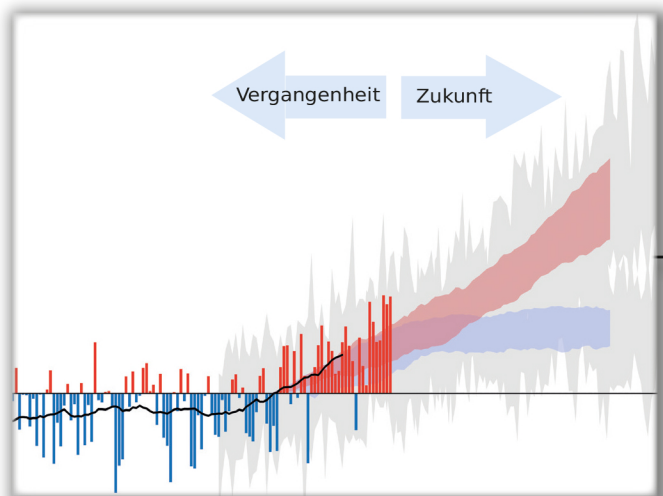
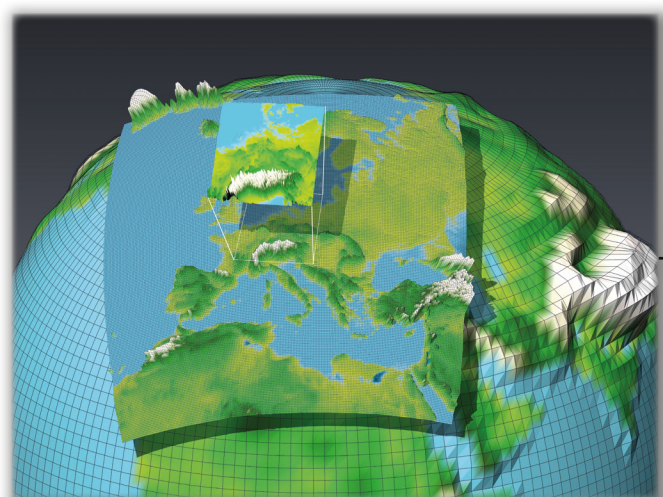


Heft 104 (2021) 18,90 Euro

promet

meteorologische fortbildung

Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleitung

Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann (Offenbach/M.)

Redaktionsausschuss

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach/M.)

Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)

PD Dr. F. Berger (Lindenberg)

Prof. Dr. C. Bernhofer (Dresden)

Prof. Dr. G. Craig (München)

Prof. Dr. G. Groß (Hannover)

Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)

Dr. M. Olefs (Wien)

Dr. C. Plaß-Dülmer (Hohenpeißenberg)

Dr. M. Sprenger (Zürich)

Layout und Satz

Oda Thiessen-Thom, Susanne Schorlemmer

Mitarbeit

Heike Beck

Titelseite

Links: Schematische Darstellung des „Nesting-Verfahrens“ (© DKRZ) | Jahresmitteltemperaturen in Deutschland von 1910 bis 2020 als Abweichungen vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1971–2000 sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100 (rot: „Weiter-wie-bisher-Szenario“ RCP8.5, blau: „Klimaschutz-Szenario“ RCP2.6; grau: Unsicherheitsbereich der Modellrechnungen; © DWD)

Rechts: Waldschäden am Brocken im Harz (Rüdiger Manig/DWD, 2019) | Ausgetrockneter Boden im Schwarzatal, Thüringen (Rüdiger Manig/DWD, 2018) | Hochwasser am Niederrhein (Noverodus/Pixabay, 2021)

Verlag

Deutscher Wetterdienst, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Am DFS-Campus 4, 63225 Langen selbstverlag@dwd.de

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten. Die ein Jahr später erscheinende Online-Ausgabe steht unter der Creative Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 3.0.



Druck

Heyne-Druck GmbH, Ferdinand-Porsche-Str. 15, 63073 Offenbach/M.

Auflage: 3 600

Preis des Heftes: 18,90 € plus Versandkosten

Redaktionsschluss: 28.04.2021

ISSN: 0340-4552 (print) | 2194-5950 (online)

ISBN: 978-3-88148-527-2 (print) | 978-3-88148-526-5 (online)

DOI: 10.5676/DWD_pub/promet_104

<https://www.dwd.de/promet>

Alle Informationen zu *promet* im Internet ▶



Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

im Jahre 1971 wurde nicht nur die erste E-Mail verschickt und der erste Mensch mittels Computertomografie untersucht – nein, in jenem Jahr lief auch die erste Ausgabe von *promet* durch die Druckerpresse. Seit nunmehr 50 Jahren kann *promet* dabei für sich in Anspruch nehmen, die erste und einzige meteorologische Zeitschrift mit Fortbildungscharakter im deutschsprachigen Raum zu sein – und das bei einer wahrlich zunehmenden Publikationsflut in den letzten Jahrzehnten! Genau darin liegt aber auch ein Ziel von *promet* begründet: Bei der Masse an wissenschaftlichen Erkenntnissen einen Überblick zu verschaffen über den aktuellen Wissensstand zu einem bestimmten Thema.

Mit „Anwendungen regionaler Klimamodellierung“ ist das Thema dieser Ausgabe ein sehr praxisnahes – und was würde sich da besser anbieten, als Experten aus verschiedenen Bereichen mit unterschiedlichen Blickwinkeln zu Wort kommen zu lassen?! Sie nehmen uns mit in Wasser-, Forst- und Landwirtschaft, in die Alpen und zu normativen Festlegungen (um nur Beispiele zu nennen) und zeigen, wie sie Modelldaten des zukünftigen Klimas nutzen.

Auch die beiden letzten *promet*-Schriftleiter und der DWD-Präsident nehmen uns für dieses „Jubiläumshft“ auf eine kurzweilige (Zeit-)Reise mit – bis hin zu den Anfängen im Jahr 1971. Da darf natürlich auch eine Übersicht aller bisher erschienenen Themenhefte nicht fehlen (ab S. 117).

Ich fühle mich geehrt, zusammen mit dem Redaktionsausschuss in den nächsten Jahren viele weitere *promet*-Hefte auf den Weg bringen zu dürfen und hoffe, Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, damit immer wieder neue Überblicke (und hoffentlich auch Durchblicke...) zu ermöglichen.

Auf die nächsten 50 Jahre *promet*!

Ihre Magdalena Bertelmann
Schriftleiterin *promet*



Inhalt

promet – Meteorologische Fortbildung, Heft 104 (2021)

Thema des Heftes: **Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen**

Fachliche Redaktion: Dr. Frank Kreienkamp (DWD Potsdam)

PD Dr. Heike Hübener (HLNUG Wiesbaden)

Fachliche Durchsicht: Prof. Dr. Ina Tegen (TROPOS Leipzig)

Beitrag	Seite
F. KREIENKAMP, H. HÜBENER Vorwort „Zu diesem Heft“	3
Nomenklatur der Abkürzungen für Modelldatensätze	4
F. KREIENKAMP, H. HÜBENER 1 Aspekte der Nutzung von regionalen Klimaprojektionsdatensätzen	5-8
CH. ZIER, F. BÄSE, H. KOMISCHKE 2 Ein Verfahren zur Plausibilisierung und Bewertung regionaler Klimaprojektionen	9-18
M. HALLER, S. KRÄHENMANN, A. WALTER 3 Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten	19-25
C. DALELANE 4 Die DWD-Referenz-Ensembles und die DWD-Kern-Ensembles	27-29
U. GELHARDT, F. KITTLER, J. LANG, L. GRÜNHAGE, M. BAUMGARTEN 5 Erstellung von Testreferenzjahren für phytotoxische Klimakammerexperimente	31-36
S. HETTRICH et al. 6 MiKlip – von einem wissenschaftlichen Konzept zu einem prä-operationellen System für dekadische Klimavorhersagen	37-46
J. SUTMÖLLER, E. SCHÖNFELDER, H. MEESENBURG 7 Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft	47-53
M. HERBST, E. FALGE, C. FRÜHAUF 8 Regionale Klimamodellierung – Perspektive Landwirtschaft	54-61
E. NILSON 9 Vier Probleme bei der Umsetzung von „Klimawissen“ in die Praxis – Überlegungen zum Aufbau von Klimaprojektionsdiensten aus der Perspektive einer gewässerkundlichen Bundeseinrichtung	62-69
A. WALTER, C. HAßE, W. MEISTER 10 Klimawandel und Normen	70-74

C. LINKE	
11	Nutzung von regionalen Klimamodellierungen in Landesumweltämtern 75-80
I. SCHAUSER, K. SANDER	
12	Regionale Klimamodellierung – Bedeutung für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel 81-84
T. GEIGER	
13	Regionale Klimamodellierung zur Abschätzung sozioökonomischer Klimafolgen 85-94
S. KOTLARSKI, A. M. FISCHER, A. M. HAMA, A. BURGSTALL	
14	Nationale Klimaszenarien und ihre Anwendung: Die Schweiz 95-101
CH. MATULLA, K. ENIGL, S. LEHNER	
15	Regionale Klima- und Impaktmodellierung – Beispiele mit Fokus auf dem Alpenraum ... 102-109
	Abkürzungen 110-113
	50 Jahre <i>promet</i> 119-123

Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen

Zu diesem Heft

Mit dem promet-Heft 99 wurden Methoden zur Regionalisierung von globalen Klimaprojektionsdaten vorgestellt. Das hier vorliegende Heft baut darauf auf. Klimaprojektionsdaten werden inzwischen zunehmend zur Analyse von möglichen Klimaänderungen und damit verbundenen Anpassungsmaßnahmen genutzt. Oftmals ergeben sich aber Probleme, da die Projektionsdaten nicht in der Form vorliegen, die von den Anwendern gewünscht wird oder bisherige Entscheidungsprozesse auf anderen Datengrundlagen beruhen. In insgesamt 15 Beiträgen beschreibt dieses promet-Heft eine Vielzahl an Aspekten, die die Nutzung der Datensätze betreffen.

Trotz aller Mängel sind Klimamodelldaten nach wie vor unsere einzige Möglichkeit, die Klimaänderungen der Zukunft abzuschätzen und uns auf deren Folgen vorzubereiten. Um dies bestmöglich zu erreichen, müssen wir die Schwächen der Modelle kennen, wo machbar möglichst minimieren oder ausgleichen und unsere Analysemethoden so weiterentwickeln, dass sie trotz der bekannten Schwächen aus den vorhandenen Daten bestmöglich nutzbare Informationen destillieren. Wir alle – sowohl Klimamodelliererinnen und Klimamodellierer als auch Anwender und Anwenderinnen der Modellergebnisse – müssen hinzulernen und unsere Methoden und Produkte weiterentwickeln. Je mehr wir dabei voneinander lernen, desto besser für uns alle.

Für das Heft konnten Wissenschaftler und Behördenmitarbeiter gewonnen werden, die drei wesentliche Nutzergruppen repräsentieren. Das sind die Gruppen: Klimadaten- und Informationsbereitsteller im Allgemeinen, Nutzer von Klimadaten im Rahmen der Wirkmodellmodellierung und Nutzer von Klimadaten für gesellschaftliche Prozesse wie Normung und Gesetzgebung.

Eine adäquate Nutzung der Klimaprojektionsdaten ist eine zentrale Voraussetzung für wissenschaftsbasierte Entscheidungen. Das vorliegende promet-Heft stellt Beispiele für solche Nutzungen vor. Es ist wahrscheinlich, dass Sie bei Ihrer Arbeit nicht genau identische Vorgehensweisen nutzen können. Wir hoffen trotzdem, dass die gewählten Beispiele Ihnen eine Hilfestellung bei Ihrer Arbeit geben können.

Und damit wünschen wir Ihnen viel Spaß, Erkenntnisse und Anregungen bei der Lektüre dieses Heftes.

Frank Kreienkamp und Heike Hübener

Nomenklatur der Abkürzungen für Modelldatensätze

Zur Vereinfachung der Lesbarkeit wird in allen Beiträgen die gleiche Nomenklatur für die Abkürzungen der Modelldatensätze genutzt. Diese Nomenklatur basiert auf der im ReKliEs-De Projekt entwickelten Nomenklatur¹. Die Benennung der Modelle folgt der im *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5)² bzw. *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX)³ genutzten Schreibweise.

Die Bezeichnung benötigt drei Zeichengruppen: **<gm>** für das Globalmodell, **<rm>** für das Regionalmodell und **<sz>** für das Szenario. Daraus ergibt sich folgende Nomenklatur: **<gm>_<rm>_<sz>**.

Dabei ist zu beachten: Manche Modell-Kombinationen enthalten implizite, nicht in der Kurzform dargestellte Informationen. Dies umfasst

- den Versionsnamen von WRF,
- den Versionsnamen von REMO,
- die neu aufgesetzte Versionsnummer 2 von RACMO in der Kombination HG2 + RACMO und die neu aufgesetzte Versionsnummer 1a von RCA4 in der Kombination MPIESM + RCA4.

GCM-Name (<i>General Circulation Model</i>)	Abkürzung (<gm>)
CCCMa-CanESM2	CA2
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CM5
IPSL-IPSL-CM5A-MR	IP5
ICHEC-EC-EARTH (Läufe 1, 3 und 12)	E01, E03, E12
MOHC-HadGEM2-ES	HG2
MIROC-MIROC5	MI5
MPI-M-MPI-ESM-LR (Läufe 1 und 2)	MP1, MP2

RCM-Name (<i>Regional Climate Model</i>)	Abkürzung (<rm>)
CCLM 4-8-17	CLM
DMI-HIRHAM5	HIR
KNMI-RACMO22E	RAC
SMHI-RCA4	RCA
REMO ⁴	REM
STARS3	ST3
WETTREG2013	W13
IPSL-INERIS-WRF ⁵	WRF

Langname Szenario	Abkürzung (<sz>)
RCP2.6	R26
RCP8.5	R85
historical	HIS

Beispielname:

CA2_CLM_R85

¹ https://swift.dkrz.de/v1/dkrz_a88e3fa5289d4987b4d3b1530c9feb13/ReKliEs-De/Supplement/Info/ReKliEs_Modellliste.pdf

² CMIP5-Webseite: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

³ CORDEX-Webseite: <https://cordex.org/>

⁴ Es werden unterschiedliche Versionen von REMO in ReKliEs-De und CORDEX eingesetzt.

⁵ Es werden unterschiedliche Versionen von WRF in ReKliEs-De und CORDEX eingesetzt.

F. KREIENKAMP, H. HÜBENER

1 Aspekte der Nutzung von regionalen Klimaprojektionsdatensätzen

Aspects of the use of regional climate projection data sets

Zusammenfassung

Die Nutzung von Klimaprojektionsdaten ist eine Herausforderung für alle. Der vorliegende Beitrag stellt eine Einführung in die Thematik dar und soll bei dem Verständnis des vorliegenden *promet*-Heftes *Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen* helfen. Benannt werden die grundsätzlichen Eigenschaften von regionalen Klimaprojektionsdatensätzen und Aspekte der Nutzung. Auf eine detaillierte Beschreibung von Lösungen wird verzichtet und wo möglich auf andere Artikel verwiesen.

Summary

The use of climate projection data is a challenge for everyone. The present article is an introduction to the topic and is meant to help understanding this *promet* edition *Regional Climate Modelling II – Applications*. The basic characteristics of regional climate projection data sets and aspects of their use are described. A detailed description of solutions is not intended and where possible reference is made to other articles.

1 Motivation

Klimaprojektionsdaten werden inzwischen zunehmend zur Analyse von möglichen Klimafolgen und Anpassungsmaßnahmen genutzt. Die nutzerspezifischen Anforderungen sind sehr divers und im Wesentlichen von der Zielstellung der Nutzer*innen geprägt. Damit basierend auf Klimaprojektionsdatensätzen eine Arbeit möglich ist, muss im ersten Schritt eine grundlegende Wissensbasis vorhanden sein.

Oftmals ergeben sich aber Probleme schon dadurch, dass die Projektionsdaten nicht in der Form vorliegen, wie sie die Nutzenden gewohnt sind. Die Gründe dafür sind vielfältig:

- Klimamodelldaten sind keine Beobachtungsdaten. Sie haben oft systematische Abweichungen („Bias“) von Beobachtungsdaten und zeigen im Allgemeinen auch statistisch andere Eigenschaften (z.B. weniger Extremereignisse).
- Klimamodelldaten liegen oft als Gitterdaten vor, das heißt sie zeigen nicht Informationen für einen einzelnen Punkt, sondern für eine Fläche (z.B. 12 km x 12 km groß).
- Bei statistischen Regionalisierungsverfahren liegen zwar teilweise Punktdaten vor, jedoch nur an den Stationsorten. Dazwischen muss interpoliert werden.
- Ein Modell kann im besten Fall die mittleren Eigenschaften des Klimas darstellen (das heißt Anzahl von heißen oder kühlen Sommern über eine Periode von 30 Jahren), nicht aber eine konkrete Abfolge in der Vergangenheit reproduzieren.
- Um die Schwächen einzelner Klimamodelle auszugleichen, werden üblicherweise möglichst viele verschiedene Klimamodelle analysiert (sogenannte Ensemble). Daraus ergeben sich Bandbreiten von Änderungen der meteorologischen Größen, nicht exakte Werte.
- Es gibt immer mehr Klimamodellsimulationen. Die schiere Menge an Modelldatensätzen ist mitunter für die Wirkungsforschung nicht mehr bearbeitbar.
- Es gibt verschiedene Szenarien, die unterschiedliche zukünftige Entwicklungspfade beschreiben.

All diese Faktoren führen dazu, dass die Verwendung von Klimamodelldaten in der Klimafolgenforschung und Politikberatung schwierig ist. Dazu zählen nicht nur die rein technischen Aspekte, sondern häufig auch konzeptionelle. Insbesondere dieser Aspekt wurde in den letzten Jahren

durch das Bund-Länder-Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimaprojektionen“ bearbeitet. Diese Arbeiten sind in einer frei verfügbaren Publikation *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten* dokumentiert (siehe LINKE et al. 2020 und KREIENKAMP et al. 2012).

Die Klimamodellierung muss sich der Tatsache stellen, dass die Modelldaten derzeit meist noch nicht hinreichend räumlich und zeitlich aufgelöst und mit systematischen Fehlern behaftet sind, die eine einfache Nutzung in der Klimafolgenforschung oder Politikberatung be- oder verhindern. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen.

2 Nutzungsformen

Rössler et al. (2017) beschreiben drei Hauptgruppen von Nutzer*innen. Das sind:

1. Bereitsteller*innen von Klimadaten und -information im Allgemeinen (Klimatologen),
2. Nutzer*innen von Klimadaten im Rahmen der Wirkmodellmodellierung (Wirkmodellierer) und
3. Nutzer*innen von Klimadaten für gesellschaftliche Prozesse wie Normung und Gesetzgebung (Gesellschaftliche Nutzer)

Innerhalb dieser Gruppen wird noch zwischen Akteuren erster und zweiter Ordnung unterschieden. Die erste Gruppe hat direkte Kontakte zu Klimamodellierer*innen und ist auch als Transporteur von Wissen einzuordnen. Dahingegen hat die zweite Gruppe eher Kontakte in Richtung Öffentlichkeit.

In diesem Heft haben wir Erfahrungen und Herangehensweisen von insbesondere der ersten Gruppe zusammengestellt, mit denen wir weitere Anwender*innen der Klimamodelldaten unterstützen wollen. Wir hoffen, vorhandene Sprachbarrieren zu überwinden, indem die Texte von Nutzer*innen und nicht von Modellierer*innen verfasst wurden und damit anwendungsbezogener sind.

