. Kappas und J. Augustin

Klimawandel und Hautkrebs – Klimafolgenforschung in 21. Jahrhundert.....1

D. Jacob und C. Teichmann

Regionale Klimaprojektion mit REMO.....12

G. Seckmeyer

Zusammenhang zwischen Klimawandel, Ozon und UV-Strahlung.....25

M. Steinmetz und M. Wallasch

Bestimmung des Gesamt ozons aus UV-Messspektren des bundesweiten solaren
UV-Monitoring – Erste Ergebnisse.....52

M. Wallasch und M. Steinmetz

Bundesweites solares UV-Monitoring: Messen, bewerten und unterrichten.....62

P. Köpke

Solare UV-Dosis und ihre Abhängigkeit von atmosphärischen Bedingungen und
menschlichem Verhalten97

C. Stick, L. Pielke-Harms, H. Sandmann

Sonnen-Exposition, UV-Exposition.....118

R. Greinert, E.-W. Breitbart, B. Volkmer

UV-induzierte DNA-Schäden und Hautkrebs.....145

M. Augustin

Klinische und versorgungswissenschaftliche Aspekte des Hautkrebses.....174

E.-W. Breitbart, B. Volkmer, R. Greinert

Hautkrebs-Prävention.....193

A. Katalinic, R. Pritzkeleit

Registrierung von Hautkrebs – Methodik und aktuelle Ergebnisse.....222

A. Trojan, O. v.d. Knesebeck

Verändertes Expositionsverhalten der Menschen unter dem Einfluss des
Klimawandels? – Rechercheergebnisse und Forschungsbedarf239

B. Raffelhüschen, T. Hackmann, C. Hagist

Volkswirtschaftliche Auswirkungen von Hautkrebs – eine dynamische
Betrachtung274

Abkürzungen

Klimawandel und Hautkrebs – Klimafolgenforschung im 21. Jahrhundert

Martin Kappas, Jobst Augustin

Geographisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen

1. Einleitung

Der projizierte Klimawandel wird in Zukunft eine weiter zunehmende ökologische, aber auch gesellschaftliche Bedeutung bekommen. Ein Beispiel hierfür sind Konflikte um das Trinkwasser, die zwar nicht ihre alleinige Ursache im Klimawandel haben, sich durch diesen aber erheblich verschärfen können. Der Klimawandel wird sich aufgrund der Trägheit des Klimasystems nicht mit sofortiger Wirkung umkehren lassen. Damit kommt der Adaptionfähigkeit menschlicher Gesellschaften eine zentrale Bedeutung in der Klimafolgenforschung sowie im Klimaschutz im 21. Jahrhundert zu.

Nach den zugrundeliegenden Modellrechnungen der meisten internationalen globalen Klimamodelle (GCM's) wird sich der zukünftige projizierte Klimawandel in Relation zu bereits stattgefundenen Klimaschwankungen der Erdgeschichte sehr schnell und somit in erdgeschichtlich kurzer Zeitspanne ereignen. Dies bedeutet einen hohen zeitlichen und politischen Handlungsdruck und lässt gleichzeitig die Frage aufkommen, wie man Forschung zum Klimawandel und die daraus resultierenden Anpassungsstrategien unter hohem Handlungs- und Zeitdruck organisiert und durchführt.

Das vorliegende Buch geht einer Frage nach, die sich mit einer „schleichenden“ Auswirkung des Klimawandels beschäftigt, nämlich der möglichen Veränderung der Ultravioletten (UV)-Einstrahlung auf unsere Erde. Die UV-Strahlung ist für die Menschen nicht sichtbar oder fühlbar. Dennoch treten nach einer zu starken UV-Exposition gesundheitliche Schäden in Form einer Hautrötung, im Extremfall sogar Hauttumore auf. Die kurzwellige ultraviolette Strahlung ist wesentlich energiereicher als das für das menschliche Auge sichtbare Licht. Sie kann daher besser chemische Reaktionen in der Atmosphäre, auf Oberflächen, im Wasser und in Organismen akti-

vieren. Lebewesen haben daraufhin im Laufe der Evolution Anpassungsmechanismen an die energiereiche Strahlung entwickelt. Die Pigmentierung der Haut und ihr Ausdruck in unterschiedlichen Hauttypen und Hautfarben ist nur eine dieser über die Evolution erworbenen Anpassungen (siehe hierzu Aoki, 2002). Darüber hinaus haben sich während der Evolution zusätzlich zur Abschirmung der UV-Strahlung durch Pigmente, (Schirmpigmente) eine Vielzahl von aktiven Reparaturmechanismen entwickelt, welche vor allem Schäden an der DNA beheben können. Diese passiven (Schirmpigmente) und aktiven (DNA-Reparaturmechanismen) Schutzvorkehrungen ermöglichen ein an das elektromagnetische Spektrum der Strahlung angepasstes Leben auf der Erde. Neben den genannten Schutzfunktionen des Körpers übernimmt die Atmosphäre den eigentlichen Schutz vor der UV-Strahlung, was im Folgenden kurz erläutert werden soll.

2. Die Atmosphäre

Klima und Leben auf der Erde hängen seit Entstehung der Erde untrennbar zusammen. Obwohl wir nicht genau wissen, wie das Leben entstanden ist, können wir davon ausgehen, dass es aus der Zufuhr energiereicher Strahlung, elektrischer Entladungen in Blitzen, sehr hohen Temperaturen und Drücken und dadurch ausgelöster Ketten von chemischen Reaktionen hervorgegangen ist. Kohlenstoff dürfte dabei eine entscheidende Rolle gespielt haben. Moleküle auf Kohlenstoffbasis, wie Makromoleküle der Nukleinsäuren und Proteine, spielen als Bausteine allen tierischen und pflanzlichen Lebens, bis hin zu unserer Erbsubstanz der DNS (Desoxyribonukleinsäure) eine wichtige Rolle. Beruhte das Klima zu Anfang allein auf physikalischen und anorganisch chemischen Prozessen, so waren mit dem Erscheinen der Cyanobakterien erste lebende Organismen hinzugekommen. Diese ersten Bakterien deckten ihren Bedarf an Kohlenstoff durch Photosynthese unter Freisetzung von Sauerstoff aus Kohlendioxid. Indem die Cyanobakterien, auch Blaualgen genannt, im Laufe der Zeit das Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen, nahm der Sauerstoffgehalt zu und der Treibhauseffekt ab. Das Klima der Erde kühlte sich proportional zur Abnahme des Kohlendioxids ab, die Konzentration des Sauerstoffs in der Atmosphäre nahm hingegen weiter zu. Dieser in immer größeren Mengen in die Atmosphäre gelangende molekulare Sauerstoff (O_2) wurde durch die noch immer hohe UV-Strahlung der

Sonne in atomaren Sauerstoff (O) gespalten. Der atomare Sauerstoff verband sich mit O₂ zu Ozon (O₃). Dieser Prozess führte allmählich zur Bildung einer Ozonschicht in der Stratosphäre, welche die energiereichen UV-Strahlen absorbiert und die Erde vor der UV-Strahlung schützt. Die Bildung des Ozonschildes vor ca. 400.000 Millionen Jahren ermöglichte erst die Entwicklung und Evolution der Landlebewesen.