3 Klimatologische Aspekte innerhalb der Klimaprojektionsdaten

Die Eigenschaften der Klimaprojektionsdatensätze unterscheiden sich von den klassischen Beobachtungsdatensätzen. Wirkmodelle benötigen Datensätze, die sehr ähnlich zu denen sind mit denen sie trainiert wurden, um belastbare Analysen durchzuführen. Daher ist es notwendig, die Datensätze vor einer Nutzung zu analysieren. Zier et al. beschreiben im **Beitrag 2**, wie und mit welchem Ergebnis die Klimamodellergebnisse für Untersuchungen in Bayern auf ihre Plausibilität geprüft wurden. Daraus ergab sich eine Auswahl von Modellsimulationen, die als ausreichend passend angesehen werden können.

Nicht alle Wirkmodelle sind in der Lage, Datensätze mit einem systematischen Bias zu verarbeiten. Dieser Bias ist

je nach Modell unterschiedlich stark ausgeprägt. Haller et al. stellen im **Beitrag 3** eine Methode zur Reduktion systematischer Abweichungen vor. Diese kann die individuellen Abweichungen deutlich reduzieren. Eine solche Bias-Adjustierung kann aber nur einige grundlegende Abweichungen entfernen. Mit der Methode wurden bereits viele der aktuell zur Verwendung vorliegenden Daten bearbeitet. Die Datensätze können beim Deutschen Wetterdienst abgerufen werden.

Die Anzahl der verfügbaren Datensätze steigt stetig. Dalelane beschreibt im **Beitrag 4** zwei Aspekte des Umganges mit einer stetig steigenden Anzahl an verfügbaren Modellläufen. Zentral ist dabei die Definition von Momentaufnahmen als Referenzdatensätze. Hier wird ein „Referenz-Ensemble“ festgelegt, das für einen möglichst langen Zeitraum von den Nutzer*innen für ihre Analyse eingesetzt werden soll. Somit basieren diese Analysen auf vergleichbaren Grundlagen. Da mittlerweile eine Vielzahl an Datensätzen vorliegt, steigt die Zahl der Nutzergruppen, die nicht mehr alle Datensätze verarbeiten können. Dalelane beschreibt in ihrem Text eine Selektionsmethode, um die Anzahl der zu analysierenden Läufe zu reduzieren und trotzdem die Kernaussagen des gesamten Referenz-Ensembles bestmöglich zu erhalten. Wir empfehlen, trotzdem möglichst immer das Referenz-Ensemble auszuwerten, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass im „Kern-Ensemble“ relevante Informationen für manche Auswirkungen nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. Ist die Verwendung des Referenz-Ensembles jedoch nicht möglich, dann sollte möglichst das hier definierte Kern-Ensemble verwendet werden.

Gelhardt et al. erläutern im **Beitrag 5** eine Methode, aus den Klimaprojektionsdaten Steuerungsvorgaben für sogenannte Klimakammerversuche zu bestimmen. Die in dem Beitrag beschriebene Methodik kann für andere Forschungsfragen angewendet werden, bei denen charakteristische Wetterepisoden oder -eigenschaften für ein zu untersuchendes Wirksystem aus Klimaprojektionsdaten extrahiert werden müssen.

Ergänzend stellen Hettrich et al. im **Beitrag 6** Ergebnisse des BMBF-Forschungsprojektes zur **Mittelfristigen Klimaprognose** (Projekt MiKlip, Vorhersagen für 1 – 10 Jahre) vor. Auch wenn im Projekt keine Vorhersagequalität wie für kurzfristige Wettervorhersagen erreicht werden konnte, stellen die darin entwickelten Ansätze doch einen Pfad zur Schließung der Lücke zwischen der Wettervorhersage und der Klimaprojektion für lange Zeithorizonte (Ende des 21. Jhd.) dar.

4 Einsatz in der Wirkmodellierung

Klimaprojektionsdaten stellen die Grundlage für darauf aufbauenden Analysen der Auswirkungen des Klimawandels dar. Im vorliegenden *promet*-Heft werden exemplarisch solche Studien vorgestellt.

Sutmöller et al. zeigen im **Beitrag 7** zunächst eine weitere Methode der Fehlerkorrektur und räumlichen Verfeinerung, bevor sie in einem praxisnahen Beispiel die Verwendung von Klimamodelldaten in forstwirtschaftlichen Untersuchungen vorstellen. Dabei wird insbesondere die Auswertemethode der „Ertragsklassenhüllen“ dargestellt. Diese erlaubt die Einbindung von (im Prinzip) beliebig vielen Klimamodellsimulationen in eine einzige Auswertegrafik. Die Methode ist somit in der Lage, auch bei möglicherweise zukünftig noch weit größeren Ensembles von Klimamodellsimulationen eine statistische Auswertung der Klimafolgen für das zu untersuchende Impakt-System mit vertretbarem Aufwand durchzuführen.

Herbst et al. stellen im **Beitrag 8** Beispiele der Anwendung von Klimamodelldaten aus der Landwirtschaft vor.

Nilson erläutert im **Beitrag 9** Probleme und Lösungen bei der Nutzung solcher Daten in der Wasserwirtschaft aus der Perspektive einer Bundesbehörde. Er stellt außerdem alternative Ansätze bei der Selektion von Datensätzen vor. Nilson zieht das Fazit, dass dringender Bedarf nach verstärkten Klimaberatungsleistungen besteht, die „sukzessive die Geschäftsprozesse der Nutzer (...) analysieren und Schnittstellen im Detail aus(...)gestalten“.

5 Gesellschaftliche Prozesse

Die Ergebnisse der klimatologischen Analysen und der Wirkmodellmodellierungen zeigen mögliche Veränderungen auf. Diese Informationen stellen die Basis für eine Vielzahl an Entscheidungen dar.

Wie Klimamodelldaten in die Definition von Normen (z.B. DIN, VDI oder DWA) einfließen sollen und welche Rolle sie dort spielen müssen, beschreiben Walter et al. im **Beitrag 10**. Gerade Regelungen (z.B. Bauvorschriften) für langlebige Infrastrukturen sollten den Klimawandel berücksichtigen, um auch in Zukunft die Sicherheit der Objekte gewährleisten zu können. Sie schreiben: „Zurzeit ist die Erkenntnis, dass der Klimawandel insbesondere bei Vorhaben mit einer hohen Lebensdauer berücksichtigt werden sollte, in Normierungskreisen noch nicht stark ausgeprägt.“ Da die Normen allerdings bei allen Planungen und Baumaßnahmen die Grundlage bilden, liegt hier ein zentraler Hebel, um die Anpassung an den Klimawandel in Deutschland (und auch darüber hinaus) in die praktische Umsetzung zu bringen. Ein Leitfaden für die Einbindung des Klimawandels in die Normenerarbeitung wurde bereits erstellt. Für die Bewertung von potentiellen Schäden sind insbesondere schwierig zu simulierende Parameter wie Temperaturmaxima, Stürme, Hagelereignisse, und andere Extremwetterereignisse wichtige Faktoren. Gerade für diese sind aber bisher die Klimaprojektionsdaten noch relativ unsicher.

Linke beleuchtet im **Beitrag 11** die Nutzung von Klimamodelldaten aus der Perspektive einer Landesbehörde. Er

geht der Frage nach, wofür eine Landeseinrichtung die klimatologischen Ergebnisse der Projektionsläufe und der Wirkmodellierungen benötigt und wie darauf basierend Entscheidungen getroffen werden können und müssen.

Einen Überblick über die Verwendung von Klimaprojektionsdaten in der **Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)**, insbesondere in deren Kernprodukt Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse geben Schauer und Sander im **Beitrag 12**.

Abschließend gibt Geiger im **Beitrag 13** einen Überblick über die Nutzung von Klimamodelldaten in der sozioökonomischen Klimafolgenforschung. Hier müssen nun von den globalen und regionalen Klimamodellen über die Klimafolgenmodelle bis zu sozioökonomischen Impakt-Modellen (makro- bis mikroökonomisch) oder nichtmonetarisierbaren Einflüssen (z.B. auf die psychische Gesundheit) alle Aspekte betrachtet werden, um zu belastbaren Aussagen zu kommen. Besonders schwierig ist dabei, dass es vielfältige Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Wirkungen des Klimawandels gibt; eine umfassende Berücksichtigung aller Folgen und deren Wechselwirkungen ist praktisch nicht möglich. Wir können uns der Komplexität des Themas aber deutlich besser annähern, als es die heutzutage meist immer noch disziplinären Untersuchungen tun und neben den naturwissenschaftlichen Folgen auch sozioökonomische Folgen betrachten.

6 Wie machen es andere?

Der Klimawandel betrifft alle. Nicht nur in Deutschland wird im Themenfeld geforscht und müssen die Ergebnisse dieser Analysen aufbereitet und kommuniziert werden.

Beispiele aus der Schweiz werden im Beitrag von Kotlarsky et al. im **Beitrag 14** erläutert. Hier sind durch eine enge Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen nicht nur hochaufgelöste und qualitätskontrollierte Klimamodellergebnisse erstellt worden, sondern deren Kommunikation an Anwenderinnen und Anwender der Daten wurde professionalisiert. Dadurch sind die Klimamodellergebnisse in der Politikberatung und der Erarbeitung von Anpassungsstrategien deutlich besser nutzbar als zuvor.

Entsprechende Beispiele aus Österreich werden von Matulla et al. im **Beitrag 15** vorgestellt.

7 Ausblick

Die Beiträge in diesem Heft stellen einen Ausschnitt aus der Arbeit mit Klimamodelldaten in der Klimafolgenforschung, Anpassungsforschung und Politikberatung im deutschsprachigen Raum dar. Diese drei Bereiche sind weite Felder, in denen viele Forscher*innen arbeiten, Probleme wälzen, Lösungen finden und damit unsere Kompetenzen im Umgang mit dem Klimawandel und seinen Folgen verbessern. Die

Auswahl der Beiträge soll (neben einem Eindruck für die Breite der Anwendungen) vor allem den Blick auf mögliche Schritte und zukünftige Forschungsthemen öffnen, die die Klima- und Klimafolgenforschung besser verbinden und somit nutzbarer machen können. Es ist unerlässlich, dass wir viel stärker inter- und auch transdisziplinär zusammenarbeiten. Die Verknüpfung der Disziplinen untereinander und die Zusammenarbeit mit nicht-wissenschaftlichen Anwender*innen der Ergebnisse ist eine essentielle Voraussetzung für eine verbesserte Umsetzung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Um dies zu erreichen, müssen alle Beteiligten Schritte aufeinander zu machen.

Daher haben wir unter anderem die Beiträge zu Bias-Korrekturen (Beiträge 2 und 3), zur räumlichen Verfeinerung (Beitrag 7) und zur Generierung künstlicher Tagesgänge (Beitrag 5) aufgenommen. Es gibt noch viel mehr Ansätze (z. B. zu räumlichen Mittelungen über Naturräume), die wir jedoch nicht alle in diesem Heft unterbringen konnten. Wir hoffen aber, dass die Beiträge zum Nachdenken anregen und zu weiteren konstruktiven Lösungen führen.

Die Klimafolgenforschung muss sich gleichzeitig der Tatsache stellen, dass die heute oft noch genutzten „linearen“ Klimafolgenmodelle, die zum Antrieb klimatische Zeitreihen analog zu Beobachtungsdatenreihen benötigen, zukünftig nicht mehr praktikabel sein werden. Längst ist klar, dass die Klimamodelldaten nicht dieselben statistischen Eigenschaften haben wie Beobachtungsdaten (es sind grundsätzlich andere Daten). Daraus folgt auch, dass die Verwendung möglichst großer Ensemble zur Abdeckung der möglichen zukünftigen Änderungen erforderlich ist. Die „linearen“ Klimafolgenmodelle stoßen hier an ihre Grenzen der Anwendbarkeit, wenn derzeit schon mehr als 20 Simulationen für ein Szenario vorliegen und schon in naher Zukunft teilweise mehr als 50 Simulationen auszuwerten sind. Eine provisorische Lösung für den Übergang ist hier die Definition eines reduzierten Ensembles (Beitrag 4), das die Bandbreite des gesamten Ensembles möglichst gut abdeckt. Dies kann aber nur eine Behelfslösung sein. Wir wissen nicht, welche Fragestellungen untersucht werden sollen und ob unser reduziertes „Kern-Ensemble“ die dafür erforderlichen Eigenschaften (z. B. Jahr-zu-Jahr Variabilität von Stürmen) angemessen widerspiegelt. Deswegen muss die Klimafolgenforschung verstärkt Methoden (weiter)entwickeln, die eine überblickende Analyse sehr vieler Klimamodellergebnisse ermöglicht. Ein Beispiel für einen solchen Ansatz zeigen Sutmöller et al. mit den „Ertragsklassenhüllen“. Auch hier hoffen wir, mit den Beispielen in diesem Heft zu neuen, kreativen Lösungen und Methoden zu inspirieren.

Literatur

KREIENKAMP, F., HUEBENER, H., LINKE, C., SPEKAT, A., 2012: Good practice for the usage of climate model simulation results - a discussion paper. *Environ. Syst. Res.* **1** (9), doi: 10.1186/2193-2697-1-9.

LINKE, C. et al., 2020: Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam, Nov. 2020. Online verfügbar unter <https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klimamodelldaten.pdf>, zuletzt geprüft am 16.02.2021.

RÖSSLER, O., FISCHER, A. M., HUEBENER, H., MARAUN, D., BENESTAD, R. E., CHRISTODOULIDES, P., SOARES, P. M. M., CARDOSO, R. M., PAGÉ, C., KANAMARU, H., KREIENKAMP, F., VLACHOGIANNIS, D., 2017: Challenges to link climate change data provision and user needs – perspective from the COST-action VALUE. *International Journal of Climatology* **39**, doi: 10.1002/joc.5060.

Autoren

DR. FRANK KREIENKAMP
Deutscher Wetterdienst
Regionales Klimabüro Potsdam
Güterfelder Damm 87-91
14532 Stahnsdorf
frank.kreienkamp@dwd.de

PD DR. HEIKE HÜBENER
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt
und Geologie
Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
heike.huebener@hlnug.hessen.de

CH. ZIER, F. BÄSE, H. KOMISCHKE

2 Ein Verfahren zur Plausibilisierung und Bewertung regionaler Klimaprojektionen

An assessment of regional climate projections

Zusammenfassung

Zur Abschätzung des zukünftigen Klimawandels ist es wissenschaftlicher Konsens, ein Modellensemble aus mehreren Klimaprojektionsläufen heranzuziehen. Allerdings unterscheidet sich die Wiedergabe der regionalen Eigenschaften des Klimas (z. B. Saisonalität des Niederschlags, räumliche Niederschlagsverteilung) deutlich zwischen den einzelnen Klimaprojektionen und zwischen verschiedenen Naturräumen. Um eine einheitliche Grundlage für Aussagen zum Klimawandel sowie darauf aufbauende Wirkungsmodellierungen und Anpassungsmaßnahmen in Bayern zu schaffen, wird am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) eine zusammen mit der Ludwig-Maximilians-Universität München (Fakultät für Geowissenschaften) entwickelte Plausibilitätsprüfung der regionalen Klimaprojektionen durchgeführt. Dieser Beitrag beschreibt die Methodik und Ergebnisse dieses Klimaprojektionsaudits für Bayern als wissenschaftliche Entscheidung hin zu einem plausiblen Bayerischen Klimaprojektionsensemble („Bayern-Ensemble“).

Summary

For estimations concerning future climate change, it is scientific consent to use a model ensemble of multiple climate projections. However, the projections perform very differently in reproducing the properties of the regional climate (e.g. seasonality of precipitation, regional precipitation distribution). The Bavarian Environment Agency developed, in cooperation with the Ludwig-Maximilians-University Munich, a plausibility check for regional climate projections in order to select a uniform data basis for statements on climate change, impact modelling and adaptation measures. This chapter describes the methodology and results of the climate projection audit for Bavaria as a knowledge-based way to a plausible Bavarian Climate Projection Ensemble (“Bavarian-Ensemble”).

1 Einleitung

Um die verschiedensten Folgen des Klimawandels auf die Menschen und ihre Umwelt abzuschätzen, ist es von entscheidender Bedeutung, die zukünftige Entwicklung des regionalen Klimas zu ermitteln. Darauf aufbauend können sinnvolle Handlungsmaßnahmen zur Klimaanpassung entwickelt und umgesetzt werden.

Zur Koordinierung von Klimaanpassungsaktivitäten ist es notwendig, eine einheitliche, geprüfte Datengrundlage für die Abschätzung der zukünftigen Klimaveränderungen zu verwenden. Dadurch wird gewährleistet, dass die Anpassungen in verschiedenen Handlungsfeldern, wie zum Beispiel Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie Tourismus und Bauwesen auf einer einheitlichen Datengrundlage beruhen, Klimawirkungsmodelle vergleichbare Eingangsdatensätze verwenden und bayerische Forschungsprojekte die gleichen klimatischen Grundlagen

für ihre Fragestellungen und Untersuchungen nutzen. Ergebnisse und Aussagen zum Klimawandel in Bayern werden somit leichter vergleichbar und können gegebenenfalls zusammengeführt werden. Daher ist ein Kernziel des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) die Zusammenstellung einer bayernweit gültigen Datengrundlage an Klimaprojektionen.

Das LfU führt hierzu Plausibilitätsuntersuchungen der verfügbaren Klimaprojektionen durch, mit dem Ziel für die Betrachtung des Klimawandels in Bayern ein einheitliches Modellensemble zu definieren.

Die Klimaprojektionen weisen aufgrund verschiedener Rahmenbedingungen und Modellansätze Unterschiede in ihren Ergebnissen auf, da nicht alle klimarelevanten Prozesse sowie die natürliche Variabilität vollständig erforscht und in den Modellen abgebildet sind. Um diesen Unsicherheiten wissenschaftlich gerecht zu werden, wer-

den mehrere Projektionen in einem Ensemble gemeinsam verarbeitet und ausgewertet. Jedoch ist nicht jede Projektion für jede Region und jede Fragestellung geeignet. Beispielsweise bildet nicht jede zur Verfügung gestellte Klimaprojektion die Eigenschaften des Klimas in Bayern (z. B. die Saisonalität des Niederschlags oder die Niederschlagsverteilung) realitätsnah ab. Teilweise sind zudem Auffälligkeiten in den Datensätzen vorhanden, die eine weitere Verwendung ausschließen. Daher ist es nicht sinnvoll, alle verfügbaren Klimaprojektionen im weiteren Vorgehen auszuwerten und für die Klimafolgenbetrachtung zu nutzen. Das Ziel des LfU ist es deshalb, eine einheitliche Datengrundlage in Form des geprüften Bayerischen Klimaprojektionsensembles („Bayern-Ensemble“) zu schaffen. Als ein wesentliches Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung, welche Klimaprojektionen Bestandteil des Bayern-Ensembles werden sollen, wurde das bayerische Klimaprojektionsaudit entwickelt. Dieses soll eine objektive und transparente Hilfe zur Auswahl der Klimaprojektionen zum Ensemble für die jeweilige Anwendung (z. B. Wasserhaushaltsmodellierung) anhand nachvollziehbarer Kriterien und gewählter Fragestellungen darstellen.

Ein zusätzlicher Grund, die Klimaprojektionen zu beschränken, liegt in der Anwendung der Klimaprojektionen in der Wirkmodellierung. Jede Klimaprojektion eines dynamischen, regionalen Klimamodells kann regional oder auch generell Abweichungen (Bias) in der Abbildung des Klimas in seinen verschiedenen, modellierten Klimavariablen aufweisen. Werden in weiteren Schritten Wirkungsmodelle mit diesen Klimavariablen angetrieben, kann dieser Bias diese Wirkungsmodellierung so stark beeinflussen, dass diese Modellierung nicht mehr nutzbar ist. Daher ist es notwendig, neben dem Bias der Klimaprojektionen auch die Sensitivitäten der Wirkungsmodelle auf die verwendeten Klimavariablen zu kennen. Ergebnisse des im Rahmen des Kooperationsvorhabens „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) in Bayern verwendeten Wasserhaushaltsmodells zeigen, dass die Wasserhaushaltsgrößen stark auf Veränderungen des Niederschlags und der relativen Feuchte reagieren, wohingegen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit einen geringeren Einfluss besitzen. Die Sensitivität auf Veränderungen der Temperatur hängt dabei auch vom Einzugsgebiet ab. Den stärksten Einfluss besitzen Veränderungen der Eingangsparameter auf die Abflüsse und das Hochwasserquantil. Nicht plausible Klimaprojektionsdaten würden somit einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung besitzen, sodass im Sinne einer höheren Belastbarkeit der Ergebnisse eine Beschränkung des Modellensembles stattfinden sollte. Theoretisch ist solch ein Bias mit einer Bias-Adjustierung reduzierbar. Es sollten aber aus Sicht des LfU nicht Klimaprojektionen angepasst werden, die offensichtliche Defizite in der Abbildung grundlegender, klimatischer Zusammenhänge aufweisen.

Wie solch ein für Bayern plausibles Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble) mithilfe des am LfU benutzten

Klimaprojektionsaudits ermittelt werden kann und welche methodischen Vorarbeiten für eine wissenschaftliche Entscheidung zur Einbindung bzw. Ausschluss einzelner Klimaprojektionen notwendig sind, ist Kerninhalt dieses Beitrags.

2 Untersuchungsgebiet

Im räumlichen Fokus der Beurteilung von Klimaprojektionen stand aufgrund der Wasserhaushaltsbetrachtungen nicht das politische Bayern, sondern das etwas größere hydrologische Bayern. Als hydrologisches Bayern wird das Gebiet angesehen, aus dem alle in Bayern fließenden Gewässer gespeist werden, auch wenn das Gebiet über die Landesgrenzen Bayerns hinausreicht (Abbildung 2-1, rote Linie). Dies ist notwendig, um den Wasserhaushalt für Bayern komplett betrachten zu können.

Da das Relief einen starken Einfluss auf das regionale Klima hat, werden die Klimaprojektionen für die Anwendung auf die in Bayern anzutreffenden Naturräume analysiert. Diese Naturräume decken nach ihrer ursprünglichen Definition (LFU 2014) größere Gebiete als die in Abbildung 2-1 dargestellten ab. Jedoch beziehen sich die hier verwendeten Bezeichnungen auf die innerhalb des hydrologischen Bayerns liegenden Anteile: Alpen (20.500 km²), Alpenvorland (30.500 km²), Mittelgebirgsschwelle (10.400 km²) und südwestdeutsches (Schicht-)Stufenland (34.300 km²).

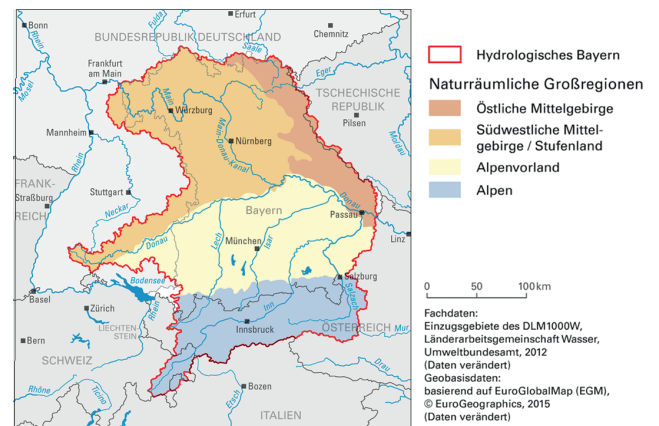


Abb. 2-1: Das hydrologische Bayern unterteilt in die Naturräume als Grundlage zur Analyse der Klimaprojektionen. Aus LFU (2020).

3 Datengrundlage

3.1 Klimaprojektionen

Klimamodelle liefern die Datengrundlage für die Untersuchungen am LfU. Diese Klimamodelle beruhen auf Szenarien unterschiedlicher Treibhausgaskonzentrationen in der Erdatmosphäre (engl.: *Representative Concentration Pathways*, RCPs). Basierend auf globalen Zirkulationsmodellen (*General Circulation Model*, GCM) werden für klein-

räumigere Betrachtungen (z.B. für Mitteleuropa) regionale Klimamodelle (*Regional Climate Model*, RCM) verwendet. Diese werden in einem dynamischen (KNOCHE und KEULER 2017) oder empirisch-statistischen Skalierungsverfahren (KREIENKAMP et al. 2017) in nahezu allen renommierten Klimaforschungsinstituten für verschiedene Teilgebiete der Welt, wie z.B. Europa, entwickelt. Dabei sind die dynamischen regionalen Klimaprojektionen als prozessgesteuerte Klimamodelle zu verstehen, für die die Globalmodelle die Eingangsdaten liefern.

In dieser Studie liegt der Fokus auf der Prüfung der dynamischen, regionalen Klimaprojektionen (RCM) für Bayern, da aufgrund der methodischen Entwicklung von empirisch-statistisch skalierten Klimaprojektionen (*Empirical Statistical Downscaling*, ESD) für diese Projektionen geringere Abweichungen zu erwarten sind und somit andere Kriterien für die Modellauswahl angesetzt werden. Ergebnisse der ESD sind im LfU-UmweltSpezial „Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung“ veröffentlicht worden.

3.2 Der Bayerische Klimareferenzdatensatz KliRef2014

Für das Klimaprojektionsaudit bedarf es eines qualitativ hochwertigen, flächenhaften Klimareferenzdatensatzes. Als Referenzzeitraum, in dem die Klimaprojektionsdaten mit den Messdaten verglichen werden, dient der

Zeitraum von 1971-2000. Da der HYRAS-2006-Datensatz starke Niederschlagsunterschätzungen im Alpenraum aufweist (FREUDIGER et al. 2016) und für die Wasserhaushaltsmodellierung notwendige Klimavariablen wie Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung nicht flächendeckend zur Verfügung standen, sah das LfU die Notwendigkeit für die Erstellung eines neuen Klimareferenzdatensatzes für Bayern.

Dieser neue Klimareferenzdatensatz, der Bayerische Klimareferenzdatensatz 2014 (KliRef2014) wurde aus verschiedenen Datensätzen gemessener Klimavariablen zusammengestellt. Im Kern besteht er aus dem HYRAS-2006-Datensatz (FRICK et al. 2014; RAUTHE et al. 2013), welcher vor allem im Randbereich der Bayerndomäne durch andere europäische Datensätze (Tabelle 2-1) ergänzt wurde. Um eine in sich konsistente Referenz zu erhalten, wurden alle zur Verfügung stehenden Daten zu den jeweiligen meteorologischen Variablen zusammengeführt. Dazu wurde in KLIWA in Bayern das hydrologische Modell WaSiM (SCHULLA 2012) verwendet, welches auch für die Wasserhaushaltsmodellierung zum Einsatz kam. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass der mit der Wasserhaushaltsmodellierung identische Referenzdatensatz die Anforderungen an die Klimavariablen für die Wirkungsmodellierung im Klimaprojektionsaudit optimal wiedergibt.

Tab. 2-1: Die zur Erstellung des KliRef2014-Datensatzes verwendeten Daten.

Datensatz	Format	Verwendeter Zeitraum	Verwendete Variable	Quelle
Messwerte	Stationsdaten	01.01.1970 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte Sonnenscheindauer Windgeschwindigkeit	CDC 2013
HYRAS 2006	Raster 5x5 km ² (interpoliert aus Stationsdaten)	01.01.1970 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte	FRICK et al. 2014; RAUTHE et al. 2013
E-OBS	Raster 0,25°	01.01.1970 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag	ENSEMBLES DATA ARCHIVE 2014
MARS	Raster 25x25 km ² (interpoliert aus Stationsdaten)	01.01.1975 – 31.12.2000	Lufttemperatur Niederschlag Relative Luftfeuchte Globalstrahlung Windgeschwindigkeit	JRC 2015
ERA-40 (ECMWF RE-ANALYSIS)	Raster 1,125°x1,125°	01.01.1970 – 31.12.1974	Relative Luftfeuchte Globalstrahlung Windgeschwindigkeit	EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS 2005

In WaSiM ist es möglich mehrere Interpolationsmethoden zugleich für eine meteorologische Variable (z. B. Inverse Distanzgewichtung (IDW) und höhenabhängige Regression) aber auch bereits bestehende Rasterdatensätze zu verwenden. Um große Wertesprünge zwischen den Bereichen (Zonen) mit unterschiedlichen Datenquellen bzw. Interpolationsmethoden zu vermeiden, wurden die Parameterwerte modellintern in einem vorher definierten Bereich (Übergangszone – *Transition Zone*) entlang der Zonengrenzen distanzgewichtet gemittelt (SCHULLA 2012). Dieser Übergangsbereich umfasst eine Breite von 5 km zu beiden Seiten der Zonengrenzen. Der erstellte Datensatz KliRef2014 wurde anhand des Vergleichs der hydrologischen Modellergebnisse ausgewählter Pegel der südlichen Donauzuflüsse erneut validiert.

Das in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilians-Universität München (Fakultät für Geowissenschaften) erstellte Audit als methodische Hilfe zur Beurteilung und Auswahl von Klimaprojektionen für bestimmte Fragestellungen beruht auf quantitativen und visuellen Bewertungskriterien. Als Ergebnis des Audits erhält der Anwender verschiedene Darstellungen und Indikatoren. Diese dienen dann als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen. Das Audit gibt somit keine Empfehlung, sondern nur Anhaltspunkte für den Ausschluss von nicht plausiblen Klimaprojektionen. Es ist somit auch abhängig von der gewählten Fragestellung bzw. Anforderung an die Klimaprojektionen. Dies entscheidet auch darüber, welche Klimavariablen oder Kennwerte der Klimaprojektionen betrachtet werden sollten. Ebenso relevant sind auch die tolerierbaren Abweichungen oder Unzulänglichkeiten im Hinblick auf die Fragestellung für die Auswahl. Sollen nur grobe Tendenzen von klimatischen Veränderungen ermittelt werden, kann es ausreichen, dass die Saisonalität zum Beispiel des Niederschlags einigermaßen gut getroffen ist. Sollen Wirkmodelle verwendet werden, sind ggf. höhere Anforderungen in Abhängigkeit von deren Sensitivität bei den klimatischen Eingangsdaten zu stellen.

4 Methodik

Das in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilians-Universität München (Fakultät für Geowissenschaften) erstellte Audit als methodische Hilfe zur Beurteilung und Auswahl von Klimaprojektionen für bestimmte Fragestellungen beruht auf quantitativen und visuellen Bewertungskriterien. Als Ergebnis des Audits erhält der Anwender verschiedene Darstellungen und Indikatoren. Diese dienen dann als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen. Das Audit gibt somit keine Empfehlung, sondern nur Anhaltspunkte für den Ausschluss von nicht plausiblen Klimaprojektionen. Es ist somit auch abhängig von der gewählten Fragestellung bzw. Anforderung an die Klimaprojektionen. Dies entscheidet auch darüber, welche Klimavariablen oder Kennwerte der Klimaprojektionen betrachtet werden sollten. Ebenso relevant sind auch die tolerierbaren

Abweichungen oder Unzulänglichkeiten im Hinblick auf die Fragestellung für die Auswahl. Sollen nur grobe Tendenzen von klimatischen Veränderungen ermittelt werden, kann es ausreichen, dass die Saisonalität zum Beispiel des Niederschlags einigermaßen gut getroffen ist. Sollen Wirkmodelle verwendet werden, sind gegebenenfalls höhere Anforderungen in Abhängigkeit von deren Sensitivität bei den klimatischen Eingangsdaten zu stellen.

4.1 Plausibilitätsprüfung

Vor der Auditierung werden am LfU die Klimaprojektionen einer zweistufigen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Eine erste Prüfung der zur Verfügung stehenden Klimaprojektionen erfolgt auf Basis der Auswertung wissenschaftlicher Publikationen und den Beurteilungen dritter Fachinstitutionen, wie dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit dem DWD-Referenz-Ensemble 2018 (DWD 2018), dem ReKlies-Projekt sowie weiterer Fachpublikationen (z. B. DALELANE et al. 2018; SMIAŁEK et al. 2016). Demnach werden dort als nicht plausible identifizierte Projektionen von vornherein von dem zu prüfenden Ensemble ausgeschlossen. Als nicht plausibel gelten zum Beispiel Projektionen, wenn deren zugrundeliegenden Globalmodelle nicht in der Lage sind, die regionalen Zirkulationsmuster und klimatischen Prozesse abzubilden (MCSWEENEY et al. 2015). Weiterhin gelten Projektionen als nicht plausibel, wenn die physikalische Konsistenz des Datensatzes eines GCMs für den Antrieb eines RCMs nicht gegeben ist, oder andere physikalische Prozesse, wie die Treibhausgasentwicklung nicht ausreichend abgebildet wurden (JEREZ et al. 2018).

In der zweiten Stufe der Plausibilitätsprüfung werden die Modelldaten der Klimaprojektionen auf fehlerhafte bzw. extreme Werte untersucht. Dieser Datenqualitätscheck umfasst die Darstellung der Tageswerte jeder Klimavariablen. Durch die visuelle Analyse können bereits systematische Fehler, wie das Überschreiten von plausiblen Grenzwerten (z. B. mittlere Tagestemperaturen in Bayern unter -50 °C) leicht identifiziert werden. Wird eine Projektion erkannt, die nicht diesen Kriterien entspricht, wird diese Information den Entwicklern zurückgemeldet, eine Behebung des Fehlers angefragt und die Projektion vorerst aus der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

4.2 Vorprozessierung der Daten

Da regionale Klimaprojektionen teilweise in unterschiedlichen Geometrien (verschiedene Rastergitter und Auflösung) vorliegen (z. B. REMO und ALADIN), ist ein direkter Vergleich zwischen den Projektionen nicht möglich bzw. würde zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führen. Auch der Referenzdatensatz KliRef2014 liegt in einem anderen Gitterformat (5 km Rasterdatensatz) vor, sodass über ein Aggregierungs- und Disaggregierungsverfahren alle Projektionen und der Referenzdatensatz auf ein einheitliches Gitter gleicher Geometrien und Ausdehnung prozessiert wurden.

4.3 Berechnung der Bias-Indikatoren

Im nächsten Schritt werden die Bias-Indikatoren, die zur Quantifizierung der Abweichungen der Projektionen vom Referenzdatensatz KliRef2014 in der Referenzperiode 1971-2000 dienen, berechnet. Sie sollen bestimmte Eigenschaften der Klimaprojektionen (z.B. die Wiedergabe des räumlichen Musters) möglichst unabhängig voneinander darstellen und eine Vergleichbarkeit der Modelldaten ermöglichen. Vier Ausprägungen des Bias werden im Rahmen des hier vorgestellten Audits quantifiziert:

- Die Abweichung des jährlichen Durchschnittswertes (**Quantitätsindikator**)
- Die Abweichung des monatlichen Durchschnittswertes (**Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug**)
- Die Abweichung des Jahresganges der durchschnittlichen monatlichen Werte (**Saisonalitätsindikator**) und
- Die Abweichung der räumlichen Verteilung der jährlichen Durchschnittswerte (**Musterindikator**)

Für die vier Naturräume des hydrologischen Bayerns (Abbildung 2-1) wurden die Gebietsmittel der Bias-Indikatoren wie folgt berechnet:

- **Indikator I (Quantitätsindikator):** Aus den täglichen Referenzdaten und Klimaprojektionsdaten des Referenzzeitraumes wird jeweils der Mittelwert berechnet. Diese beiden Mittelwerte werden voneinander subtrahiert. Der Betrag dieser Differenz entspricht dem Quantitätsindikator.

$$\text{Quantitätsindikator } 1 = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BCO_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{KliRef2014}_i \right|$$

mit n = Tage der Zeitreihe der Referenzperiode 1971-2000, BCO = Klimaprojektionsdaten, KliRef2014 = Referenzdatensatz.

- **Indikator II (Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug):** Aus den täglichen Referenzdaten und Klimaprojektionsdaten des Referenzzeitraumes werden die Monatsmittelwerte für alle 12 Monate berechnet. Diese Mittelwerte werden jeweils voneinander subtrahiert. Danach wird aus dem Betrag dieser 12 Differenzen der Mittelwert berechnet. Dieser Mittelwert ist der Quantitätsindikator mit Saisonalitätsbezug.

$$\text{Quantitätsindikator } 2 = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \left| \overline{BCO}_m - \overline{\text{KliRef2014}}_m \right|$$

Der Index m bezeichnet die durchschnittlichen Monatswerte der Zeitreihe der Referenzperiode 1971-2000.

- **Indikator III (Saisonalitätsindikator):** Der Saisonalitätsindikator ist die um den Bias normalisierte „Kling-Cupta-Effizienz“ der durchschnittlichen monatlichen

Werte. Diese Effizienz ist ein Gütemaß aus Korrelationskoeffizient und Standardabweichung und gibt die Abweichung des Jahresganges der monatlichen Durchschnittswerte zwischen Klimaprojektionsdaten und Referenzdatensatz in der Referenzperiode 1971-2000 an.

$$\text{Saisonalitätsindikator} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \frac{\left(\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{12} (BCO_m - \overline{BCO})^2}{12}} \right)^2}{\left(\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{12} (\text{KliRef2014}_m - \overline{\text{KliRef2014}})^2}{12}} \right)^2 - 1}}$$

Der Index r bezeichnet den Pearson-Korrelationskoeffizient.

- **Indikator IV (Musterindikator):** Der Musterindikator ist der pearsonsche Korrelationskoeffizient zwischen mittleren Jahreswerten aller Rasterzellen innerhalb des jeweiligen Untersuchungsgebietes des Referenzdatensatzes und der Klimaprojektionsdaten der Referenzperiode 1971-2000 (vgl. Beispiel in Abbildung 2-2).

$$\text{Musterindikator} = \frac{\sum_{i=1}^p (\text{KliRef2014}_i - \overline{\text{KliRef2014}}) (BCO_i - \overline{BCO})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^p (\text{KliRef2014}_i - \overline{\text{KliRef2014}})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^p (BCO_i - \overline{BCO})^2 \right)}}$$

mit p = Rasterzellen innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Mit dem Ziel einer vergleichbaren Bewertung zwischen verschiedenen Gebieten, werden die Indikatoren durch die Zuweisung von Punkten zwischen 0 und 10 in elf Klassen unterteilt und somit normiert. Die Vergabe der Punkte basiert auf einem eigens definierten Bewertungsschlüssel. Je geringer die Abweichung vom Referenzdatensatz ist, desto mehr Punkte werden der Projektion zugewiesen. Die Festlegung des Bewertungsschlüssels erfolgt auf Basis der Erfahrungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter des LfU. Eine Anwendung anderer Bewertungsschlüssel ist, abhängig von der Fragestellung und den Anforderungen, ohne großen Aufwand möglich.