Dieser kurze Exkurs in die Entstehung der Erdatmosphäre verdeutlicht, dass es einen „Klimawandel durch Leben“ schon sehr frühzeitig gegeben hat und dieser auch stets fortschreiten wird, solange „Leben“ auf der Erde existiert. Es handelt sich um einen sehr sensiblen, selbstregulatorischen Effekt, der zu einem Gleichgewichtszustand führte, indem der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre so niedrig gehalten wurde, dass er gerade ausreichte, um die Bildung von Aminosäuren zu ermöglichen (Urey-Effekt). Der freie Sauerstoffgehalt der Erdatmosphäre ist deshalb mit dem Phänomen „Leben auf der Erde“ verknüpft, da sich seine Herkunft aus Material von Erdkruste und Erdmantel ausschließt. Als Quelle des freien Sauerstoffs kommen überwiegend nur nicht-geologische Prozesse in Betracht, bei denen der Sauerstoff aus Gasen wie Wasserdampf und Kohlendioxid freigesetzt wurde. Diese Prozesse werden von der Sonnenenergie angetrieben. Man spricht deshalb auch von photochemischen Prozessen. Die wesentliche photochemische Reaktion ist die Photodissoziation von Wasserdampf und Kohlendioxid durch sehr kurzwellige UV-Strahlung (Wellenlänge < 200 nm). Diese extrem kurzwellige Strahlung konnte anfänglich aufgrund des Fehlens von Sauerstoff tief in die primordiale Erdatmosphäre eindringen. Es lassen sich zwei wesentliche Photodissoziationsprozesse in der Ur-Atmosphäre formulieren:



Die Atmosphärenforscher Urey (1952), Berkner und Marshall (1966) belegten aber, dass keine der beiden Reaktionen zum Aufbau des heutigen Sauerstoffanteils von rund 21 % beigetragen haben kann. Durch die Reaktion (1) entstehen neben einem Molekül Sauerstoff zwei Moleküle Kohlenmonoxid (CO). Die mögliche Entstehung des Sauerstoffs aus Reaktion (1) würde also mit einer äquivalenten Menge an CO einhergehen. CO tritt aber heute nur als Spurengas mit einem Anteil von weniger als einem Millionstel auf. Durch die Reaktion (2) wird neben Sauerstoff molekularer

Wasserstoff (H₂) gebildet, der im Gegensatz zu CO als leichteres Gas durchaus in den Weltraum entweichen sein kann. Da aber der sukzessiv gebildete Sauerstoff die kurzwellige Strahlung absorbiert, die zu seiner Bildung nach (1) und (2) benötigt wird, liegt das Gleichgewicht dieses sich selbst begrenzenden Prozesses bei nur einem Tausendstel des heutigen Sauerstoffgehalts in der Erdatmosphäre, dem so genannten Urey-Pegel. Durch die Photodissoziation der Reaktionen (1) und (2) kann also nur ein Bruchteil (10⁻³) des aktuellen Sauerstoffgehalts entstanden sein. Heute wissen wir mit großer Sicherheit, dass der freie Sauerstoffgehalt der Erdatmosphäre eine Folge des Lebens auf der Erde ist, bzw. ein Folgeprodukt der Photosynthese von Biomasse. Solange die Erdatmosphäre keinen Sauerstoff und deshalb auch kein Ozon enthielt, konnte die kurzwellige UV-Strahlung (< 290 nm Wellenlänge) ungehindert bis zur Erdoberfläche durchdringen und die Grundbausteine lebender Substanzen (Eiweiße, Nukleinsäuren) zerstören.

Der Ausbau der biologischen Aktivität auf der Erde forderte somit die ergiebigere Nutzung der Sonnenenergie, um somit die Photosynthese effektiver zu betreiben. Während heterotrophe und chemoautotrophe Organismen im tieferen Ozeanwasser oder im Schlamm Schutz vor der UV-Strahlung fanden und somit leben konnten, bedurfte es für die Photosynthese des Sonnenlichts und damit einhergehend einer verstärkten Exposition der UV-Strahlung.

Durch die Ausbildung schützender Pigmente und der Bildung einer Ozonschicht, war es Organismen möglich, das Sonnenlicht zur Photosynthese zu nutzen.

3. Die Ozonschicht und die photochemischen Prozesse

Untrennbar mit der Sauerstoffbildung in der Atmosphäre verbunden ist die Bildung von Ozon. Ozon, die dreiatomige Form des Sauerstoffs bildet sich als Photodissoziationsreaktion aus molekularem Sauerstoff (O₂) unter kurzwelliger UV-Bestrahlung mit Wellenlängen < 242 nm.



Die Summe aus Reaktionsgleichung (3) und (4) bildet die Nettobilanz für den ozonbildenden Prozess:



In einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre bildet sich also stets Ozon, wenn ausreichend UV-Strahlung vorhanden ist. Im gleichen Maße findet aber auch ein Ozonabbauprozess statt. Die atmosphärische Ozonschicht entspricht dem Gleichgewicht zwischen ozonbildenden und ozonabbauenden Reaktionen. Die globale Ozonverteilung wird dabei wesentlich durch die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre geprägt. Gerade diese wird aber in Zukunft durch den Klimawandel Veränderungen unterworfen sein.

Tatsächlich zeigt die nach den Reaktionsgleichungen ohne Berücksichtigung von Transportprozessen berechnete Ozonschicht deutliche Abweichungen von der gemessenen Ozonverteilung. In der Vertikalverteilung des Ozons erhält man im Mittel ein Konzentrationsmaximum in rund 25 km Höhe. Dabei nimmt die Ozonkonzentration in allen Höhenschichten der Atmosphäre von den niederen zu den höheren Breiten ab. Dies liegt daran, dass sich der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung und damit auch die UV-Anteile ändern. Mit zunehmender geographischer Breite nimmt der Winkel ab, was gleichzeitig eine Abnahme der Einstrahlungsenergie pro Flächeneinheit bedeutet. Daraus resultiert eine Abnahme der Ozonkonzentration vom Äquator zum Pol hin. Die tatsächlich gemessene Ozonverteilung ergibt allerdings ein anderes Bild. Im Äquatorbereich entspricht die Ozonverteilung ohne Berücksichtigung von Transportprozessen den Erwartungen nach der reinen Photochemie. Hier nimmt der Ozonpartialdruck oberhalb von 25 km Höhe vom Äquator zu den höheren Breiten hin ab. In der unteren Stratosphäre ergibt sich allerdings ein umgekehrtes Bild. Hier nimmt der Ozonpartialdruck in allen Jahreszeiten und besonders im ausgehenden Winter, vom Äquator zum Pol hin, stark zu. Im Widerspruch zur reinen Photochemie steigt der Ozongehalt der unteren Stratosphäre mit zunehmender geographischer Breite an und das Ozonkonzentrationsmaximum sinkt sogar ab und kann ein weiteres, temporäres Maximum in der Vertikalen ausbilden. Die Ozonschichtdicke kann dann in den nördlichen Bereichen bis auf 5-6 mm zunehmen. Dieses photochemische Ungleichgewicht ist ursächlich in der atmosphärischen Zirkulation begründet. Durch die

„Hauptantriebsräder“ der atmosphärischen Zirkulation wird Ozon aus den Hauptbildungsgebieten der oberen tropischen Stratosphäre in Richtung Pol transportiert. Die Prinzipien dieser Transportprozesse sind bekannt und wurden schon in den 60er Jahren von Newell (1963) beschrieben. In der Stratosphäre, die wegen der vertikalen Temperaturzunahme wie eine Inversionsschicht wirkt und so einen Vertikalaustausch unterbindet, ist der Horizontaltransport der wichtigste Prozess, der indirekt eine vertikale Durchmischung bewirken kann. In der unteren Stratosphäre (< 20 km) wird die Ozonverteilung somit fast ausschließlich über dynamische Prozesse der Zirkulation gesteuert.

Obwohl die intensive Forschung der letzten Jahre erhebliche Kenntnisse der Ozon-Photochemie gewonnen hat, gibt es insbesondere im Hinblick auf die zukünftige Beurteilung des anthropogenen Einflusses und dessen Bedeutung erhebliche Unsicherheiten. Dabei ergeben sich wesentliche Unsicherheiten durch die benutzten Modelle selbst. Denn auch unter der Annahme, dass alle wichtigen Reaktionsarten und Photolyseprozesse mit ausreichender Genauigkeit modelliert werden können, so verbleiben dennoch erhebliche Unsicherheiten, die sich aus der atmosphärischen Dynamik ergeben.

Es bedarf deshalb noch weiterer Anstrengung und Forschung, die Modelle in eine Form zu bringen, damit sie die natürlichen Prozesse quantitativ richtig beschreiben. Aus dieser Sichtweise ergibt sich ein enormer Forschungsbedarf, um der Frage des zukünftigen Klimawandels und dessen Auswirkung auf den Menschen nachzugehen. Ein wichtiges Thema zukünftiger Klimafolgenforschung ist hierbei der Kausalzusammenhang von Klimawandel und weltweit zunehmender Hautkrebs-erkrankungen.