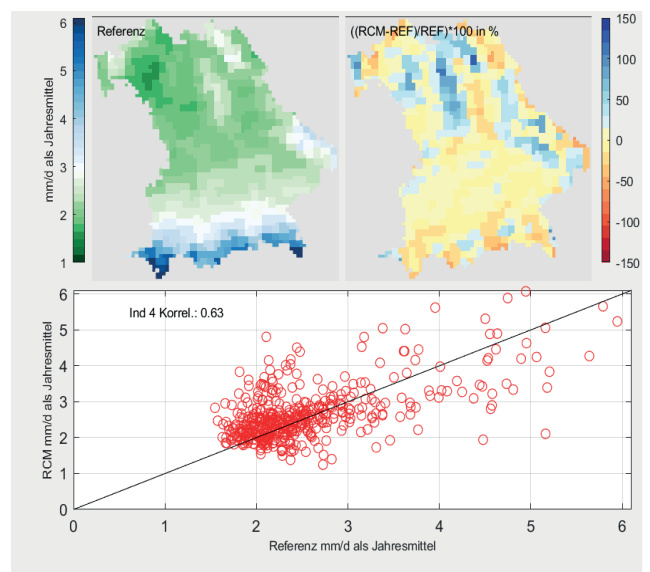


Abb. 2-2: Darstellung der Indikatoren III und IV für die Projektion MP2_REM_R85 für das Bundesland Bayern. Aus LfU (2020).

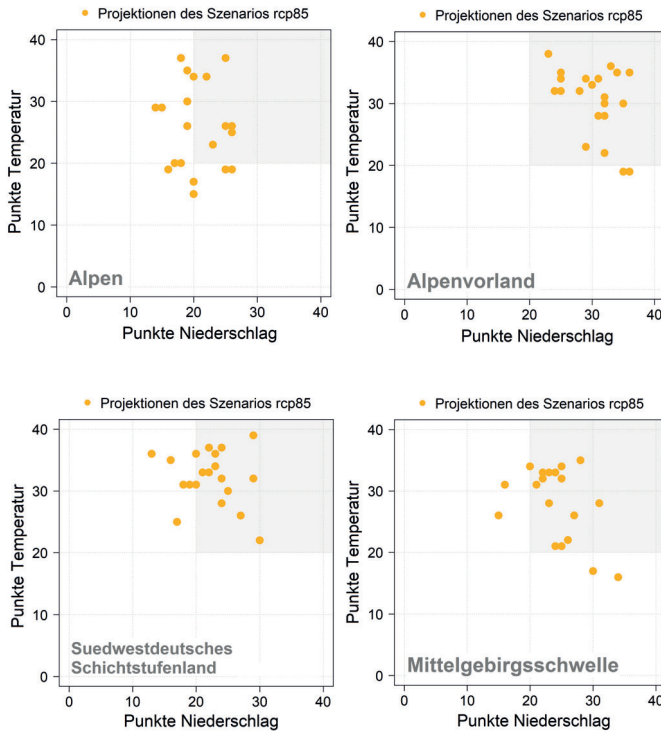


Abb. 2-3: Streudiagramm der 21 Klimaprojektionen nach ihrer Bewertung durch das Audit in den vier Naturräumen. Aus LFU (2020).

Die Differenzierung der Klimaprojektionen in solche, die das Referenzklima gut reproduzieren und in solche, die es nur ungenügend wiedergeben, unterliegt einer gewissen Subjektivität. Denn die zugrundeliegenden Bias-Indikatoren werden zwar objektiv berechnet, die Festlegung des Bewertungsschlüssels, nachdem eine erste Zuordnung zu guten und ungenügenden Projektionen erfolgt, ist aber subjektiv auf der Basis von Erfahrung und Plausibilitätsabwägungen. Für eine höhere Transparenz der Gesamtbewertung wird jeder der vier Bias-Indikatoren zuerst unabhängig voneinander mit Punkten bewertet. Durch die

Addition der Punkte der Einzelindikatoren wird ein Gesamtbias der betrachteten Klimavariablen für jede Projektion berechnet. Somit können Projektionen für jede Klimavariablen pro betrachteter Region maximal 40 Punkte erreichen und miteinander verglichen werden. Die jeweilige Addition der erreichten Punkte der vier Bias-Indikatoren erfolgt einfach gewichtet und dient der Bewertung des Gesamtbias.

Die Zusammenfassung der vier Bias-Indikatoren einer Projektion zu einer Bewertungskennzahl pro Klimavariablen soll die Einordnung einzelner Projektionen in das zur Verfügung stehende Ensemble erleichtern. Die Bewertungskennzahl gibt einen generellen Hinweis auf eine auffällige Abweichung, die dann mit den einzelnen Indikatoren oder auch mit weiteren Methoden näher analysiert werden kann. Zu diesem Zweck werden in der weiteren Verarbeitung der normierten Bias-Indikatoren Thermopluviogramme auf Basis der Bewertungskennzahl erstellt (Abbildung 2-3). Aus den bisherigen Analysen hat sich gezeigt, dass Projektionen mit einer höheren Bewertungskennzahl als die Hälfte der möglichen Summe (also 20 Punkte pro Projektion, Variable und Gebiet) für die Fragestellungen des LFU eine ausreichend gute Übereinstimmung mit dem Referenzdatensatz aufweisen. Da es sich beim Audit nicht um einen Automatismus mit harten Kriterien handelt, sondern um Indikatoren für Auffälligkeiten, erfolgte auch der Ausschluss nicht automatisch. Zuvor wurde immer eine weitere visuelle Prüfung der verschiedenen betroffenen Indikatoren (z. B. Jahresgang oder Korrelation bei Indikator IV) durchgeführt. Soweit möglich wurde versucht, die Gründe für die geringe Bewertungszahl zu eruieren. Damit erfolgte auch gleichzeitig eine weitere Prüfung der Auditergebnisse unabhängig von dem Indikator selbst.

5 Ergebnisse

Für die vier Naturräume im Gebietsumriss des hydrologischen Bayerns wurden 21 RCM auf Basis der historischen

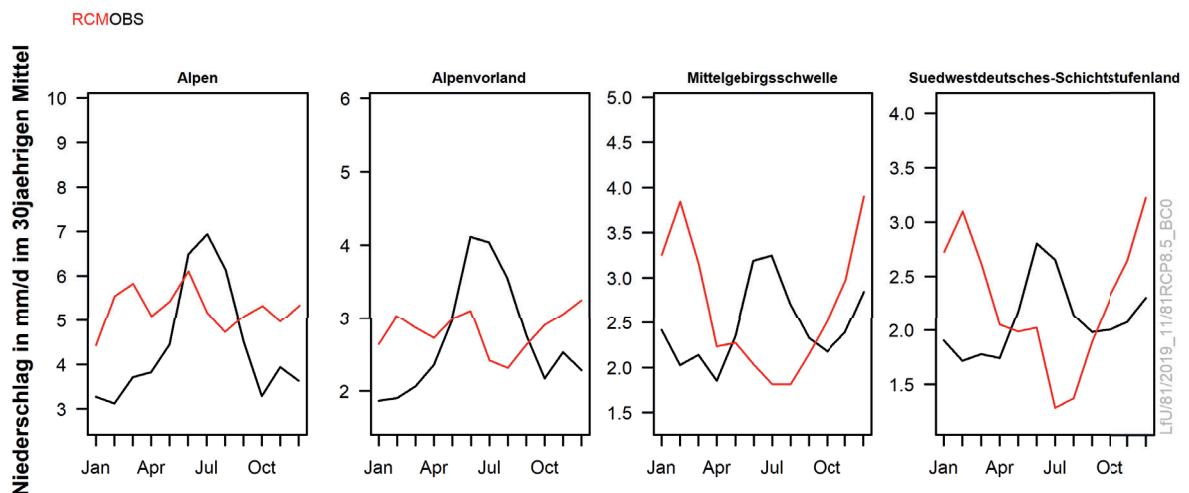


Abb. 2-4: Gegenüberstellung des Niederschlagsjahresgangs der Projektion HG2_CLM (rote Kurven) im Vergleich zum Referenzdatensatz KliRef2014 (schwarze Kurven) in den vier bayerischen Naturräumen. Aus LFU (2020).

Simulationsdatensätze (1971-2000) analysiert. Im Zentrum des Klimaprojektions-Audits stand dabei die Analyse des Niederschlages und der Temperatur. Im Folgenden sollen beispielhaft einige Ergebnisse präsentiert werden. Zusätzlich wurden auch die relative Luftfeuchte, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit als weitere Eingangsgrößen in die Wasserhaushaltsmodellierung mit WaSiM betrachtet, dies wird aber hier nicht dargestellt.

Eine visuelle Einschätzung der Übereinstimmung zwischen Projektion und Referenzdatensatz liefern die Jahresgänge der einzelnen Klimavariablen pro Naturraum. Der Abgleich der Jahresgänge mit den Ergebnissen der Bias-Indikatoren hilft bei der Beurteilung der Projektionen anhand der Bewertungskennzahlen.

Abbildung 2-4 zeigt ein Beispiel für eine Projektion (Projektion HG2_CLM_R85), deren Jahresgänge beim Niederschlag kaum mit denen des Referenzdatensatzes übereinstimmen und somit zu einer minimalen Punktzahl (0 Punkte) beim Saisonalitätsindikator (III) führen. Beispielsweise wird im südwestdeutschen Schichtstufenland sowie der Mittelgebirgsschwelle der Jahresverlauf invers dargestellt.

Zusätzlich bietet das Klimaprojektionsaudit des LfU mit dem Musterindikator (IV) die Möglichkeit die räumlichen Abweichungen darzustellen. Am Beispiel der Projektion

MP2_REM_R85 ist sehr deutlich die Niederschlagsverdriftung an den Mittelgebirgen in Bayern zu erkennen. Dies äußert sich in einer Überschätzung (blaue Rasterzellen) des Niederschlags auf der Luvseite und eine Unterschätzung (orange Rasterzellen) auf der Leeseite der Mittelgebirge (Abbildung 2-2 oben rechts). In der rasterzellenweisen Gegenüberstellung der Niederschlagswerte von Referenz und Projektion (Abbildung 2-2, unterer Teil) wird deutlich, dass die räumlichen Ungenauigkeiten besonders für Zellen mit größeren Niederschlägen zum Tragen kommen.

Differenziert nach den Naturräumen zeigt Tabelle 2-2 die Auswertung der normalisierten Indikatorwerte des Niederschlages. Projektionen mit Indikatorwerten von Null sind „auffällig“ und werden besonders hervorgehoben.

In den Alpen und im Schichtstufenland fällt in diesem Beispiel auf, dass die REMO-Projektionen für den Indikator IV (Musterindikator der räumlichen Übereinstimmung zwischen Referenz und Projektion) null Punkte erhalten. Die REMO-Projektionen wurden aufgrund dieser Niederschlagsverdriftung und der daraus folgenden schlechten Bewertung beim Musterindikator (IV) vom Ensemble ausgeschlossen. Diese räumliche Abweichung des Niederschlags führte zum Ausschluss der Projektionen, da gerade bei der einzugsgebietsbasierten Wasserhaushaltsmodellierung dieser Effekt besonders zum Tragen kommt. Auch eine Bias-Adjustierung, wie sie in der weiteren Nutzung

Tab. 2-2: Normierte Indikatoren der 21 RCM (DWD-Referenz-Ensemble v2018; DWD 2018) für den Niederschlag in den vier Naturräumen. Projektionen, die für mindestens einen Indikator nur null Punkte erhalten haben, sind hervorgehoben und farblich markiert.

Modell	Alpen				Alpenvorland				Schichtstufenland				Mittelgebirgsschwelle			
	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4
CA2_CLM	9	5	1	3	10	5	0	10	10	4	0	8	10	4	0	9
CA2_REM	10	8	7	0	9	8	8	6	8	7	5	0	8	7	5	1
E12_CLM	6	6	8	3	8	8	9	10	7	7	7	8	7	7	8	9
E12_REM	9	8	9	0	10	9	10	7	10	8	4	0	10	8	5	0
E12_RAC	8	7	6	5	8	8	10	10	10	8	5	7	10	8	7	9
E12_RCA	10	6	4	5	8	8	8	8	7	6	2	9	7	7	4	7
E01_RAC	9	7	3	6	9	8	8	10	10	8	2	7	10	8	3	9
E01_WRF	6	6	3	3	10	8	6	8	7	6	0	4	8	7	3	6
IP5_RCA	8	4	0	5	10	7	3	8	3	3	3	9	3	3	2	7
MI1_CLM	8	7	7	3	9	7	6	10	8	7	1	8	9	7	2	9
MI5_REM	10	8	8	0	9	8	8	7	9	7	3	0	10	8	5	0
HG2_CLM	7	4	0	4	10	5	0	10	9	4	0	8	9	4	0	9
HG2_REM	10	7	5	0	10	8	6	6	10	8	6	0	10	8	5	1
HG2_RAC	9	5	0	6	10	7	2	10	9	8	1	7	10	7	0	9
HG2_RCA	10	5	0	5	7	6	1	9	9	8	3	9	9	7	2	7
HG2_WRF	5	5	7	2	10	8	7	9	8	7	4	5	8	7	3	7
MP1_CLM	0	1	9	4	3	3	8	10	1	1	6	8	1	1	5	9
MP1_REM	9	7	3	0	10	7	3	5	8	8	7	0	9	8	6	1
MP1_RCA	7	5	0	4	10	8	7	8	3	3	5	9	4	4	7	7
MP1_WRF	4	4	8	3	8	7	8	8	4	4	1	4	5	5	3	7
MP2_REM	9	7	4	0	10	8	5	6	9	8	6	0	10	9	8	1

der Klimaprojektionen zum Tragen kommt und auch am LfU verwendet wird, kann aus Sicht des LfU das Problem nicht zufriedenstellend beheben, da der Eingriff sehr groß ist. Für Auswertungen auf größerer räumlicher Skala, z. B. im Bayernmittel spielt diese Charakteristik in der Niederschlagsmodellierung zum Beispiel keine Rolle, so dass eine weitere Verwendung der REMO-Projektionen möglich wäre. Dies widerspricht allerdings dem Ansatz eines einheitlichen Ensembles für alle klimarelevanten Fragestellungen.

Einen visuellen Gesamtüberblick über die Performanz der einzelnen Projektionen anhand der Punkteverteilung von Temperatur und Niederschlag bietet ein Thermopluviogramm (Abbildung 2-3). Hier sind die Summen der Indikatoren pro Klimavariablen und Naturraum aufgetragen. Als Zielkriterium wurde angenommen, dass plausible Projektionen 50% der möglichen Punkte für die betrachteten Variablen erreichen sollten (grau hinterlegter Zielquadrant). Am Beispiel der Alpen sind deutliche Abweichungen im Niederschlag für nahezu alle Projektionen zu verzeichnen, während für die Temperatur viele Projektionen gute bis sehr gute Übereinstimmungen liefern. So findet nach weiterer Prüfung kein Ausschluss aus dem Ensemble aufgrund der Temperatur statt. Beim Niederschlag zeigen sich Projektionen, die beim Saisonalitätsindikator (III) in mindestens einem Naturraum 0 Punkte erhalten und somit auffällig sind. Nach weiterer eingehender Prüfung des saisonalen Verlaufes (z.B. auf Gleichläufigkeit des Jahresganges) werden deshalb fünf weitere Projektionen (CA2_CLM_R85; IP5_RCA_R85; HG2_CLM_R85; HG2_RCA_R85; HG2_RAC_R85) vom Ensemble ausgeschlossen. Deutlich wird in Abbildung 2-3 auch die in den Naturräumen unterschiedliche Güte der Klimamodellierung.

6 Diskussion

Ein Kernziel des LfU ist die Zusammenstellung eines bayernweit gültigen Projektionsensembles (Bayern-Ensemble) mit dem sowohl Auswertungen zukünftiger klimatischer Entwicklungen, als auch Wirkungsmodellierungen durchgeführt werden können. Dies bedeutet, dass nur plausible Projektionen in dieses Ensemble einbezogen werden sollen, welche zur Beantwortung der genannten Fragestellungen für Bayern geeignet sind. Mit der vorgestellten Auditierung soll diese Beurteilung der Klimaprojektionen transparent und nachvollziehbar sein. Ein Ausschluss aus der weiteren Verwendung in Bayern heißt jedoch nicht, dass die jeweilige Projektion per se schlecht oder ungeeignet ist. Der Ausschluss einer Projektion vom Bayern-Ensemble bedeutet lediglich, dass diese, nach den vorgestellten Kriterien und für die gegenwärtig relevanten LfU-Fragestellungen in den Naturräumen Bayerns nicht geeignet sind. Eine vergleichbare Prüfung ist zu wiederholen, sollten andere Naturräume außerhalb Bayerns betrachtet werden.

Mit der Betrachtung verschiedener Charakteristika, wie der gesamten absoluten Abweichung, der saisonalen Ab-

weichung und der räumlichen Abweichung, wird versucht, allen Anforderungen klimatischer Analysen gerecht zu werden. Dabei verdeutlicht die paarweise (pixelweise) Gegenüberstellung von Mess- und Modellwert, durch den Musterindikator (IV) das Phänomen der Verdriftung von Niederschlägen bei den REMO-Projektionen. Es zeigte sich ein räumlicher Versatz des Niederschlags von ein bis zwei Rasterzellen. Trotz sehr guter Übereinstimmungen der Jahresgänge für Temperatur und Niederschlag verhindern diese starken räumlichen Niederschlagsabweichungen der REMO-Projektionen eine weitere Anwendung in der hydrologischen Wirkungsmodellierung in bayerischen Einzugsgebieten. Ein räumlicher Versatz des Niederschlags hat gerade bei dieser Anwendung deutliche Folgen und würde methodisch bedingt zu Fehlinterpretationen der Wirkmodellergenergebnisse führen. Daher werden die sechs REMO-Projektionen aus dem Bayern-Ensemble ausgeschlossen, auch wenn sie für die rein meteorologische Änderungsanalyse für ganz Bayern oder größeren Einzugsgebieten (siehe Beitrag 9 in diesem Heft) und bezogen auf klimatische Kennwerte der Temperatur weiterverwendet werden könnten.

Eine zusätzliche schnelle Beurteilungsmöglichkeit der verschiedenen Projektionen liefern die vorgestellten Thermopluviogramme. Dabei zeigte sich, dass insbesondere im Bereich der Hochgebirge (Alpen) die Performanz der Klimaprojektionen schlechter ist.

Insgesamt konnten mit dem beispielhaft vorgestellten Ablauf des Klimaprojektionsaudits für Bayern neben den REMO-Projektionen bei Betrachtung der Niederschlagsjahresgänge fünf abweichende regionale Klimamodelle identifiziert werden. Bei diesen Projektionen würde auch eine Bias-Adjustierung das Vertrauen in die Ergebnisse nicht verbessern, da befürchtet werden muss, dass regionalklimatische Prozesse nicht richtig abgebildet wurden. Auch diese Projektionen werden aus der weiteren Verwendung und dem Bayern-Ensemble ausgeschlossen. Demnach verblieben von den 21 RCM-Projektionen zehn dynamische Projektionen sowie zwei statistische Projektionen (siehe nächster Abschnitt) im Bayern-Ensemble_v1 (Tabelle 2-3). Für dieses Bayern-Ensemble muss im Anschluss daran eine Betrachtung der Bandbreite gegenüber der ursprüng-

Tab. 2-3: Übersicht über die RCP 8.5-Klimaprojektionen sowie ausgewählte ESD-Projektionen (* für das Bayern-Ensemble_v1, jeweils Realisation 1).

GCM	ALA	CLM	HR-V1	HR-V2	RAC (V1)	RAC (V2)	RCA (V1)	RCA (V1a)	REM (v2009)	REM (v2015)	WRF (v03H)	W13
CA2		X							X			X 10
CM5	X	X					X		X			X 10
E01												
EG9				X								
E12									X			X 10
IP5							X			X		
MI5									X			X 10
HG2		X	X		X	X			X			X 10*
MP1									X			X 10*
MP2									X			
WG4				X								
Datenquelle:					CORDEX		ReKlIES-De					
Ausschluss durch DWD:					X							
Ausschluss durch LfU:					X							

lichen 21 RCM-Projektionen durchgeführt werden, um die Einschränkungen der Signale durch die Modellauswahl beurteilen zu können. Nähere Betrachtungen hierzu werden im LfU-Umweltspezial: „Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung“ veröffentlicht.

Das vorgestellte Klimaprojektionsaudit wurde ebenfalls für die 60 WETTREG2013-Projektionen mit unterschiedlich antreibenden GCM durchgeführt (WETTREG: Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode). Jedoch sind die Ergebnisse des Klimaprojektionsaudits der WETTREG2013-Projektionen nicht mit den Ergebnissen der dynamischen Klimaprojektionen vergleichbar, da aufgrund ihres Modellaufbaus bereits Beobachtungsdaten integriert sind und sie daher geringere Abweichungen zum Referenzdatensatz aufweisen. Trotz leichter Unterschiede zwischen den einzelnen WETTREG-Projektionen konnte keine besonders auffälligen Projektionen identifiziert werden. Da es sich um jeweils zehn Realisationen einer Projektion handelt, sind die Änderungssignale sehr ähnlich. Die Verwendung von 60 ESD zusammen mit zehn RCM unterschiedlicher RCM-GCM-Kombinationen würde das Änderungssignal sehr zugunsten der ESD gewichten. Daher wurden mithilfe der Selektionsmethode nach DALELANE (2018) zwei repräsentative WETTREG-Projektionen ausgewählt. Somit umfasst das Bayern-Ensemble_v1 letztendlich 12 Klimaprojektionen (Tabelle 2-3).

Andere in der Literatur verfügbare Auditierungsverfahren wie im Clim4Energy-Projekt (BARTOK et al. 2016) oder bei MCSWEENEY et al. (2012, 2015) verwenden andere Verfahrensabläufe oder Gütemaße. MCSWEENEY et al. (2015) heben hervor, dass bei der Prüfung anhand der bodennahen Variablen nicht direkt auf Unzulänglichkeiten im Modell geschlossen werden kann. Demzufolge wird ein GCM nur als nicht plausibel eingestuft, wenn es nicht in der Lage ist die regionalen Klimaprozesse (z. B. Zugbahnen oder Zirkulationsmuster) abzubilden. Abweichungen der bodennahen Klimavariablen besagen lediglich, dass die Projektionen/Modelle einen mehr oder weniger starken Bias haben. Somit ergibt sich die Einteilung von Projektionen in vier Klassen: nicht plausibel (1), signifikanter Bias (2), Bias (3), zufriedenstellend (4) (MCSWEENEY et al. 2015). Anhand dieses angeführten Beispiels, einer anderen Auditierungsmöglichkeit, wird deutlich, dass es noch erheblichen Spielraum für mögliche Erweiterungen bzw. Verbesserungen des hier vorgestellten Klimaprojektionsaudits gibt. Beispielsweise wäre eine Erweiterung um einen Indikator, der die Gleichläufigkeit der Jahresgänge betrachtet und somit Indikator III ergänzt, möglich. Bias-Indikatoren können grundsätzlich auch für andere Gebiete, wie z. B. Regierungsbezirke oder Flusseinzugsgebiete berechnet werden. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass die Gebiete nicht zu klein gewählt werden, da mit kleineren Gebieten die Abweichung im räumlichen Muster nicht repräsentativ abgebildet werden kann. Auch ist generell eine Erweiterbarkeit der betrachteten Variablen möglich. Bisher nicht betrachtet wurden zum Beispiel klimatische Kennwerte, wie zum Beispiel Anzahl der Niederschlagstage oder Niederschlagstage über einem Perzen-

til. Allerdings hat das hier vorgestellte Audit nicht per se zum Ziel, die allgemeine Plausibilität der Klimamodelle zu prüfen. Vielmehr soll die Belastbarkeit der für die klimatischen Auswertungen oder Wirkungsmodellierung benötigten Klimavariablen in Bayern geprüft werden.

7 Schlussfolgerung

Das vorgestellte Klimaprojektionsaudit beinhaltet neben der Plausibilitätsprüfung auch eine qualitative Prüfung nach klar formulierten Kriterien und regional differenzierter Analyse. Es ermöglicht somit eine wissenschaftliche und nachvollziehbare Auswahl von Klimamodellen, die Kern eines „qualitätsgeprüften“ Bayerischen Klimaprojektionsensembles (Bayern-Ensemble) sind.

Dieses Bayern-Ensemble kann nachfolgend für klimatische Auswertungen herangezogen werden. Eine Bias-Adjustierung ist für eine anschließende Berechnung von Klimakennwerten sowie zur Verwendung in Wirkmodellen, wie z. B. dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM, als ein weiterer Verarbeitungsschritt notwendig und wird am LfU durchgeführt. Als Bias-Adjustierung wird am LfU eine Methodik verwendet, die im Wesentlichen auf *Quantile Delta Mapping* (QDM) nach CANNON et al. (2015) beruht. Das Klimaprojektionsaudit des LfU hilft den weiteren Verarbeitungsaufwand zu reduzieren. Es werden nämlich diejenigen Projektionen bereits im Vorfeld ausgeschlossen, bei denen eine Bias-Adjustierung einen zu großen Eingriff in die physikalischen Zusammenhänge der Klimamodelle mit sich bringt. Es ist zu erwarten, dass mit Verwendung des Bayern-Ensembles, als Ergebnis des Klimaprojektionsaudits, auch die Belastbarkeit der Klimaaussagen und die Ergebnisse von Wirkmodellen positiv beeinflusst werden.

Eine detaillierte Beschreibung des in diesem Beitrag vorgestellten Klimaprojektionsaudits wurde im 2020 erschienenen LfU-UmweltSpezial: „Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung“ veröffentlicht.

Literatur

- BARTOK, B., JIN, X., TOBIN, I., DENVIL, S., VAUTARD, R., 2016: Report on climate Projection dataset. Clim4Energy. ECMWF COPERNICUS Report.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU), 2014: Naturräumliche Gliederung Bayerns – 2. Großlandschaften. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm>, zuletzt geprüft am 16.02.2021.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU), 2020: UmweltSpezial, „Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung“, Augsburg, 2020.
- CANNON, A. J., SOBIE, S. R., MURDOCK, T. Q., 2015: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim* **28** (17), 6938-6959, doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A., 2018: A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **57** (3), 477-491.
- DWD Climate Data Center (CDC), 2018: Historische tägliche Stationsmessungen der Erdbodentemperatur für Deutschland, Version v006, ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST, 2018: Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rep-datensatz_node.html, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- ENSEMBLES DATA ARCHIVE, 2014: RCM data portal. Online verfügbar unter <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS, 2005: ERA-40 Monthly Means of Model Level Forecasts. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Online verfügbar unter <http://rda.ucar.edu/datasets/ds122.2/>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- FREUDIGER, D., FRIELINGSDORF, B., STAHL, K., STEINBRICH, A., WEILER, M., GRIESSINGER, N., SEIBERT, J., 2016: Das Potential meteorologischer Rasterdatensätze für die Modellierung der Schneedecke alpiner Einzugsgebiete. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung* **60** (6), 353-367, doi: 10.5675/HyWa_2016,6_1.
- FRICK, C., STEINER, H., MAZURKIEWICZ, A., RIEDIGER, U., RAUTHE, M., REICH, T., GRATZKI, A., 2014: Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS). Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift* **23** (1), 15-32, doi: 10.1127/0941-2948/2014/0560.
- JEREZ, S., LÓPEZ-ROMERO, J. M., TURCO, M., JIMÉNEZ-GUERRERO, P., VAUTARD, R., MONTAVÉZ, J. P., 2018: Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. *Nature Communications* **9**, doi: 10.1038/s41467-018-03527-y.
- JRC, JOINT RESEARCH CENTER, 2015: AGRI4CAST Interpolated Meteorological Data. Online verfügbar unter <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx>, zuletzt geprüft am 16.02.2021.
- KNOCH, R., KEULER, K., 2017: Dynamische Regionalisierung. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Regionale Klimamodellierung I - Grundlagen, *promet* **99**, 29-40.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., HOFFMANN, P., 2017: Empirisch-Statistisches Downscaling. Eine Übersicht ausgewählter Methoden. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Regionale Klimamodellierung I - Grundlagen, *promet* **99**, 20-28.
- MCSWEENEY, C. F., JONES, R. G., LEE, R. W., ROWELL, D. P., 2015: Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Clim. Dyn.* **44**, 3237-3260, doi: 10.1007/s00382-014-2418-8, 3237-3260 S.
- MCSWEENEY, C. F., JONES, R. G., BOOTH, B. B., 2012: Selecting Ensemble Members to Provide Regional Climate Change Information. *J. Climate* **25**, 7100-7121, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00526.1.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A., 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* **22** (3), 235-256, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0436.
- SCHULLA, J., 2012: Model description WaSiM - Water balance simulation model. Completely revised version 2012. Zürich.
- SMIATEK, G., KUNSTMANN, H., SENATORE, A., 2016: EURO-CORDEX regional climate model analysis for the Greater Alpine Region: Performance and expected future change. *Journal of Geophysical Research* **121** (13), 7710-7728, doi:10.1002/2015JD024727.

Autoren

CHRISTOPHER ZIER
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Klimazentrum
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof
christopher.zier@lfu.bayern.de

DR. FRANK BÄSE
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Stabsstelle
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof
frank.baese@lfu.bayern.de

HOLGER KOMISCHKE
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Monitoring, Wasserhaushalt und Warndienste
Rosenkavalierplatz 2
81925 München
holger.komischke@stmuv.bayern.de

M. HALLER, S. KRÄHENMANN, A. WALTER

3

Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten

Statistical processing of climate model ensemble data through Bias adjustment and regionalization using observational reference data

Zusammenfassung

Die Evaluierung von globalen und regionalen Klimamodellen ist essentiell für die Analyse und Interpretation der Daten und die Weiterverwendung in Wirkmodellen. Jedes Klimamodell beinhaltet Fehler (systematische Fehler werden „Bias“ genannt), da aufgrund oftmals zu grober Auflösung die Realität nicht exakt wiedergegeben werden kann. Mithilfe von Referenzdaten lassen sich mit unterschiedlich komplexen Verfahren Modelldaten „Bias-adjustieren“, das heißt die Modelldaten werden systematisch an die Referenzdaten angepasst, wodurch der Bias minimiert wird. Es wird hier ein multivariates Quantil-Mapping-Verfahren vorgestellt. Grob aufgelöste bzw. globale Modellergebnisse lassen sich räumlich verfeinern, ohne zeit- und kostenintensives dynamisches Downscaling verwenden zu müssen. Stattdessen können Regionalisierungsverfahren verwendet werden. Hier wird eine komplexe Methode zur Regionalisierung von Modelldaten mithilfe von Hauptachsentransformation mit anschließender Residuen-Interpolation vorgestellt. Beide Methoden (Bias-Adjustierung und Regionalisierung) wurden im „BMVI-Expertenetzwerk“ entwickelt und auf Daten eines Klimamodellensembles angewendet.

Summary

For the further analysis of global and regional model data it is essential to perform a model evaluation as models always contain a so-called “bias”, which means a systematic difference to reference data. They are used together with complex methods for the “bias adjustment” of model data. Here, a multivariate quantil-mapping procedure is presented which aims at minimizing the bias in a data set. There exist various methods for the statistical regionalization of coarse model data. They can be an effective way to avoid time-consuming dynamical downscaling. Here a method is presented which uses a combination of principal component analysis and residual interpolation. Both methods – the bias adjustment and the statistical regionalization – have been developed in a comprehensive national research program called “Expertenetzwerk”, funded by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI). The combination of both methods has been applied to ensemble data of regional climate models.

1 Einleitung

Um Aussagen über mögliche Änderungen unseres Klimas treffen zu können, werden globale Klimamodelle benötigt, die möglichst viele relevante Prozesse des Klimasystems abbilden. Globale Modellsimulationen werden in einer relativ geringen räumlichen Auflösung gerechnet, um Rechenzeit zu sparen. Zur Modellierung regionaler Prozesse werden regionale Klimamodelle nachgeschaltet, die mit den Ergebnissen der Globalmodelle angetrieben werden (BRAUCH et al. 2017, KNOCH und KEULER 2017). Klimamodelle erzeugen eine näherungsweise Darstellung der Realität, weshalb systematische Fehler, der sogenannte Bias, resultieren. Vor der weiteren Verwendung der Ergebnisse, auch als Input für Wirkmodelle, müssen diese Fehler quantifiziert sowie möglichst minimiert werden. Der Bias

wird durch den Vergleich zwischen Referenzdaten (zumeist Beobachtungs- oder Reanalysedaten) und einem Kontrolllauf des Klimamodells für den gleichen Zeitraum ermittelt.

Für zahlreiche zur Analyse des Klimas in Deutschland benötigte Parameter stehen Beobachtungsdaten in ausreichender räumlicher Dichte und Qualität zur Verfügung, so dass gegitterte Referenzdatenfelder erstellt werden können.

2 Bias-Adjustierung

In der Vergangenheit wurde eine Reihe unterschiedlich komplexer Korrekturverfahren entwickelt. Die Anpassung des Modellwerts durch einen konstanten Versatz (additiv oder multiplikativ) stellt die einfachste Art der

sogenannten Bias-Adjustierung dar. Voraussetzung ist eine annähernd lineare Beziehung des Versatzes zwischen Modell- und Referenzdaten. Die Anpassung basiert dabei meistens auf monatlichen Korrekturwerten, die z. B. aus Differenzen zwischen beobachteten und modellierten Werten abgeleitet werden. Ziel dieser linearen Skalierung ist die möglichst perfekte Übereinstimmung monatlicher Mittelwerte der korrigierten Modelldaten und der beobachteten Werte.

Sehr viel komplexer sind dagegen sogenannte Quantil-Mapping-Verfahren. Ein Quantil ist der Schwellenwert in einer Häufigkeitsverteilung, unterhalb dessen Wert der entsprechende Anteil der Fälle liegt. Perzentile sind besondere Quantile und werden verwendet, wenn die Verteilung in 100 gleiche Teile zerlegt wird. Ein Quantil-Mapping-Verfahren passt über eine Transferfunktion Häufigkeitsverteilungen von Modelldaten den Häufigkeitsverteilungen realer Beobachtungen an. Dabei werden die einzelnen Quantile der Häufigkeitsverteilung separat angepasst, wodurch mittlere Werte und Extrema voneinander unabhängig korrigiert werden.

Werden Modellszenarien der Zukunft adjustiert, muss dabei die Annahme gelten, dass die Häufigkeitsverteilungen auch im zukünftigen Zeitraum stationär sind, was in einem sich ändernden Klima nicht generell für alle Klimaparameter zutreffen muss.

Wie bei der linearen Skalierung wird auch beim Quantil-Mapping die physikalische Konsistenz der Klimavariablen zueinander nicht berücksichtigt. Die individuelle Bearbeitung der verschiedenen Parameter birgt daher die Gefahr, dass die physikalische Abhängigkeit meteorologischer Größen verloren geht. Beim Einsatz komplexer Wirkmodelle, wie beispielsweise eines Wasserhaushaltsmodells, kann dies zu ungenauen oder gar falschen Ergebnissen führen (siehe Beitrag 9 in diesem Heft). Um dieser Gefahr entgegenzutreten, wird das Quantil-Mapping-Verfahren um eine multivariate Komponente erweitert. Damit wird neben den statistischen Momenten auch die Konsistenz der Klimavariablen untereinander berücksichtigt.

Im Rahmen des Projektes Expertennetzwerk, gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), wurden regionale Klimaprojektionen für Europa mit einem **multivariaten Bias-Adjustierungsverfahren** (CANNON 2018; CANNON et al. 2015) bearbeitet. Die Klimaprojektionen mit einer Auflösung von $0,11^\circ$ bestehen aus dem Ensemble des EURO-CORDEX Projektes (JACOB et al. 2014) und wurden durch Klimaprojektionen aus dem ReKliEs-De Ensemble (HUEBENER et al. 2017) erweitert (BRIENEN et al. 2020; HÄNSEL et al. 2020). Dieses Verfahren kombiniert die Adjustierung der Verteilungen via univariatem **Quantil-Delta-Change-Mapping (QDCM)** (OLSSON et al. 2009), unter Beibehaltung der projizierten Änderungen in den simulierten Quantilen, mit einer Anpassung der Abhängigkeitsstruktur zwischen den Variablen

durch **multivariate Skalierung** (KRÄHENMANN et al. in Vorb). Im Folgenden wird das Verfahren mit „multivariates QM (Quantil-Mapping)“ abgekürzt.

Werden mehrere Variablen zusammen betrachtet, dann beschreibt die sogenannte marginale Verteilung die Verteilung einer Variablen ohne Berücksichtigung der anderen Variablen. Während das Quantil-Mapping auf marginale Verteilungen eines multivariaten Datensatzes abzielt und dabei die Abhängigkeitsstruktur der Variablen zueinander unter Umständen verschlechtert, korrigiert die multivariate Skalierung die Abhängigkeitsstruktur, jedoch nicht die komplette marginale Verteilung. Mit der Kombination beider Elemente soll ein verbessertes Ergebnis im Vergleich zu univariatem QM erzielt werden.

Grundsätzlich sind im Rahmen einer Bias-Adjustierung drei Typen von Datensätzen involviert: historische Referenzdaten (z. B. Beobachtungen), historische Klimamodelldaten und Klimaprojektionsdaten der Zukunft. Wird Quantil-Mapping auf modellierte Variablen im historischen Zeitraum angewendet, besitzen Bias-adjustierte Daten definitionsgemäß dieselbe marginale Verteilung wie jene der Referenzdaten. Schwierigkeiten entstehen, wenn Quantil-Mapping auf Projektionsdaten angewendet wird, deren Wertebereich außerhalb des Bereichs historischer Simulationsdaten liegt, z. B. im Fall der 2 m-Temperatur. Im Expertennetzwerk wurde dazu eine lineare Extrapolation verwendet.

Grundlage des Bias-Adjustierungsverfahrens ist ein Vergleich des historischen Zeitraums (z. B. von 1951-2000) des Klimamodellensembles mit Referenzdaten. Die Adjustierung der Tageswerte erfolgt gitterpunktweise und für jeden Kalendermonat separat, da der Bias sowohl jahreszeitlich als auch regional variieren kann. Als Referenzdatensätze dienen Tageswerte unter anderem der Lufttemperatur (Tagesmittel: *tas*; Tagesminimum: *tasmin*; Tagesmaximum: *tasmax*) und der Taupunkttemperatur (*tdew*) aus gerasterten Beobachtungsdaten (Hydrologische Rasterdatensätze „HYRAS“; RAUTHE et al. 2013, siehe Tab. 3-1). Die HYRAS-Daten umfassen das Gebiet von Deutschland, Schweiz, Österreich, Luxemburg, sowie Teile der Niederlande, Belgien und Frankreich.

Da die Taupunkttemperatur mit den übrigen Temperaturparametern hoch korreliert ist, wird diese an Stelle der relativen Feuchte bei der Bias-Adjustierung verwendet. Im Anschluss an die Bias-Adjustierung wird die relative und absolute Feuchte aus den adjustierten Taupunkttemperaturen berechnet.