4. Klimawandel und Hautkrebsforschung – ein wichtiger Mosaikstein der Klimafolgenforschung

Hautkrebs ist weltweit die häufigste Krebsart. Seine wichtigsten Formen sind das maligne Melanom („Schwarzer Hautkrebs“) sowie das Plattenepithelkarzinom und das Basalzellkarzinom („Heller Hautkrebs“). Im Vergleich aller Krebsarten weist die Inzidenz (Häufigkeit) des Hautkrebses in den letzten Jahrzehnten einen besonders hohen Anstieg auf. Stärkster wissenschaftlich belegter Kausalfaktor des Hautkrebses

ist die UV-Strahlung, deren Wirkung auf der Erdoberfläche stark von stratosphärischer Ozonkonzentration und Bewölkung abhängig ist. Die Auswirkungen des Klimawandels auf diese und weitere Faktoren, welche eine Steigerung der Hautkrebsinzidenzen zur Folge haben können, sind noch weitgehend unerforscht.

Unter Berücksichtigung der Regularien des Montrealer Protokolls dauert es etwa bis 2065, bis sich die stratosphärische Chlorkonzentration wieder unter die für das Auftreten der kritischen Konzentration des „Ozonlochs“ absinken wird (WMO, 2007). Jedoch haben die ozonzerstörenden Substanzen eine lange Lebensdauer in der Atmosphäre, was die Ozonschicht in den nächsten Jahrzehnten „empfindlich“ bleiben lässt. Die Kombination des verstärkten Auftretens von so genannten Niedrigozonereignissen („Low Ozon Events“, LOEs) und Ozonminilöchern (OM) (Stenke und Grewe, 2003) mit länger anhalten Schönwetterperioden im Frühjahr und Sommer, kann zu einer erheblich veränderten Strahlungsbelastung des Menschen führen. Daran gekoppelt ist das thermisch bedingte Expositionsverhalten des Menschen, der sich bei zunehmender thermischer Gunst vermehrt im Freien aufhalten wird bzw. sich allgemein stärker der Strahlung exponiert (sei es in der Freizeit mit eventuellen Strahlungsspitzen oder durch eine steigende Grundbelastung).

Die *Abbildung 1* zeigt stark vereinfacht die kausalen Zusammenhänge zwischen einem projizierten Klimawandel und der sich möglicherweise dadurch verändernden Hautkrebsinzidenz. Zu erkennen ist, dass klimatische Veränderungen sowohl einen Einfluss auf Faktoren, wie Wetterlagen, Bewölkung, oder möglicherweise die stratosphärische Ozonkonzentration haben, als auch auf das Verhalten des Menschen. Im Februar und Juni 2007 fanden an den Universitäten Göttingen und Hamburg wissenschaftliche Workshops statt, um die Fragestellung „Klimawandel und Hautkrebs“ in einem interdisziplinären Wissenschaftlerteam zu diskutieren.

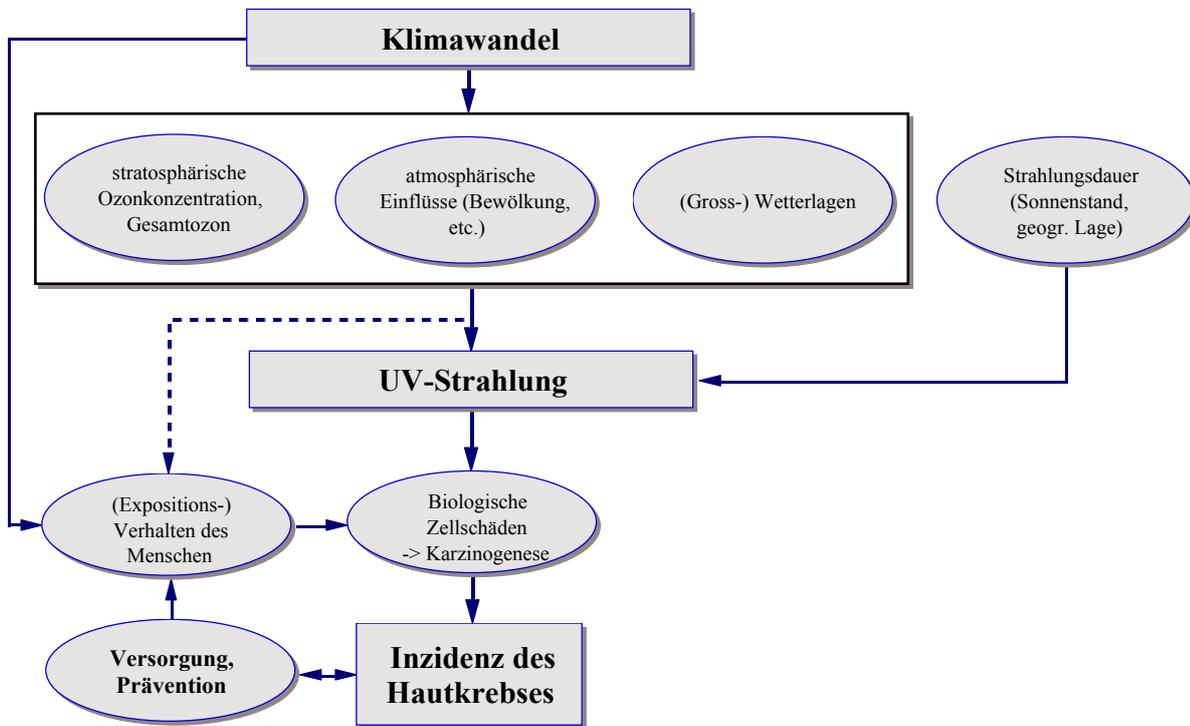


Abbildung 1: Kausalitätsdiagramm Klimawandel, UV-Strahlung, Hautkrebsprävalenz.

In beiden Workshops wurde deutlich, dass die Forschung folgende strategische Aufgaben zum Thema Klimawandel und Hautkrebs als prioritär angehen sollte:

1. die Klärung wichtiger offener Fragen im Verständnis des Klimasystems und des Klimawandels zum Thema Hautkrebsinzidenz, die insbesondere die Prognosefähigkeit evaluieren und verbessern;
2. die Erarbeitung von Anpassungsstrategien;
3. die Entwicklung von Leitlinien für technologische und systemische Innovationen zur Vermeidung gesundheitsschädigender Auswirkungen des Klimawandels;
4. die Identifizierung und Bewertung ökonomischer Auswirkungen;
5. der Aufbau eines interdisziplinären Exzellenz-Netzwerkes im Bereich „Klimawandel und Hautkrebs“, um die Fragmentierung der deutschen Forschung in diesem Bereich zu überwinden und die Zusammenarbeit von natur-, medizin- und sozialwissenschaftlicher Forschung im Bereich Klimawandel zu fördern.

Mit diesen Aufgaben sind wissenschaftliche Leitfragen verbunden, die in einem interdisziplinären Forschungsnetzwerk im Bereich Klimawandel und Hautkrebs angegangen werden müssen. Die wichtigsten Leitfragen sind:

- Wie ist der Einfluss sich verändernder klimatologisch-meteorologischer Parameter auf die UV-Strahlung zu bewerten?
- Wie ist eine sich durch den Klimawandel verändernde UV-Strahlung hinsichtlich ihrer biologischen Wirkung zu bewerten?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und dem (thermisch motivierten) Expositionsverhalten der Menschen? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für Hautkrebs-Präventionsmaßnahmen?
- Welche Auswirkungen hat der Klimawandel bezüglich Hautkrebsinzidenz, dem zukünftigen Versorgungsbedarf und der Volkswirtschaft?
- Wie ist die Forschung in diesem Bereich zu koordinieren und wie kann eine strukturierte und zentrale Datenhaltung zum Aufbau von Bewertungs- und Prognosemodellen führen, die dann für politische Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit zur Verfügung stehen?