In Abbildung 3-1 ist ein Beispiel der kumulativen Verteilung der Perzentile der mittleren Tagestemperatur der Beobachtungen und des Modells für den Januar, sowie der jeweilige Bias und das Klimasignal anhand eines Modells und eines ausgewählten Gitterpunktes gezeigt. Wie deutlich zu erkennen ist, hängt der Bias stark vom Perzentil ab. Das Modell unterschätzt für die meisten Perzentilbereiche

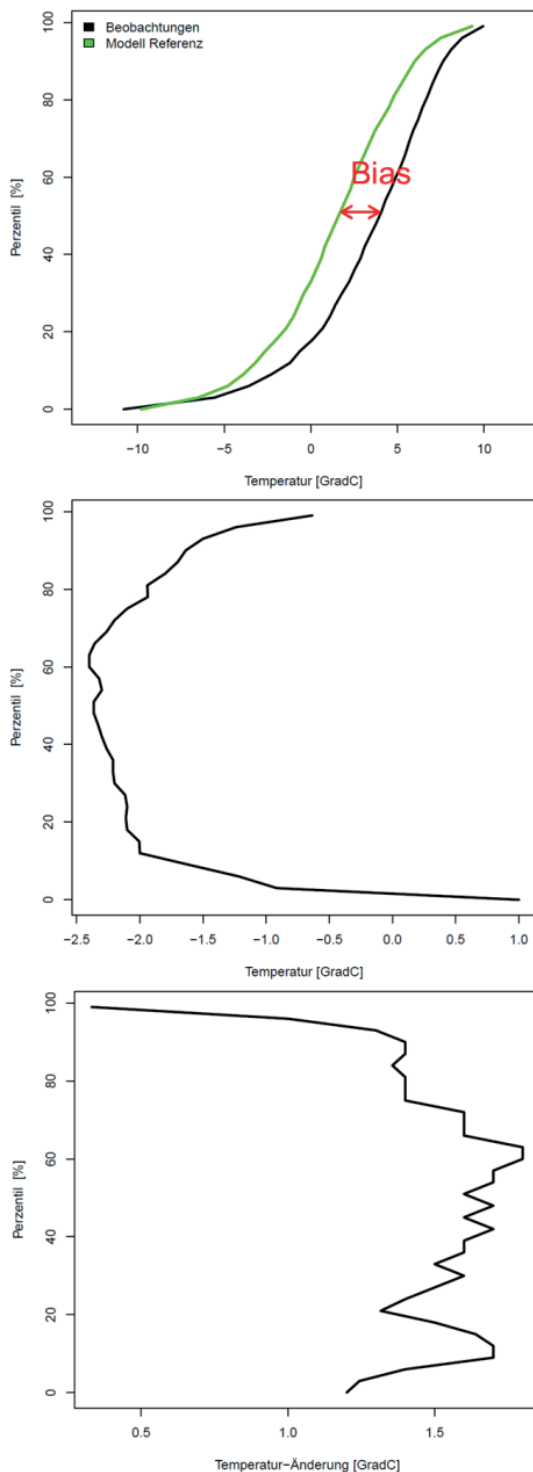


Abb. 3-1: Perzentilweise Sortierung (kumulative Verteilungsform) der mittleren Tagestemperatur im Januar (oben) der Modell- bzw. Beobachtungswerte, (Mitte) des Bias (Differenzen von oben) und (unten) des Klimasignals (2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000). Die dargestellten Tageswerte des Zeitraums 1971-2000 gelten für das Klimamodell MPI-REMO und den zufällig gewählten Gitterpunkt 9.96° E, 51.51° N.

die Tagestemperaturen um bis zu -2 °C (das Modell ist also zu kalt). In den Randbereichen, also bei hohen und tiefen Tagestemperaturen, ist der Bias geringer, bzw. wird positiv (das Modell ist zu warm). Das illustriert die Notwendigkeit einer perzentilabhängigen Bias-Adjustierung. In Abbildung

3-1 (unten) ist das Klimasignal (für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000) in Abhängigkeit vom Perzentil dargestellt. Das Klimasignal variiert mit den Perzentilen sehr stark und ist im gezeigten Beispiel für mittlere Perzentile stärker ausgeprägt als für die Extrema.

Untersuchungen im Rahmen des Expertennetzwerks zeigten, dass der Niederschlag nur schwach mit den temperaturbasierten Variablen korreliert ist ($R^2 < 0,1$). Zudem lieferte die Anwendung des multivariaten Verfahrens nach CANNON (2018) auf Niederschlag in Kombination mit den temperaturbasierten Parametern insbesondere für Extrema keine robusten Ergebnisse. Daher wurde entschieden, den Niederschlag unabhängig von den übrigen Parametern mithilfe von univariatem Quantil-Mapping zu korrigieren. Das QM-Verfahren wurde darüber hinaus nur auf Werte bis zum 99,9ten Perzentil angewendet, für höhere Werte wurde der Korrekturwert linear extrapoliert. Grund dafür ist, dass Ereignisse mit sehr hohen Niederschlagsmengen (> 99,9ten Perzentil) in den Referenz- und Projektionsdaten nicht ausreichend repräsentiert sind (bei z. B. einem 30-Jahres-Zeitraum mit Tagesdaten sind das nur 11 Datenpunkte) und zudem eine hohe Streuung aufweisen.

Im Expertennetzwerk wurde die Globalstrahlung (*rsds*) mittels linearer Skalierung basierend auf Monatsmittelwerten mit den HYRAS-Beobachtungsdaten korrigiert. Der Luftdruck in Meereshöhe (*psl*) wurde ebenfalls mittels linearer Skalierung Bias-adjustiert. Das einfache und schnelle Verfahren ist ausreichend, da *psl* einen relativ geringen Wertebereich abdeckt (Extrema weichen weniger als 5 % vom langjährigen Mittelwert ab), sowie relativ einfach zu modellieren ist. Als Referenz dienten Luftdruckdaten des Reanalysedatensatzes COSMO-REA6 (BOLLMEYER et al. 2015).

Die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit (*sfcWind*) wurde mittels univariatem Quantil-Mapping Bias-adjustiert (siehe Tab. 3-1). Grund hierfür ist deren geringe Korrelation mit den übrigen Klimaparametern. Wie bei anderen Variablen wurden auch für die Windgeschwindigkeit beim Quantil-Mapping nur Werte bis zum 99,9ten Perzentil berücksichtigt, mit anschließender linearer Extrapolation. Auch für diesen Parameter wurden Daten von COSMO-REA6 verwendet. Zu beachten ist, dass Extrema sowie Werte in höheren Lagen und an der Küste im Reanalysedatensatz vermutlich einen hohen Bias aufweisen, der aufgrund mangelnder Stationsdaten aber nicht identifiziert werden kann.

3 Regionalisierung mit Hauptachsentransformation

Das statistische Downscaling oder Regionalisierung beinhaltet die Schätzung regionaler oder lokaler Klimavariablen aus Variablen größerer Skalen. Es basiert auf der Beziehung zwischen einer Prädiktor-Variablen (wird zur Vorhersage einer anderen verwendet) und einer Prädiktanden-Variablen (die vorhergesagt werden soll). Ist eine solche Beziehung in Form einer Transferfunktion vorhanden,

Tab. 3-1: Übersicht über die Methoden der Bias-Adjustierung von Modellvariablen im Expertennetzwerk.

Variablenname	Variable	Referenzdatensatz	Adjustierungsmethode
2 m - Temperatur	tas	HYRAS	Multivariates QM
Maximum der 2 m - Temperatur	tamax	HYRAS	Multivariates QM
Minimum der 2 m - Temperatur	tasmin	HYRAS	Multivariates QM
2 m - Taupunkttemperatur	tdew	HYRAS	Multivariates QM
Niederschlag	pr	HYRAS	Univariates QM
Globalstrahlung	rsds	HYRAS	Lineare Skalierung
Luftdruck in Meereshöhe	psl	COSMO-REA6	Lineare Skalierung
Windgeschwindigkeit	sfcWind	COSMO-REA6	Univariates QM

können größerskalige Bedingungen, dargestellt z. B. von einem globalen oder einem grob aufgelösten, regionalen Klimamodell, je nach Methode herunterskaliert bzw. regionalisiert werden (TRZASKA und SCHNARR 2014).

Statistische Downscaling- oder Regionalisierungs-Methoden sind im Vergleich zu dynamischem Downscaling weniger rechenintensiv, da keine komplexen physikalischen Prozesse simuliert werden. Sie stellen somit eine günstige Alternative dar, die es erlaubt, Zeit und Kosten zu sparen.

Die Regionalisierung der Bias-adjustierten Resultate regionaler Klimamodelle erfolgte im Expertennetzwerk unter Verwendung einer Hauptkomponentenanalyse (*Principal Component Analysis*, kurz PCA), die typische, klimatologische Verteilungsmuster der jeweiligen Klimavariablen ermittelt. Die Hauptkomponentenanalyse ist eine multivariate statistische Technik, die häufig im Bereich der Atmosphärenwissenschaften verwendet wird (WILKS 2019). Im Projekt erfolgte die Regionalisierung für das Bias-adjustierte Klimamodellensemble mit 5 km Gitterweite mithilfe von HYRAS-Beobachtungsdaten (KRÄHENMANN et al., in Vorb.). Testweise wurden auch hochaufgelöste Modelldaten aus konvektionserlaubenden Simulationen mit COSMO-CLM verwendet (ROCKEL et al. 2008).

Die PCA ist eine Untersuchungsmethode, die es erlaubt, in meteorologischen Raum-Zeit-Feldern einen Satz typischer räumlicher Muster zu finden, die den größten Teil derer Va-

rianz beschreiben. Sie liefert unter anderem die sogenannte Ladungsmatrix der Hauptkomponenten (*Principal Components*, PC), die im Folgenden „PC-Loading“ genannt wird. Dabei wird die Annahme getroffen, dass in der Auflösung eines regionalen Klimamodells großskalige Muster der zu regionalisierenden Klimavariablen korrekt wiedergegeben werden. Kleinskalige Muster der jeweiligen Klimavariablen werden dann durch die Hauptkomponentenanalyse eines hochauflösenden Beobachtungs- oder Modelldatensatzes abgebildet.

Die neuen (und nun höher räumlich aufgelösten) Variablen stellen Linearkombinationen der originalen Variablen dar.

$$v = a_1v_1 \cdot a_2v_2 \cdot a_3v_3 \cdot \dots \cdot a_nv_n = \sum_{i=1}^n a_iv_i$$

Die Linearkombination v wird derart gewählt, dass ein möglichst großer Teil der Varianz der originalen Variablen erklärt wird. In der Regel wird dazu nur der Teil der PC-Loadings verwendet, die den größten Anteil der Varianz erklären. In Abbildung 3-2 sind beispielsweise nur die ersten fünf Muster für die Tagesmitteltemperatur gezeigt (jeweils für Januar und für Juli). Es zeigt sich, dass schon das erste Muster etwa 80 % der Varianz erklärt. Im Expertennetzwerk wurden die ersten 30 Muster verwendet. Man erkennt, dass die ersten Muster die höchste erklärte Varianz aufweisen und jedes weitere Muster einen geringeren Wert aufweist. Manche Muster zeigen eine nord-südliche oder west-östliche Verteilung der Muster, andere hingegen eher eine höhenabhängige oder eine dipolartige Verteilung.

Es werden die PCAs für jeden Kalendermonat auf eine ausreichend lange Zeitreihe (mindestens 10 Jahre) eines hochauflösenden Referenzdatensatzes (Beobachtungs- oder Modelldatensatz in der Zielauflösung) angewendet. Mithilfe linearer Kombination (bzw. multipler linearer Regression) und der vorher bestimmten PC-Loadings werden die Regressions-Koeffizienten bestimmt und im Anschluss die höher aufgelösten Variablenfelder als Tagesdatensatz berechnet.

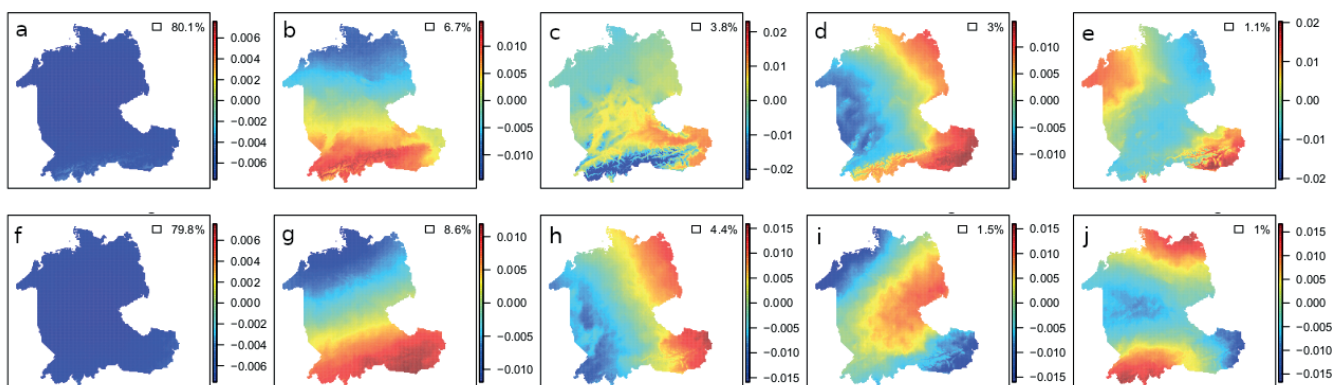


Abb. 3-2: Räumliche Muster bzw. PC-Loadings der normierten Tagesmitteltemperatur (farbig), (a-e) im Januar und (f-j) im Juli für das HYRAS-Gebiet. Die Zahlen in Prozent zeigen die vom jeweiligen Muster erklärte Varianz der Variablen an.

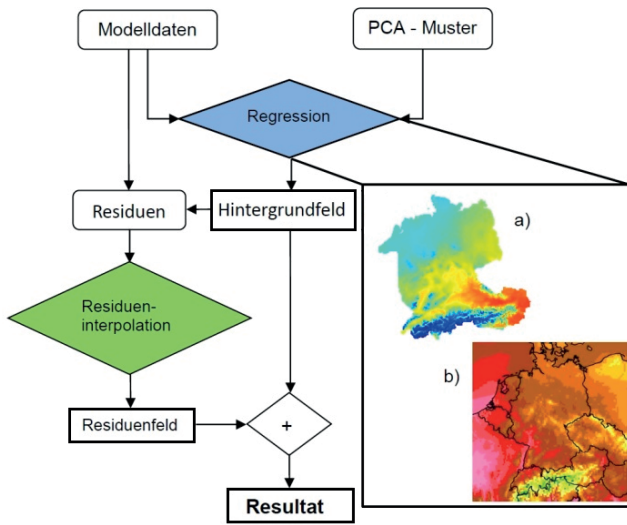


Abb. 3-3: Schema der Regionalisierungs-Methode mit a) dritter Hauptkomponente aus Abbildung 3-2 für Tagesmitteltemperatur für Januar und b) Bias-adjustierter Modelloutput für einen bestimmten Tag.

Im Einzelnen umfasst die Regionalisierungs-Methode somit folgende Schritte (Abbildung 3-3):

1. Anwendung der PCA auf hochauflösende Rasterdaten (Beobachtungen oder Modelldaten). Das Ergebnis umfasst eine vorher festgelegte Anzahl an PCA-Mustern (PC-Loadings, beispielhaft gezeigt in Abbildung 3-3a).

2. Regression: Ermittlung der statistischen Beziehung zwischen geringaufgelösten Modelldaten (gezeigt in Abbildung 3-3b) und den in Schritt 1 ermittelten PC-Loadings. Hierzu ist eine räumliche Aggregation der PC-Loadings auf die geringere Modellauflösung nötig. Das Ergebnis liefert die Regressions-Koeffizienten.
3. Die Anwendung der Regressions-Koeffizienten auf hochauflösende PC-Loadings liefert das Hintergrundfeld.
4. Die Differenz zwischen Regressions-Schätzwert und dem Wert der Modelldaten in der geringen Auflösung wird mittels inverser Distanzgewichtung interpoliert. Das Ergebnis ist ein Residuenfeld.
5. Die Summe aus Hintergrundfeld und Residuenfeld ergibt das Endresultat.

Abbildung 3-4 illustriert die relevanten Schritte zur Erstellung hochauflösender Felder der Tagesmitteltemperatur für den 29.6.1995. Das originale Temperaturfeld des Modells MPI-REMO über der HYRAS-Region (0,11° Auflösung) ist in 3-4a dargestellt. Multiple lineare Regression, unter Verwendung der ersten 30 Muster, sowie der geografischen Länge, Breite und der Geländehöhe, liefert die in 3-4b gezeigte Temperaturkarte als Hintergrundfeld. Die Regressionskoeffizienten werden in der Auflösung des regionalen Klimamodells (ca. 12 km) geschätzt. Dazu werden die aus den Beobachtungsdaten in 5x5 km Auflösung ermittelten Muster zunächst auf die Modellauflösung aggregiert. Die Koeffizienten werden anschließend auf die hochauflösen-

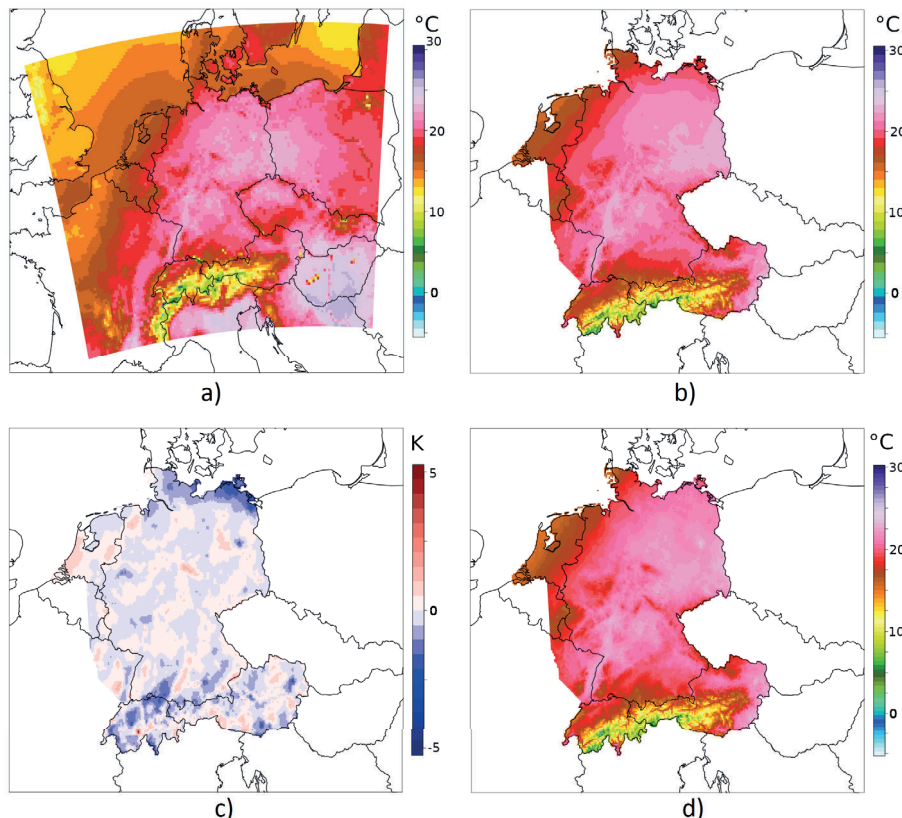


Abb. 3-4: Schritte zur Regionalisierung, beispielhaft gezeigt für die Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius des Modells MPI-REMO am 29.06.1995, a) Originalfeld, b) Regionalisierung nach Anwendung multipler linearer Regression, c) interpolierte Regressionsresiduen in Kelvin und d) hochauflöstes Endresultat.

den Musterfelder (5x5 km) angewendet. Um lokale Besonderheiten wie z.B. Küste oder Gebirge besser erfassen zu können, erfolgt die Regression unabhängig in 13 Teilregionen des HYRAS-Gebiets. Das großräumige Muster der Lufttemperatur ändert sich zwar kaum, besonders in Regionen komplexer Topographie werden kleinskalige Gebirgsstrukturen wie Täler und Bergmassive jedoch gut modelliert. Im nächsten Schritt werden die im Regressionsprozess unzureichend erfassten lokalen Abweichungen mittels inverser Distanzgewichtung (*Inverse Distance Weighting*, IDW) interpoliert. Die Abweichungen zwischen der mittels Regression geschätzten und der modellierten Temperaturwerte sind meist gering. Die größten Abweichungen treten an der Küste sowie im Alpenraum auf und erreichen bis zu 5 K. IDW-Interpolation der Residuen liefert die in 3-4c illustrierte räumliche Verteilung. Die Summation der Resultate beider Schritte (lineare Regression und Residueninterpolation) liefert das in Abbildung 3-4d dargestellte Endprodukt mit der Auflösung von 5 x 5 km.

4 Fazit

Im BMVI-Expertenetzwerk mit dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ wurde ein Verfahren zur Bias-Adjustierung und Regionalisierung entwickelt und auf ein vom Deutschen Wetterdienst zusammengestelltes Klimamodellensemble angewendet. Die Ensemble-Daten stehen zur Verfügung und können über klima.offenbach@dwd.de angefragt werden.

Das multivariate QM-Adjustierungsverfahren nutzt eine Kombination von univariatem Quantil-Delta-Change-Mapping (QDCM) und einer multivariaten Skalierung. Insgesamt brachte das Verfahren eine deutliche Verbesserung der Klimaprojektionsdaten in den unterschiedlichen Perzentilen. Allerdings konnten extreme Werte (unterste bzw. oberste Perzentile) für die verschiedenen Klimaparameter nur bedingt verbessert werden, teilweise vergrößerte sich der Bias an den Rändern der Verteilung nach der Bias-Adjustierung sogar. Grund dafür ist die Instationarität der Extremwerte und deren seltenes Auftreten in der Vergangenheit, weshalb die Korrekturwerte nicht robust geschätzt werden können.

Die Regionalisierung von Klimamodelldaten wurde mit einem im Expertenetzwerk entwickelten Verfahren durchgeführt, das auf der Mustererstellung aus Hauptkomponentenanalysen basiert. Mithilfe einer Regressionsanalyse und einer anschließenden Residueninterpolation wird ein hochaufgelöstes Variablenfeld ermittelt. Die Ziel-Auflösung der Felder wird über den Eingangsdatensatz für die PCA bestimmt. Im Expertenetzwerk wurden dazu Beobachtungsfelder mit 5 km Gitterweite verwendet und zusätzlich die Verwendung von hochaufgelösten Modelldaten mit 2,8 km Gitterweite erfolgreich getestet. Die Methode bietet damit eine kostengünstige und schnelle Möglichkeit einer Regionalisierung von Modelldaten, kann allerdings nicht die Vorteile eines dynamischen Downscalings mit realisti-

scheren dynamischen und physikalischen Prozessbeschreibungen aufwiegen.

Literatur

- BOLLMMEYER, C., KELLER, J.D., OHLWEIN, C., WAHL, S., CREWELL, S., FRIEDERICH, P., HENSE, A., KEUNE, J., KNEIFEL, S., PSCHIEDT, I., REDL, S., STEINKE, S., 2015: Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**(686), 1-15.
- BRAUCH, J., FRÖHLICH, K., IMBERY, F., 2017: Modellierung des Klimasystems. In: Regionale Klimamodellierung I - Grundlagen. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **99**, 7-19.
- BRIENEN, S., WALTER, A., BRENDDEL, C., FLEISCHER, C., GANSKE, A., HALLER, M., HELMS, M., HÖPP, S., JENSEN, C., JOCHUMSEN, K., KRÄHENMANN, S., MÖLLER, J., NILSON, E., RAUTHE, M., RAZAFIMAHARO, C., RUDOLPH, E., RYBKA, H., SCHADE, N., STANLEY, K., 2020: Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld des BMVI-Expertenetzwerks.
- CANNON, A. J., 2018: Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim. Dyn.* **50**(1), 31-49.
- CANNON, A. J., SOBIE, S. R., MURDOCK, T. Q., 2015: Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Climate* **28**(17), 6938-6959.
- HÄNSEL, S., BRENDDEL, C., FLEISCHER, C., GANSKE, A., HALLER, M., HELMS, M., JENSEN, C., JOCHUMSEN, K., MÖLLER, J., KRÄHENMANN, S., RAUTHE, M., RASQUIN, C., RUDOLPH, E., SCHADE, N., STANLEY, K., WACHLER, B., DEUTSCHLÄNDER, T., TINZ, B., WALTER, A., WINKEL, N., KRAHE, P., HÖPP, S., 2020: Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre.
- HUEBENER, H., HOFFMANN, P., KEULER, K., PFEIFER, S., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., WARRACH-SAGI, K., 2017: Deriving user-informed climate information from climate model ensemble results. *Adv. Sci. Res.* **14**, 261-269.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M.,

- SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B., YIOU, P., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* **14**(2), 563-578.
- KNOCHÉ, R., KEULER, K., 2017: Dynamische Regionalisierung. In: Regionale Klimamodellierung I - Grundlagen. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **99**, 29-40.
- KRÄHENMANN, S., HALLER, M., WALTER, A., in Vorb. Bias adjustment and Statistical downscaling making: use of PCA-derived predictors. *Meteorologische Zeitschrift*.
- OLSSON, J., BERGGREN, K., OLOFSSON, M., VIKLANDER, M., 2009: Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research* **92**(3), 364-375.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A., 2013: A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* **22**(3), 235-256.
- ROCKEL, B., WILL, A., HENSE, A., 2008: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* **17**(4), 347-348.
- TRZASKA, S., SCHNARR, E., 2014: A review of downscaling methods for climate change projections: African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC). Center for International Earth Science Information Network (CIESIN). http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf, zuletzt abgerufen am 15.01.2021.
- WILKS, D. S., 2019: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 4th Edition, Elsevier.

Autoren

DR. MICHAEL HALLER
Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
michael.haller@dwd.de

DR. STEFAN KRÄHENMANN
Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach

DR. ANDREAS WALTER
Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
andreas.walter3@dwd.de

4

C. DALELANE

Die DWD-Referenz-Ensembles und die DWD-Kern-Ensembles

The reference ensembles and the reduced ensembles of DWD

Zusammenfassung

Zu den repräsentativen Treibhausgaskonzentrationspfaden RCP8.5, 4.5 und 2.6 stellt der DWD den Nutzern von Klimaprojektionen sogenannte Referenz-Ensembles von regionalen Klimaprojektionen zur Verfügung, die einheitlichen technischen Standards genügen und deshalb vergleichbar sind. Weiterhin bietet der DWD zu jedem Referenz-Ensemble ein Kern-Ensemble mit deutlich verringerter Anzahl von Ensemble-Members an, das jedoch die Spannweite des Referenz-Ensembles weitgehend abdeckt, sodass Nutzer ihren Aufwand bei Auswertung ohne Informationsverlust reduzieren können.

Summary

The DWD provides so-called reference ensembles of regional climate projections with respect to the representative concentration pathways RCP8.5, 4.5 and 2.6, which satisfy standardized technical guidelines to ensure comparability. For each reference ensemble, DWD provides furthermore a reduced ensemble containing only a handful of members that preserves the ensemble spread of the respective reference ensemble. By this means, users of climate projections are enabled to realise their analysis projects at substantially reduced costs without loss of information.

1 Einleitung

Klimamodelle sind die wesentlichen Hilfsmittel, um die Vorgänge und Zusammenhänge des Klimas auf unserer Erde zu analysieren. Insbesondere werden Klimaprojektionen für die Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima genutzt. Klimaprojektionen enthalten jedoch Unsicherheiten, deren Ursachen „in der Komplexität des Klimasystems, der notwendigen Abstraktionen im Rahmen der Modelle, der natürlichen Variabilität des Klimas und in den Annahmen über die künftige Entwicklung der Treibhausgaskonzentration, des Aerosols und der Landnutzung“ liegen (DWD 2020). Durch die Nutzung einer Vielzahl von Modellergebnissen („Ensembles“) kann diese Unsicherheit deutlich reduziert werden

Mit den Datensätzen aus EURO-CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) und ReKliEs-De (*Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland*) stehen für Deutschland zurzeit umfangreiche Multi-Modell-Ensembles zum RCP8.5, zum RCP4.5 und zum RCP2.6 zur Verfügung (DALELANE et al. 2018). Diese Ensembles enthalten sowohl dynami-

sche regionale Klimamodelle (*Regional Climate Model, RCM*) als auch empirisch-statistische Downscalingverfahren (*Empirical Statistical Downscaling, ESD*), die jeweils von einer Simulation eines globalen Klimamodells (*General Circulation Model, GCM*) angetrieben werden. RCMs sind physikalisch basierte Modelle, die auf einer hohen räumlichen Auflösung für eine begrenzte Region den Zustand der Atmosphäre simulieren. Durch die explizite Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge liefern sie auch in einem veränderten Klima, wie es in einer langfristigen Klimaprojektion auftreten kann, noch physikalisch sinnvolle Zusammenhänge. Bei ESDs werden empirisch-statistische Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen des jeweiligen GCMs und Beobachtungsdaten für den historischen Zeitraum erzeugt und auf die Zukunft übertragen.

RCMs und ESDs haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile, und können als sich ergänzende (nicht konkurrierende) Verfahren angesehen werden. Daher werden sie in den DWD-Multi-Modell-Ensembles als gleichwertig behandelt.

2 Referenz-Ensembles

Grundlage der vom DWD bereitgestellten Referenz-Ensembles sind diejenigen Klimaprojektionen, die vorgegebene, breit abgestimmte Mindeststandards erfüllen:

- einheitliches Gitter (CORDEX EUR-11 mit ca. 12,5 km Auflösung)
- vorhandene Parameter: Lufttemperatur, Minimumtemperatur und Maximumtemperatur in 2 m; Niederschlag; Windgeschwindigkeit in 10 m; Relative oder Spezifische Luftfeuchte in 2 m; Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer; Bodenluftdruck oder Luftdruck über dem Meeresspiegel

Ausgeschlossen werden verfügbare Klimaprojektionen nur, wenn technische oder methodische Fehler die Plausibilität einer Klimaprojektion beeinträchtigen (z. B. fehlender Anstieg der Treibhausgaskonzentration, Bereitstellung fehlerhafter Daten, Interpolationsprobleme) und wenn die jeweiligen Modellentwickler/-innen von der Verwendung für bestimmte Zwecke abraten. Die so zusammengestellten Referenz-Ensembles mit 21, 12 bzw. 11 Klimaprojektionen sind auf der Webseite <http://www.dwd.de/ref-ensemble> (Abruf 04.11.2020) einsehbar.

Grundsätzlich empfiehlt der DWD, zur Untersuchung von Klimaänderungen in der Zukunft soweit möglich jeweils das gesamte Referenz-Ensemble heranzuziehen, da es nach dem derzeitigen Kenntnisstand die Spannweite der möglichen Entwicklungen am besten abbildet.

Die Verarbeitung des mit den Referenz-Ensembles verknüpften Datenvolumens, das in Zukunft noch weiter steigen wird, macht die Darstellungen möglicher Klimaänderungen und die Untersuchungen der Folgen des Klimawandels jedoch zunehmend aufwändiger.

3 Kern-Ensembles

Die in den Referenz-Ensembles enthaltenen Klimaprojektionen sind einander außerdem zum Teil sehr ähnlich bzw. redundant, sodass es für die Bewertung der Folgen des Klimawandels und zum Betrieb von Wirkmodellen nicht unbedingt notwendig ist, das gesamte Referenz-Ensemble auszuwerten. An den DWD wurde deshalb die Aufgabe herangetragen, aus den vorhandenen Referenz-Ensembles einzelne Klimaprojektionen zu selektieren, sodass mit einer kleinen Anzahl von Klimaprojektionen die vorhandene Spanne von Klimaänderungen bestmöglich beschrieben werden kann. Bei der Auswahl der Projektionen ist es von größter Wichtigkeit, den Informationsgehalt des Referenz-Ensembles, also die durch die Spannweite repräsentierte Unsicherheit, so gut wie möglich abzubilden. Durch die im DWD entwickelte Ensemble-Reduktion (DALELANE et al. 2018) wird mathematisch gesehen die Redundanz der Modellläufe reduziert, indem sehr ähnliche Klimaprojektionen aus dem Referenz-Ensemble entfernt werden, wobei

die Spannweite jedoch weitgehend erhalten bleibt. Dabei kommt das Konzept der Gleichwertigkeit der Ensemble-Mitglieder zum Tragen, was jedoch nicht mit „Gleichwahrscheinlichkeit“ verwechselt werden darf, da Klimaprojektionen keine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Die weitverbreitete Interpretation, Häufungen von Klimaprojektionen mit ähnlichen Klimaänderungssignalen als Hinweis auf erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit zu betrachten und den entsprechenden Klimasignalen eine höhere „Konfidenz“ oder „Robustheit“ zuzusprechen, beruht jedoch auf einem Irrtum. Die Stichprobe der Klimaprojektionen wird nicht durch zufällige Ziehung aus dem Raum der physikalisch möglichen Klimaänderungsszenarien erzeugt. Vielmehr besteht das Multi-Modell-Ensemble aus einer (willkürlichen) Zusammenstellung aller verfügbaren Klimaprojektionen, deren Erstellung zum großen Teil durch technische und ökonomische Faktoren bestimmt ist. Häufungen von ähnlichen Klimasignalen sind dabei auf Ähnlichkeiten der verwendeten Klimamodelle zurückzuführen. Die Verteilung innerhalb des Multi-Modell-Ensembles erlaubt deshalb keine Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit von Klimaänderungen.

Ergebnis der Ensemble-Reduktion ist ein sogenanntes Kern-Ensemble, welches aus wenigen Klimaprojektionen besteht, jedoch nahezu dieselbe Spannweite an Klimaänderungen als Indikator der Unsicherheit enthält wie das volle Referenz-Ensemble und somit die Auswertung ebenso wie die Klimafolgenmodellierung deutlich erleichtert. Die Auswahl der Klimaprojektionen im Kern-Ensemble sollte nicht als Qualitäts-Ranking missverstanden werden, da das Verfahren ausschließlich Ähnlichkeitsmaße bezüglich der Klimaänderungssignale berücksichtigt.

Um das Kern-Ensemble für eine möglichst hohe Zahl von Anwendungen und Sektoren sinnvoll anwendbar zu machen, wurde zur Erstellung eine Vielzahl von klimatologischen Parametern (Mittlere Temperatur, Niederschlagssumme, Extremindex des Niederschlages, Persistenzmaß des Niederschlages, mittlere Windgeschwindigkeit) in regionaler und monatlicher Differenzierung, sowie die Differenzierung der Klimaänderungssignale in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2071-2100) berücksichtigt.

Die Kern-Ensembles für RCP8.5, 4.5 und 2.6 enthalten sechs Klimaprojektionen (bzw. fünf für RCP2.6).

Tab. 4-1: Übersicht über die Kern-Ensembles des DWD mit den jeweils enthaltenen Klimaprojektionen für die Szenarien RCP 8.5, 4.5 und 2.6 (auch zu finden unter: <http://www.dwd.de/ref-ensemble>, zuletzt geprüft am 04.11.2020).

RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6
E01_RAC_R85	HG2_CLM_R45	HG2_RAC_R26
HG2_CLM_R85	E01_RAC_R45	MP2_REM_R26
CA2_CLM_R85	E12_RCA_R45	MI5_CLM_R26
MI5_REM_R85	MP1_REM_R45	E12_CLM_R26
MP2_REM_R85	MP2_REM_R45	E12_RAC_R26
MP1_WRF_R85	E12_RAC_R45	

Literatur

- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A., 2018: A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *J. of App. Meteorology and Climatology* **57**(3), 477-491.
- Deutscher Wetterdienst, Zentrales Klimabüro Offenbach, 2020: Umgang mit Unsicherheiten. In: Website des Deutschen Wetterdienstes, Bereich Klima und Umwelt. URL: https://rcc.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klima-projektionen/fuer_deutschland/fuer_dtstl_umgangbandbreiten_node.html, zuletzt geprüft am 04.11.2020.

Autorin

DR. CLEMENTINE DALELANE
Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
clementine.dalelane@dwd.de

5

U. GELHARDT, F. KITTLER, J. LANG, L. GRÜNHAGE, M. BAUMGARTEN

Erstellung von Testreferenzjahren für phytotoxische Klimakammerexperimente

Preparation of test reference years for phytotoxic climate chamber experiments

Zusammenfassung

Für phytotoxische Klimakammerexperimente wurden charakteristische Zeitreihen meteorologischer Steuerungsgrößen für einen Waldstandort benötigt, welche in stündlicher Auflösung den typischen mittleren Witterungsverlauf eines Jahres sowohl für den gegenwärtigen Zeitraum als auch für verschiedene zukünftige Klima- und Emissionsszenarien (RCP-Szenarien) widerspiegeln. Mithilfe von Messdaten der hessischen Luftmessstation Spessart und entsprechender Ensembledaten aus regionalen Klimaprojektionen wurden charakteristische Zeitreihen (Testreferenzjahre) meteorologischer Größen für verschiedene Zeiträume und RCP-Szenarien bestimmt. Hierfür wurde eine bestehende Methode (BBSR 2017) derart angepasst, dass sie für meteorologische Größen mit einem besonderen Einfluss auf die bodennahe Ozonkonzentration angewendet werden konnte.

Summary

For phytotoxic climate chamber experiments characteristic time series of meteorological control variables for a forest site were required, reflecting the typical annual cycle in hourly resolution for current and future time periods (different RCP scenarios). By using measured data from the Hessian air quality monitoring station Spessart and an ensemble of regional climate projections the characteristic time series (test reference years) of different periods and RCP scenarios were determined. For this purpose an already existing method (BBSR 2017) was adapted to ground-level ozone concentration and its influencing factors.

1 Einleitung

Der Lehrstuhl Ökophysiologie der Pflanzen der Technischen Universität München (TUM) bearbeitet im Rahmen der Ozon- und Klimawandel-Wirkungsforschung an Waldbäumen ein Forschungsprojekt (valORTree) zur Abschätzung des Baumwachstums von Buchen und Fichten im zukünftigen Klima unter besonderer Berücksichtigung der sich ändernden Kohlenstoffdioxid (CO₂)- und Ozon (O₃)-Konzentrationen. Für die experimentelle Simulation der verschiedenen Szenarien mittels Klimakammern werden charakteristische Zeitreihen meteorologischer Steuerungsgrößen, welche die bodennahe Ozonkonzentration und deren Wirkung auf die Vegetation beeinflussen, benötigt. Die zu ermittelnden Zeitreihen sollen für die Mittelgebirgslage Spessart (Waldstandort) gültig sein und werden repräsentativ für die Gegenwart und für die Zukunft benötigt, wobei die Zeitreihengenerierung des zukünftigen Zeitraums für verschiedene RCP-Szenarien erfolgen soll. Für die Bestimmung dieser charakteristischen Zeitreihen, auch als Test-

referenzjahre (TRJ) bezeichnet, werden sowohl Messdaten als auch Ensembledaten aus regionalen Klimaprojektionen verwendet. Die Umsetzung erfolgt in Anlehnung an die Methode für die Bestimmung eines Testreferenzjahres des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (BBSR 2017). Dabei werden Messdaten von Witterungsabschnitten neu kombiniert, sodass langjährige Mittel und Streuung der meteorologischen Größen, welche die bodennahe Ozonkonzentration beeinflussen, für den betrachteten Zeitraum bestmöglich wiedergegeben werden.