Die Beantwortung dieser Fragen lässt sich nur in einem breit gefächerten, interdisziplinären Ansatz beantworten. Es gibt zwar zahlreiche Einzeluntersuchungen, dennoch können diese aufgrund ihrer fehlenden Vernetzung die komplexe Fragestellung des Einflusses des Klimawandels auf die Hautkrebsinzidenz nicht beantworten. Vor diesem Hintergrund wurde ein interdisziplinäres Netz von Wissenschaftlern „*CLIMAderm*“ aus Klimatologie, Meteorologie, Geographie, UV-Forschung, Dermatologie, Epidemiologie, Medizin-Soziologie, Umweltpsychologie und Gesundheitsökonomie aufgebaut (www.climaderm.de). Die Arbeitsgruppe *CLIMAderm* versteht sich als ein offenes Wissenschaftlernetzwerk, welches sich auf die Kernfrage „Klimawandel und Hautkrebs“ konzentriert und dazu 5 Arbeitscluster generiert hat, die in ihrer Vernetzung zum verbesserten Verständnis des Klimasystems und seiner Einwirkungen auf Mensch und Gesellschaft führen soll. Die *Abbildung 2* zeigt den schematischen Aufbau des *CLIMAderm*-Netzwerkes und seiner Arbeitscluster.

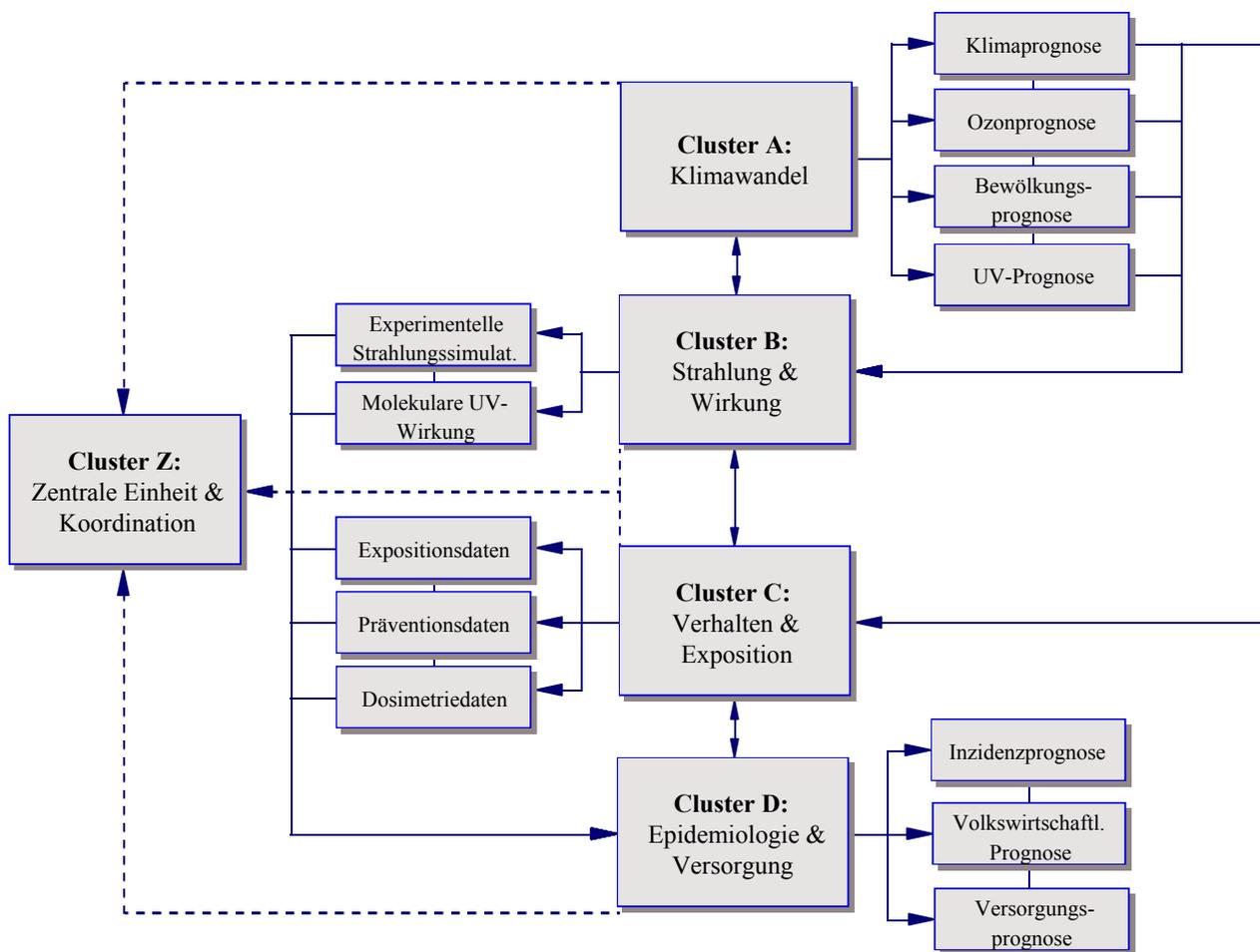


Abbildung 2: Schematische Struktur des CLIMAderm-Netzwerks und seiner Arbeitscluster.

Bei der Clusterbildung wurde besonders viel Wert auf eine intensive Vernetzung gelegt, um eine breit angelegte Betrachtung der Thematik sicherzustellen.

Literatur:

Aoki, K. (2002): Sexual Selection as a cause of human skin colour variation: Darwin's hypothesis revisited. In: *Annals of Human Biology*, **29**(6): 589-608.

Berkner, L.V.; Marshall, L.C. (1966): Limitation on oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere. In: *Journal of Atmospheric Sciences*, **23**:133-144

Newell, R.E. (1963): Transfer through the tropopause and within the stratosphere. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **89**:167

Stenke, A.; Grewe, V. (2003): Impact of ozone mini-holes on the heterogeneous destruction of stratospheric ozone. In: *Chemosphere*, **50**(2):177-190

Urey, H.C. (1952): The atmospheres of the planets. In: *Handbuch der Physik*, **52**:363-418. Springer Verlag

WMO (World Meteorological Organization) (2007): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 50, Geneva, Switzerland, 572pp

Regionale Klimaprojektionen mit REMO

Daniela Jacob, Claas Teichmann

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

1. Einleitung

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen (*Abbildung 1*). Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wenn ja, wie sich extreme bzw. seltene Ereignisse (Starkniederschläge, Hitzeperioden, Überschwemmungen, usw.) verändert haben und gegebenenfalls verändern werden. Für derartige Aussagen wurden globale Klimamodelle entwickelt, die zusammen mit verschiedenen Annahmen über die Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre mögliche Entwicklungen des Klimas in den nächsten 100 Jahren berechnen.

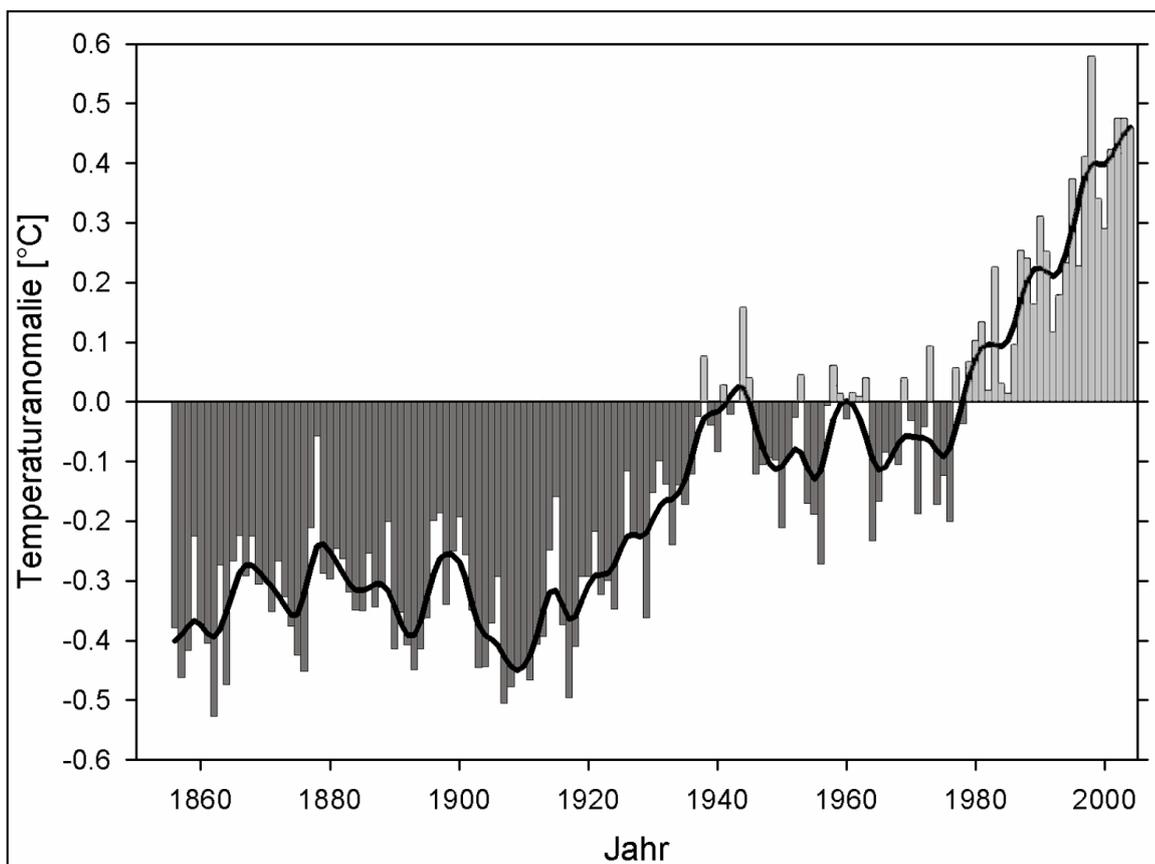


Abbildung 1: Abweichung der globalen Mitteltemperatur (C°) in 2 m über Grund von der Referenzperiode 1961 bis 1990.

Regionale Klimamodelle bieten die Möglichkeit, für einen Ausschnitt des Globus differenziertere Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas zu treffen, als es mit einem Globalmodell möglich ist. Nach einer kurzen Beschreibung der regionalen Klimamodellierung mit dem Regionalmodell REMO werden beispielhaft Ergebnisse von hochauflösenden Projektionen für Deutschland vorgestellt.

2. Regionale Klimamodellierung mit REMO

Klimamodelle können als mathematische Abbilder des Erdsystems gesehen werden, da sie die physikalischen Prozesse im Erdsystem numerisch beschreiben und so real wie möglich berechnen. Um die Güte der Klimamodelle einschätzen zu können, werden sie zunächst für die Berechnung vergangener Zeiten eingesetzt. Die Statistiken verschiedener simulierter Variablen, wie z.B. der Temperatur oder des Niederschlags, werden anschließend mit Beobachtungen verglichen. Es sollen nicht wie bei der Wettervorhersage einzelne Wetterereignisse möglichst genau wiedergegeben werden, vielmehr geht es bei der Klimamodellierung darum, die Statistik der Wetterzustände über Zeiträume von mehreren Jahren bis Dekaden zu reproduzieren (bzw. in die Zukunft zu projizieren). Bevorzugt wird hierzu eine Zeitperiode gewählt, für die zahlreiche Beobachtungen weltweit vorliegen.

Kann das Modell das Klima des Zeitraums in der Vergangenheit – den sogenannten Validierungszeitraum – mit hinreichender Genauigkeit reproduzieren, ist es möglich, Projektionen für die Zukunft zu berechnen. Hierzu müssen einige Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen verschiedener Parameter, wie z.B. der anthropogenen Treibhausgasemissionen, gemacht werden. Diese sogenannten Klimaszenarien werden im Folgenden noch erläutert.

Sollen nun Aussagen über mögliche regionale oder lokale Klimaänderungen und ihre Auswirkungen gemacht werden, so muss die Brücke zwischen der globalen Klimaänderungsberechnung und den Auswirkungen auf die Region geschlagen werden. Hierzu werden regionale Klimamodelle mit viel Detailinformation aus der Region und ihrer Umgebung in die globalen Modelle eingebettet. Wie mit einer Lupe kann dann das Klima der Region im Detail untersucht werden.

Da das Klima in den Modellen auf einem begrenzten Gebiet berechnet wird, für dessen Entwicklung aber auch Zustände der Atmosphäre außerhalb des Modell-

gebiets wichtig sind, müssen diese Einflüsse berücksichtigt werden. Nimmt man beispielsweise als Modellgebiet Europa an, sind die Tiefdruckgebiete, die über dem Nordatlantik, also außerhalb des Modellgebiets entstehen, von entscheidender Bedeutung für das Klima in Europa. Um diese Einflüsse zu berücksichtigen, benutzen Regionalmodelle einen randlichen Antrieb aus Globalmodellen oder aus Analysen/Reanalysen (die auf Beobachtungen basieren). Am Rand des Modellgebiets werden meteorologische Größen des Globalmodells vorgeschrieben und so der begrenzten, aber dafür hochaufgelösten Domäne des Regionalmodells aufgeprägt. Im Fall des dreidimensionalen hydrostatischen atmosphärischen Zirkulationsmodells REMO (Jacob, 2001; Jacob et al., 2007) sind dies Temperatur, Bodendruck, zonale und meridionale Windkomponente, spezifische Feuchte, Wolkenwasser und die Meeresoberflächentemperatur. Durch die hohe horizontale Auflösung von bis zu 10 km Gitterboxlänge (im Gegensatz zu einer Gitterboxlänge von 100 km und mehr in Globalmodellen) können mesoskalige Phänomene aufgelöst und die Orographie sowie die Oberflächenbeschaffenheit und die Landnutzung wesentlich genauer repräsentiert werden, was wiederum Einfluss auf die Abbildung der Prozesse der unteren Troposphäre hat.

Die von REMO berechneten prognostischen atmosphärischen Variablen sind die horizontalen Windkomponenten, Bodendruck, Temperatur, spezifische Feuchte, Wolkenwasser und Wolkeneis. Des Weiteren werden diagnostische Größen wie z.B. der Niederschlag oder der Wolkenbedeckungsgrad berechnet. Die Ausgabe der Werte erfolgt standardmäßig stündlich (2d-Felder) oder 6-stündlich (3d-Felder).

3. Regionale Klimaszenarien in Deutschland

Die bis heute neueste Serie von IPCC- Szenarien (Hauptszenarien A1, B1, A2, B2) folgt abgestimmten möglichen Entwicklungslinien, so genannten *Storylines*, die unterschiedlichen Entwicklungen der Weltwirtschaft, des Bevölkerungswachstums und anderer Faktoren folgen (Nakicenovic, 2000). Die zugehörigen Emissionsentwicklungen für CO₂ und SO₂ von 2000 bis 2100 unterscheiden sich in ihrer Stärke ebenso wie in ihrem zeitlichen Verlauf. Diese Emissionen werden in die globalen und regionalen Klimamodelle eingespeist und bewirken durch zahlreiche nicht-lineare Wechselwirkungen Veränderungen des globalen und regionalen Klimas. Im Auftrag

des Umweltbundesamtes (UBA) hat das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) Szenarien für mögliche Klimaänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2100 erarbeitet. Es wurde darin vom Deutschen Klimarechenzentrum Hamburg unterstützt. Das hierfür eingesetzte regionale Klimamodell REMO zeigt die Klimaentwicklung des vergangenen Jahrhunderts recht realitätsnah, wie der Vergleich zu Beobachtungen – auch in stark strukturiertem Gelände wie den Alpen (Frei et al., 2003) – ergibt. Diese Überprüfung ist notwendig, um die Güte der Modellergebnisse zu bewerten. Die Klimasimulationen mit REMO wurden mit einer räumlichen Auflösung von 10 km durchgeführt. Hierbei liefern diese Simulationen Erkenntnisse, die es bislang noch nicht in dieser Detailliertheit gab.

4. Zukünftiges Klima

Bis zum Jahre 2100 wurden mit REMO Simulationen für die drei Szenarien B1, A1B und A2 durchgeführt, die grob als Szenarien mit eher niedrigen, mittleren und hohen Emissionsraten kategorisiert werden können. Die Ergebnisse dieser Klimasimulationen lassen sich auf folgende Aussage verdichten: Je nach Anstieg der Treibhausgase könnten bis zum Ende des Jahrhunderts die Temperaturen in Deutschland – vor allem im Süden und Südosten – um mehr als 4°C im Vergleich zu den letzten 50 Jahren steigen. Im Sommer kann es in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge geben. Im Winter könnten im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen, wobei allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee fallen kann.

Die Ergebnisse im Detail: Mehr Treibhausgase führen in Deutschland zu einer mittleren Erwärmung, die im Jahr 2100 – abhängig von der Höhe zukünftiger Treibhausgasemissionen – zwischen 2,5°C und 3,5°C liegt (*Abbildung 2*). Diese Erwärmung wird sich saisonal und regional unterschiedlich stark ausprägen. Am stärksten dürften sich der Süden und Südosten Deutschlands im Winter erwärmen. Bis zum Jahr 2100 könnten die Winter hier um mehr als 4°C wärmer werden als im Zeitraum von 1961 bis 1990. Gleichzeitig könnten in Zukunft – im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 – die sommerlichen Niederschläge großflächig abnehmen (*Abbildung 3*). Besonders stark gehen in den Simulationen die Sommerniederschläge in Süd- und Südwestdeutschland sowie in Nordostdeutschland zurück.

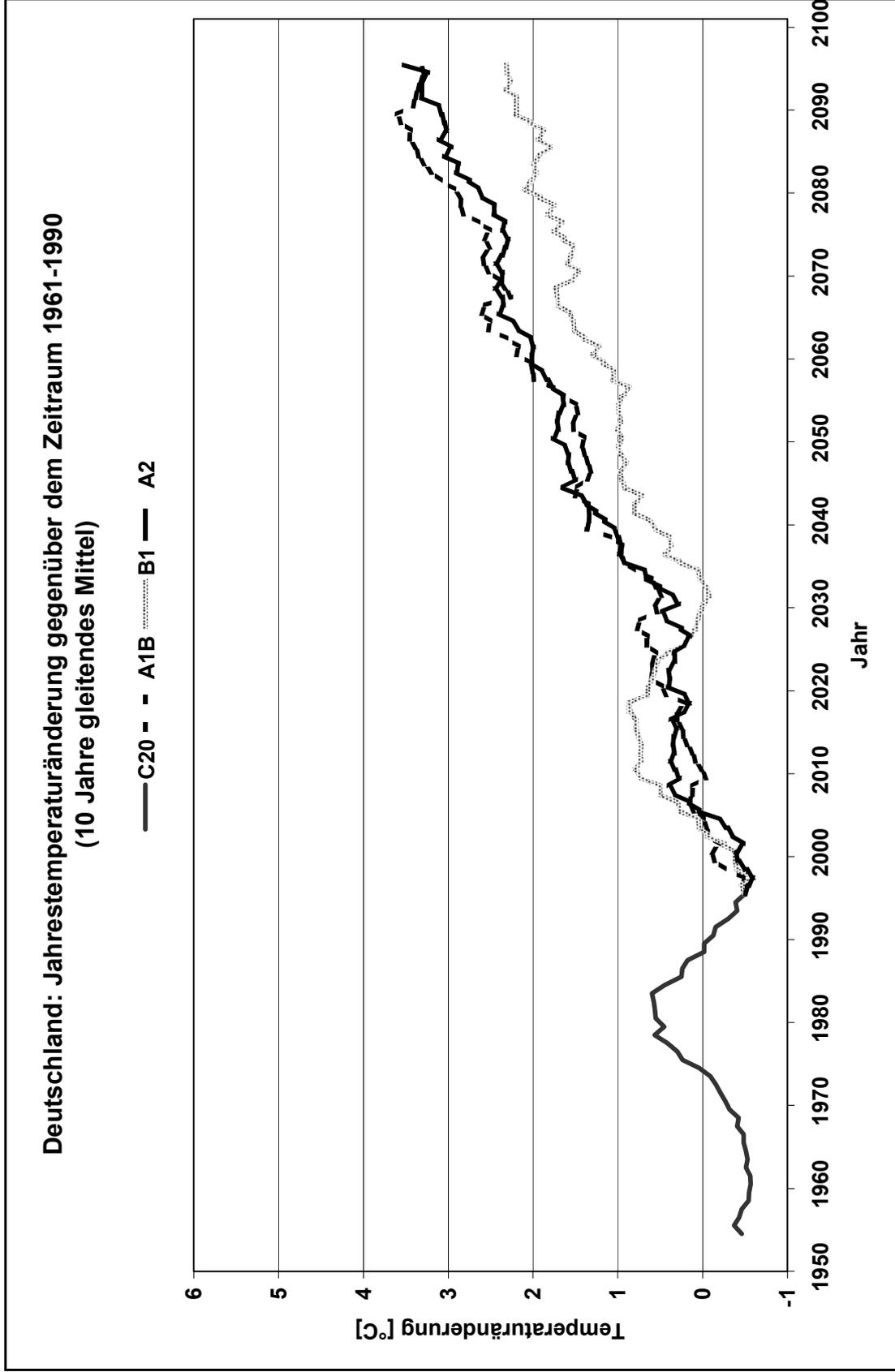


Abbildung 2: mittlere Jahrestemperaturänderungen zur Klimanormalperiode 1961-1990 in Deutschland als gleitendes 10-Jahresmittel.

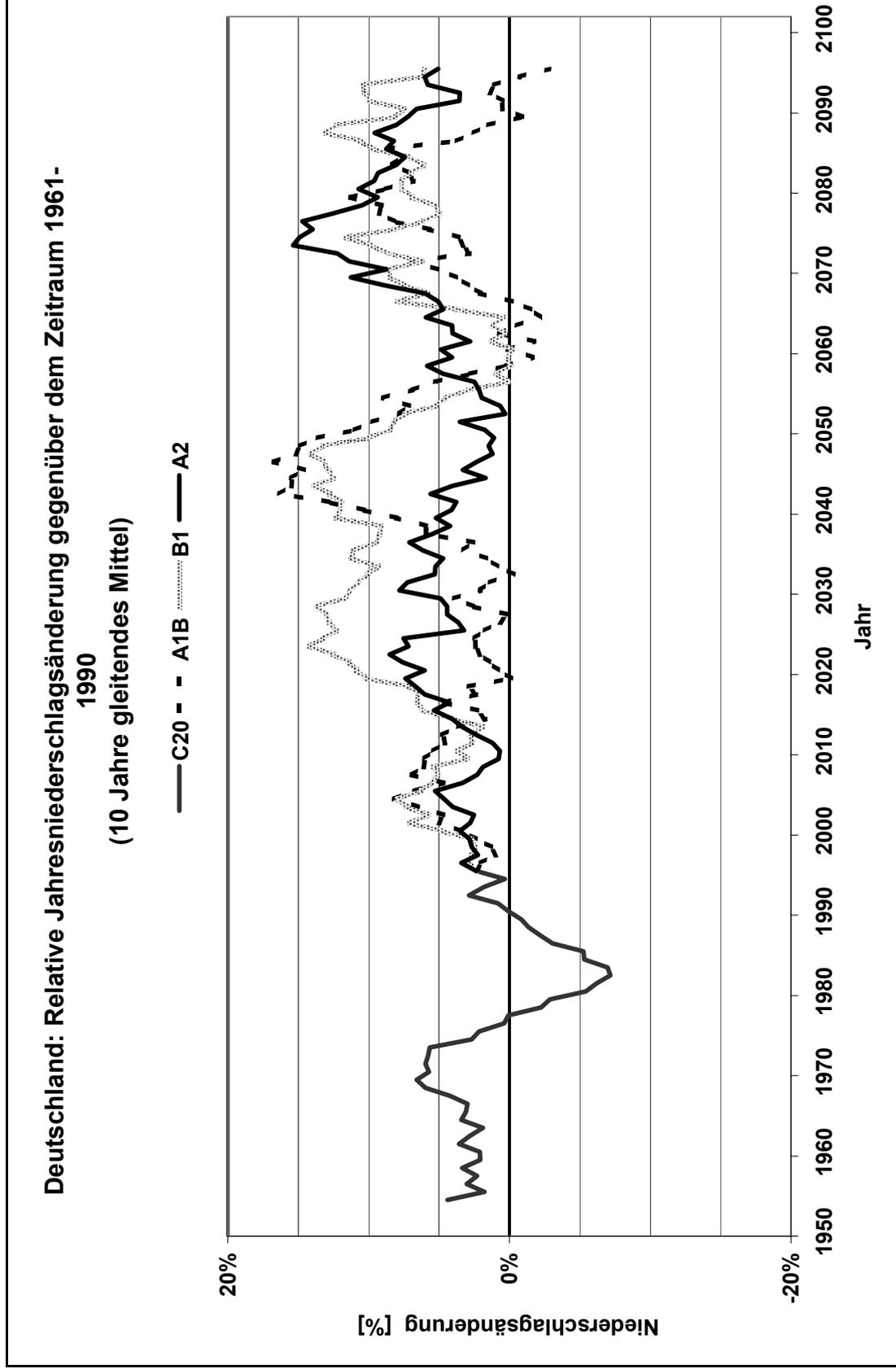


Abbildung 3: mittlere relative Niederschlagsänderungen zur Klimanormalperiode 1961-1990 in Deutschland als gleitendes 10-Jahresmittel.

In *Abbildung 4* sieht man die relative Änderung der Niederschlagsmenge zwischen den Zeiträumen 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100 für das A1B-Szenario für Sommer und Winter.

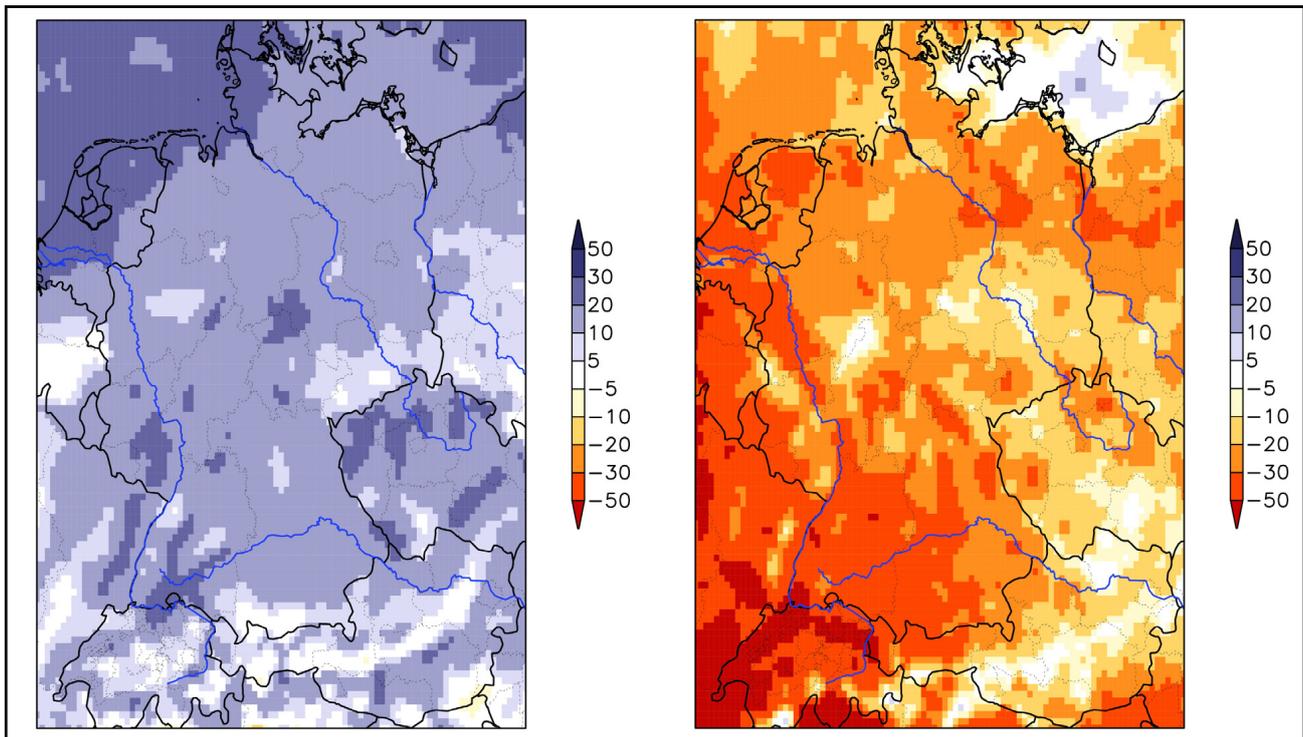


Abbildung 4: Relative Niederschlagsänderungen (A1B) [%] Winter (links) und Sommer (rechts) 2071/2100-1961/1990.

Hier könnte es bis zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute ein Minus von bis zu 30 % bei den Sommerniederschlägen geben. Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden. Vor allem in den Mittelgebirgen Süd- und Südwestdeutschlands ist über ein Drittel mehr Niederschlag zu erwarten als heute. Aufgrund gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Alpen – bis zum Ende des Jahrhunderts könnten es mehr als 4°C sein – wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen (*Abbildung 5*). Fiel in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dort im Jahr etwa ein Drittel des Gesamtniederschlags als Schnee, könnte es bis Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel sein. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Zahl der Tage mit mehr als 3 cm Schneehöhe pro Jahr reduzieren, und zwar stärker in niedrigen Regionen wie z.B. Garmisch-Partenkirchen und Mittenwald, für die eine Abnahme der Zahl der Schneetage um deutlich mehr als die Hälfte möglich sein können. In den höheren Regionen wie Zermatt und St. Moritz wird jedoch nur eine Reduktion um ca. ein Drittel berechnet.

Alpen: Schneeanteil am Gesamtniederschlag
(10 Jahre gleitendes Mittel)

— C20 - A1B B1 — A2

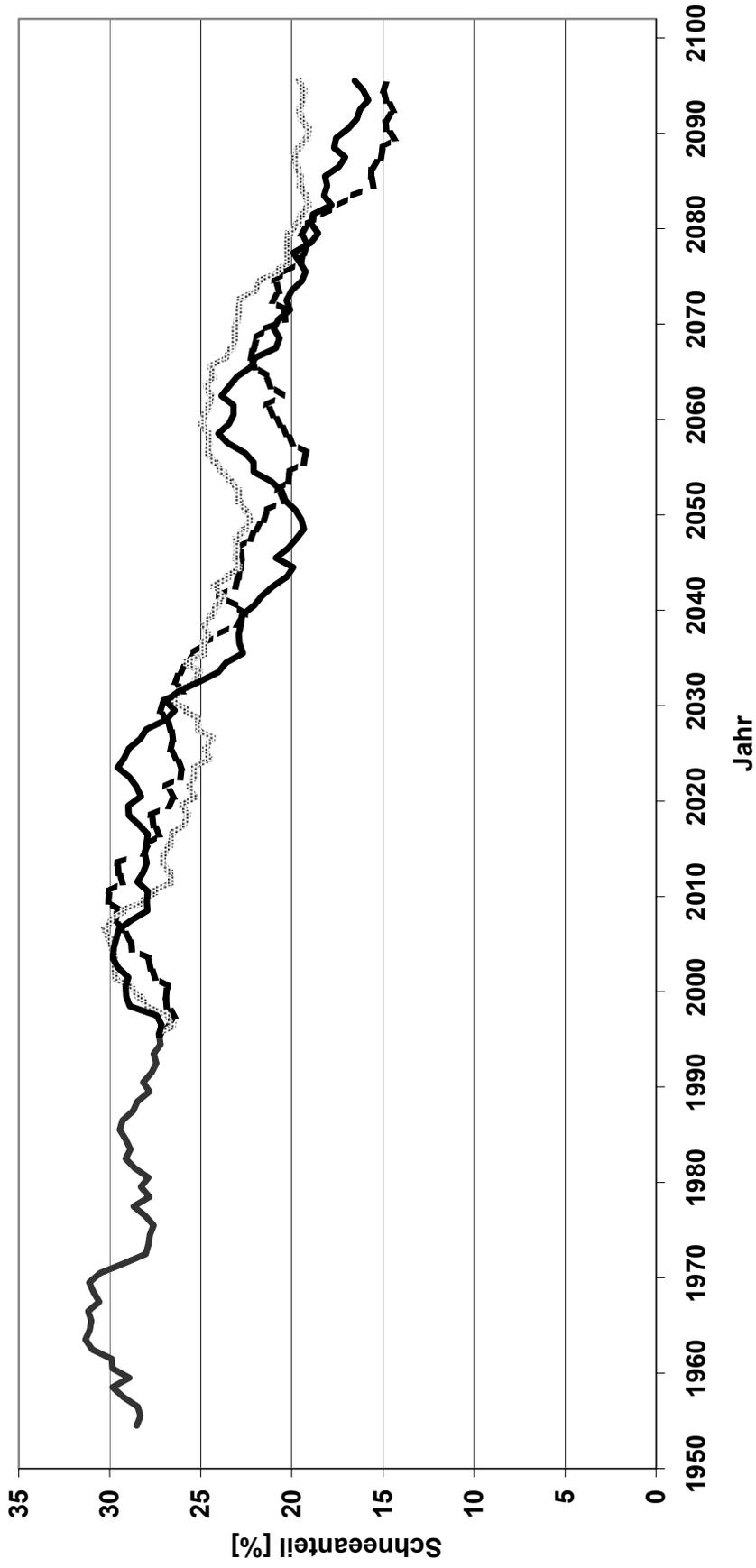


Abbildung 5: Mittlerer Schneeanteil am Jahresniederschlag in Deutschland als gleitendes 10-Jahresmittel.

Bis zum Ende 2100 könnten jedoch die schneebedeckten Flächen im Alpenraum sehr stark schrumpfen, wenn die Erwärmung stark zunimmt ($> 4^{\circ}\text{C}$). Doch auch schon bei einer Temperaturzunahme von 3°C verschwinden sehr große schneebedeckte Flächen, die heute noch als schneesicher gelten (*Abbildung 6*). Blickt man zum deutschen Küstenraum, so fällt auf, dass bis zum Jahr 2100 die Erwärmung der Ostseeküste mit $2,8^{\circ}\text{C}$ etwas stärker sein könnte als die der Nordseeküste ($2,5^{\circ}\text{C}$). Obwohl sich an beiden Küsten die jährliche Niederschlagsmenge nicht ändert, kann es im Sommer bis zu 25 % weniger regnen. Im Winter gibt es jedoch bis zu 30 % mehr Niederschlag.

Diese schnellen und tiefgreifenden Veränderungen des Klimas in Deutschland können gravierende Folgen für die Menschen und die Umwelt haben. Die Schadenspotentiale extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge und Stürme sind oftmals noch wesentlich größer als jene der schleichenden Klimaänderungen. Deswegen sind zurzeit am MPI-M detaillierte Analysen der Klimaszenarien in Arbeit, um Aussagen zur Häufigkeit und Stärke künftiger Extremereignisse machen zu können. *Abbildung 7* zeigt hierzu eine zu erwartende Veränderung der Anzahl an Sommertagperioden (zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur $> 25^{\circ}\text{C}$) für das SRES B2 Emissionsszenario für drei europäische Einzugsgebiete (Nordeuropa: Luleaelven, Mitteleuropa: Rhein, Südeuropa: Ebro). Hiernach ist in allen Gebieten für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 mit einer deutlichen Häufigkeitszunahme insbesondere der langen Perioden zu rechnen. Im Einzugsgebiet des Luleaelven steigt die Häufigkeit von Perioden der Längen 3-10 Tage (11-20 Tage) von 2 auf 10 (von 0 auf 1) Ereignisse pro 30 Jahre. Sommertagperioden mit einer Länge von mehr als 20 Tagen treten im „kalten“ Skandinavien auch im Klimaszenario nicht auf. Anders verhält es sich im Rhein- und Ebroeinzugsgebiet. Am Rhein zeigen sich im Klimaszenario Periodenlängen > 40 Tage. Derartige lange und heiße Zeiträume treten im berechneten Kontrollklima, das die heutigen klimatischen Bedingungen repräsentiert, nicht auf. Auch im Ebroeinzugsgebiet steigt die Anzahl langer, heißer Perioden mit Längen > 51 Tage deutlich von 17 auf 26 Ereignisse pro 30 Jahre. Hier muss in der Zukunft also fast jedes Jahr mit langen Hitzeperioden gerechnet werden.

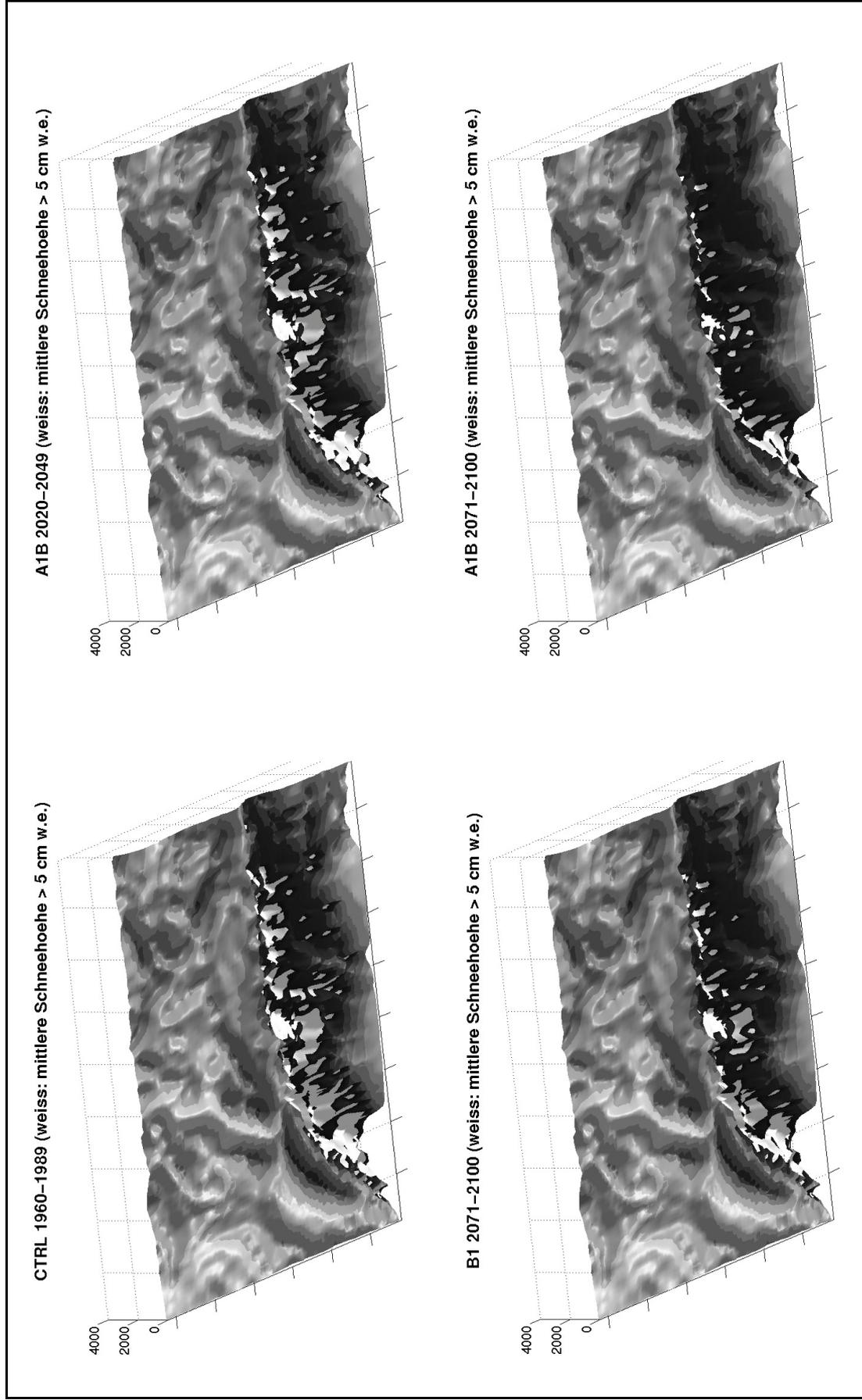


Abbildung 6: Mittlere Schneehöhen als 30-jährige Mittel für den Kontrollzeitraum, das A1B und das B1 – Szenario.