2 Datengrundlage

Die experimentelle Abschätzung des Baumwachstums erfolgt in den acht neuartig ausgestatteten, begehbaren Klimakammern der interdepartmentellen Forschungseinrichtung TUMmesa. Mit diesen Klimakammern können unter anderem Tagesgänge von Lufttemperatur, relativer

Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, CO₂ und O₃ in stündlicher Auflösung simuliert werden. Diese Daten galt es in geeigneter Weise bereitzustellen.

2.1 Messdaten

Als Datenbasis wurden Daten der Luftmessstation Spessart des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) verwendet. Diese Messstation liegt in einer waldreichen Gegend, die direkte Umgebung ist aber landwirtschaftlich geprägt. Damit handelt es sich um eine frei anströmbare Messstation, die für die Abschätzung der Auswirkungen der Luftbelastungen auf den Baumwuchs geeignet ist. Gleichzeitig gewährleistet die Lage der Station die korrekte, durch die direkte Umgebung unbeeinflusste Erfassung der meteorologischen Parameter.

Messdaten der für das Projekt benötigten meteorologischen Größen und der Ozonkonzentration lagen für den Zeitraum 1987 bis 2016 auf Stundenbasis vor. Die Daten wurden an der Justus-Liebig-Universität in Gießen von Ludger Grünhage auf Ausreißer geprüft und vorhandene Messlücken in Zusammenarbeit mit dem HLNUG gefüllt, sodass kontinuierliche Zeitreihen von Globalstrahlung, Lufttemperatur, relativer Feuchte und O₃-Konzentration vorlagen. An der Luftmessstation Spessart werden keine Kohlendioxidkonzentrationen gemessen. Unter der Annahme, dass die Kohlendioxidkonzentration an der Messstation Spessart eher großräumig beeinflusst wird und in dieser Höhe die Konzentrationswerte räumlich nicht stark variieren, wurden Daten der nächstgelegenen CO₂-Messstation Schauinsland des Luftmessnetzes des Umweltbundesamtes verwendet. Die Zeitreihe der Kohlendioxidkonzentrationen wurde ebenfalls auf Ausreißer geprüft und vorhandene Lücken gefüllt.

2.2 Ensembledaten

Es wurden Klimaprojektionen von regionalen Klimasimulationen basierend auf den Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 des EURO-CORDEX / ReKliEs-De Ensemble genutzt, da räumlich hochaufgelöste Klimasimulationen zum größten Teil nur für diese Szenarien verfügbar sind und mit diesen Szenarien die Bandbreite der möglichen Klimaänderungen derzeit abgedeckt wird. Das Ensemble wurde um Klimaprojektionen reduziert, die fachlich ausgeschlossen wurden (HÜBENER 2017a, 2017b) bzw. nicht in der räumlichen Auflösung von 0.11° vorlagen. Weiterhin wurden nur Klimaprojektionen genutzt, für die beide RCP-Szenarien zur Verfügung standen. Daraus ergab sich eine Grundgesamtheit von neun Klimaprojektionen mit folgender Kombination (Globalmodell: Regionalmodell):

- EC-EARTH: CCLM, RCA4 und RACMO
- HadGEM2-ES: RCA4 und RACMO
- MPI-ESM: CCLM, REMO, WETTREG und RCA4

Die meteorologischen Größen der Ensembledaten wurden in täglicher Auflösung benötigt. In Anlehnung an die Mess-

daten wurden als meteorologische Größen die oberflächen-nahe relative Feuchte (*hurs*) und die oberflächennahe Lufttemperatur (*tas*) ausgewählt. Die Globalstrahlung wurde nicht berücksichtigt, da räumlich hochaufgelöste Klimaprojektionen keine zuverlässigen Aussagen diesbezüglich zulassen. Ozon- und CO₂-Konzentrationen standen nicht zur Verfügung.

Die Ensembledaten mussten vor der eigentlichen Nutzung weiter aufbereitet werden. Bei einigen Klimaprojektionen war es notwendig, aus der spezifischen Feuchte (*huss*) die relative Feuchte, die nicht direkt zur Verfügung stand, zu berechnen. Für Klimaprojektionen aus dem statistischen Modell WETTREG wurde über alle zehn verfügbaren Realisierungen gemittelt.

Für die räumliche Zuordnung der Ensembledaten zu den Messdaten wurde ein Teilgebietsraster der Ensembledaten ausgeschnitten. Dieses Teilgebietsraster wurde so gewählt, dass die Messstation Spessart mittig innerhalb mehrerer Gitterpunkte liegt. Für alle Klimaprojektionen außer bei REMO mit Antrieb aus MPI-ESM entspricht dies einem Teilgebietsraster von 3x3 Gitterpunkten. Da das Koordinatensystem bei REMO um eine halbe Gitterbox verschoben ist, wurde hier ein entsprechendes Teilgebietsraster von 2x2 Gitterpunkten genutzt.

Weiterhin erfolgte die zeitliche Zuordnung der Ensembledaten zu den Messdaten. Der Zeitraum der Messdaten (1987–2016) beschreibt die Gegenwart und dient als Bezugszeitraum. Dieser Zeitraum wurde für die Ensembledaten nachgebildet. Dafür wurden Daten aus historischen Klimaprojektionen (1987–2005) und Klimaprojektionen der Zukunft (2005–2016) kombiniert, wobei für den zukünftigen Zeitraum beide RCP-Szenarien über alle ausgewählten Klimaprojektionen gemittelt wurden. Dies ist möglich, da am Anfang eines Klimaszenario-Zeitraums noch kein bzw. ein sehr geringer Einfluss des anthropogenen Strahlungsantriebs auftritt. Damit kann dieser kombinierte Zeitraum als Referenzzeitraum genutzt werden. Als relevanter Zeitraum für die Zukunft wurde die ferne Zukunft (2071–2100) für beide RCP-Szenarien einzeln betrachtet. Zu beachten war, dass für Klimaprojektionen mit Antrieb von HadGEM2 die Daten für das 21. Jahrhundert Ende 2099 enden.

Für die Berechnung des mittleren Jahresgangs wurden zuvor alle Klimaprojektionen auf einen einheitlichen Kalender (365 Tage) konvertiert. Bei Schaltjahren erfolgte eine Mittelung der Daten vom 29. Februar und 1. März. Klimaprojektionen mit Antrieb aus HadGEM2 basieren auf einem 360-Tage-Kalender. Hier wurden die fünf fehlenden Tage möglichst gleichmäßig über die Jahreszeiten verteilt. Auf Basis dieses 365-Tage-Kalenders erfolgte anschließend für jede Klimaprojektion und jede meteorologische Größe die Berechnung des mittleren Jahresgangs mit täglicher Auflösung. Kurzfristige, physikalisch nicht erklärbare Schwankungen von Tag zu Tag wurden über eine „Fast Fourier Transformierte“ dritter harmonischer Ordnung gefiltert und eliminiert. Über die Änderung des vieljährigen Mittels

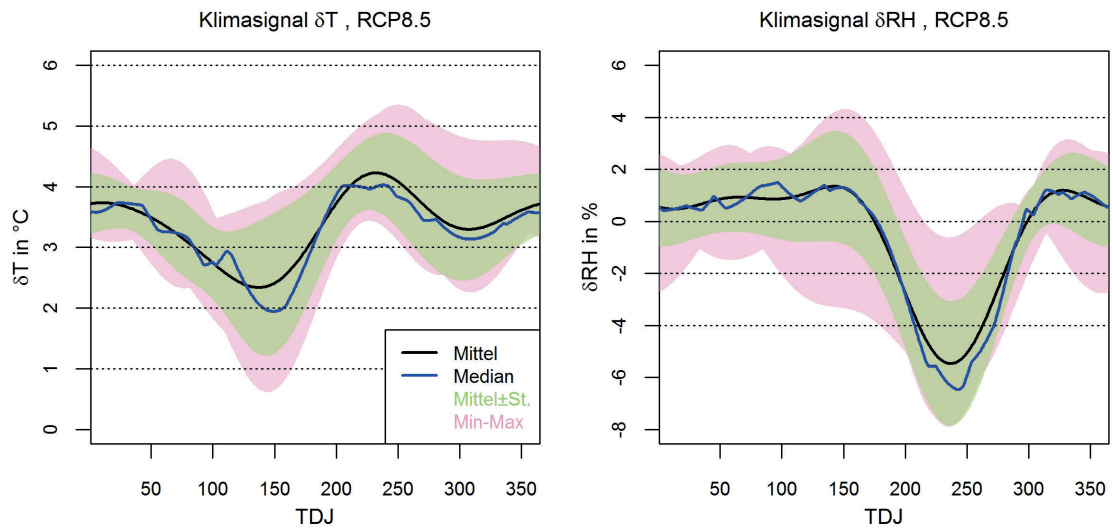


Abb. 5-1: Jahresgang des Klimasignals der Lufttemperatur (δT , links) und der relativen Feuchte (δRH , rechts) als Ensemblemittel (schwarze Linie) mit Standardabweichung (grün schattierte Fläche), Median (blaue Linie) und Spannweite des Klimasignals der Ensemble-Mitglieder (rot schattierte Fläche) für das Szenario RCP8.5 (TDJ = Tag des Jahres).

für den Zeitraum „Zukunft“ (2071–2100) gegenüber demjenigen für den Zeitraum „Gegenwart“ (1987–2016) wurde das jeweilige Klimasignal der meteorologischen Größe ermittelt. Anschließend wurde über alle Gitterpunkte des Teilgebietsrasters sowie über alle verfügbaren Klimaprojektionen pro Szenario gemittelt. Neben dem so gebildeten Ensemble-Mittelwert wurde zudem die Variabilität des Ensembles durch zusätzliche statistische Parameter betrachtet.

In Abbildung 5-1 ist beispielhaft der aus den Ensembledaten berechnete Jahresgang des Klimasignals der Lufttemperatur und der relativen Feuchte für das Szenario RCP8.5 dargestellt.

3 Methode

Die Rekombinationsmethode wird verwendet, um charakteristische Zeitreihen der Gegenwart und Zukunft zu erstellen. Diese werden als Testreferenzjahre (TRJ) bezeichnet. Die hier vorgestellte Methode wurde in Anlehnung an die Methode für die Bestimmung eines Testreferenzjahres des BBSR/DWDs entwickelt (BBSR 2017) und ist in Abbildung 5-2 schematisch dargestellt.

Die Methode wird auf die meteorologischen Größen angewendet, welche einen leitenden Einfluss auf die bodennahe Ozonkonzentration und deren Wirkung auf die Vegetation besitzen. Mögliche Leitvariablen stellen damit Globalstrahlung, Luftfeuchte und Lufttemperatur dar. Als Leitvariablen für die Gegenwart wurden Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung ausgewählt. Leitvariablen für die Zukunft sind Lufttemperatur und relative Feuchte. Die Globalstrahlung konnte nicht als Leitvariable für die Referenz der Zukunft genutzt werden, da die Globalstrahlung in regionalen Klimaprojektionen nicht zuverlässig simuliert und somit kein Klimasignal basierend auf den Ensembledaten berechnet werden kann.

Als Datengrundlage dienen stündlich aufgelöste Messdaten von 1987 bis 2016 und täglich aufgelöste Ensembledaten der Gegenwart (1987–2016) und Zukunft (2071–2100) für jeweils zwei RCP-Szenarien. Die Referenz der Gegenwart wird auf Basis der Messdaten als mittlerer Jahresgang mit täglicher Auflösung jeweils für die Leitvariablen berechnet. Für die Referenz der Zukunft pro RCP-Szenario wird

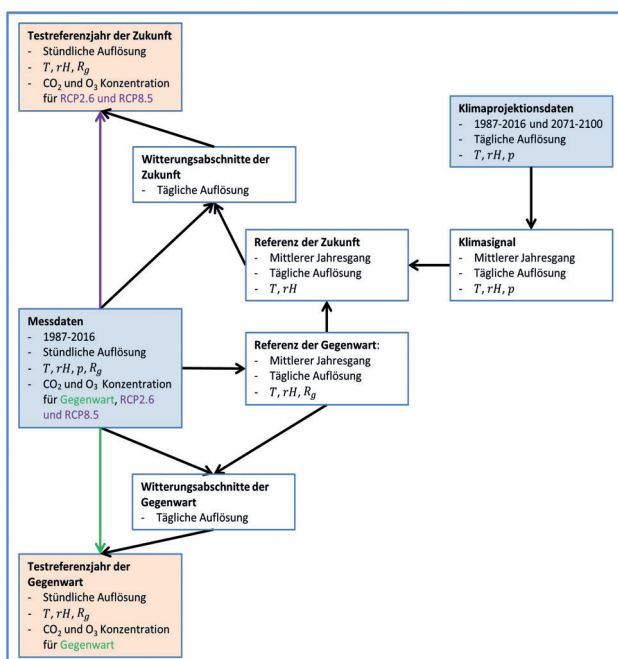


Abb. 5-2: Schematische Darstellung der Rekombinationsmethode. Datengrundlage bilden Mess- und Ensembledaten aus Klimaprojektionen (blau). Folgeprodukte der Ensembledaten wurden jeweils für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 berechnet. Als Endprodukt (orange) stehen die Testreferenzjahre zur Verfügung.

das jeweilige Klimasignal auf die Referenz der Gegenwart addiert, um einen mittleren Jahresgang mit täglicher Auflösung der jeweiligen Leitvariablen zu erzeugen. Im nächsten Schritt werden die Messdaten mithilfe der jeweiligen Referenz in Witterungsabschnitte segmentiert und die Segmente zu einer neuen Zeitreihe rekombiniert, sodass langjähriges Mittel und Streuung der Leitvariablen der jeweiligen Referenz bestmöglich wiedergegeben werden. Anschließend werden die rekombinierten Witterungsabschnitte mit täglicher Auflösung Stück für Stück durch Messdaten mit stündlicher Auflösung ersetzt, wobei die Übergänge zweier aufeinanderfolgender Witterungsabschnitte durch lineare Interpolation innerhalb eines 16 Stunden-Fensters (8 Stunden des vorherigen Witterungsabschnitts und 8 Stunden des folgenden Witterungsabschnitts) geglättet werden. Als Ergebnis entsteht somit je Referenz (Gegenwart, RCP2.6 und RCP8.5) ein Testreferenzjahr mit in sich konsistenten charakteristischen Zeitreihen aller verfügbaren meteorologischen Größen in stündlicher Auflösung.

Das jeweils ermittelte Testreferenzjahr stellt nur ein mögliches charakteristisches Jahr dar. Es genügt, ein Folgesegment in der aufzubauenden Zeitreihe zu finden, welches die festgelegten Auswahlkriterien basierend auf maximal zulässigen Abweichungen von Mittelwerten und Schwellenwerten in den Standardabweichungen erfüllt. Die Festlegung der Auswahlkriterien zur Rekombination orientiert sich dabei an der Methode für die Bestimmung eines Testreferenzjahres des BBSR/DWD (BBSR 2017) und wurde darauf basierend so angepasst, dass sie für den zur Verfügung stehenden Datensatz angewendet werden kann. Weiterhin wird mit Mittelwerten über Zeiträume von 10 bis maximal

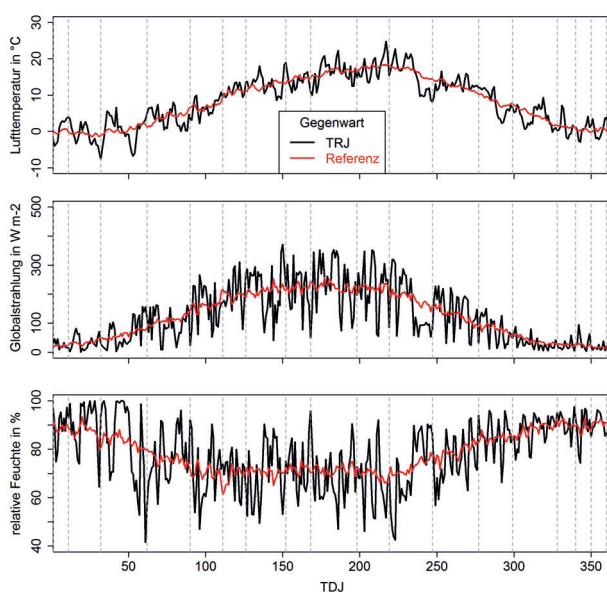


Abb. 5-3: Jahresgang der Tagesmittelwerte der Referenz (rot) und des zugehörigen Testreferenzjahrs (TRJ, schwarz) der Gegenwart für die meteorologischen Größen Lufttemperatur (oben), Globalstrahlung (mittig) und relative Feuchte (unten). Die senkrechten grauen Linien kennzeichnen die gewählten Witterungsabschnitte (TDJ = Tag des Jahres).

30 Tage gearbeitet. Dies kann im Einzelfall dazu führen, dass die ermittelte charakteristische Zeitreihe und die dafür genutzte Referenz für einen Witterungsabschnitt im Mittel sehr gut übereinstimmen, es aber innerhalb des Witterungsabschnitts zu Abweichungen kommen kann, beispielsweise wenn innerhalb dieses Witterungsabschnitts Perioden existieren, die in beide Richtungen vom Mittelwert abweichen.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die berechneten Referenzdatensätze und die daraus ermittelten charakteristischen Zeitreihen von Lufttemperatur, Globalstrahlung (nur Gegenwart) und relativer Feuchte für die Spessartregion exemplarisch für den gegenwärtigen Zeitraum (Abbildung 5-3) und für das Szenario RCP8.5 (Abbildung 5-4) vorgestellt. Zu beachten ist, dass aus Darstellungsgründen hier Tagesmittel der TRJ-Datensätze, die tatsächlich in stündlicher Auflösung vorliegen, gezeigt werden.

Für die Referenz der Gegenwart, die aus den Messdaten als mittlerer Jahresgang in täglicher Auflösung berechnet wurde, beträgt die Jahresamplitude der Lufttemperatur ca. 20 K mit einem Maximum von 18,5 °C im Juli und einem Minimum von -1,5 °C Ende Januar. Die Globalstrahlung liegt im Durchschnitt bei 125 W/m². Maximale Werte mit 250 W/m² fallen in die Sommermonate. Der mittlere Jahresgang der relativen Feuchte weist im Dezember und Januar Werte von über 90 % auf. Zwischen April und August liegen die Werte bei 70 %.

Basierend auf dem RCP8.5-Szenario wurde für die Lufttemperatur ein Klimasignal von ungefähr +2 K im Mai und +4 K in den Sommermonaten Juli und August ermittelt (siehe Abbildung 5-1). Für die relative Feuchte ist eine deutliche Abnahme mit bis zu 5 % im August zu verzeichnen. Damit werden die Sommermonate unter Annahme eines RCP8.5 Szenarios trockener und heißer.

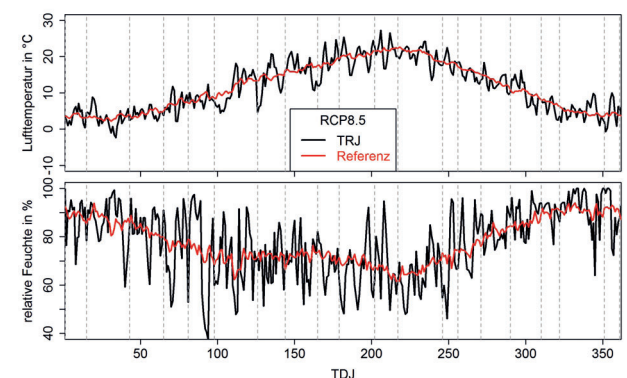


Abb. 5-4: Jahresgang der Tagesmittelwerte der Referenz (rot) und des zugehörigen Testreferenzjahrs (TRJ, schwarz) für RCP8.5 für die meteorologischen Größen Lufttemperatur (oben) und relative Feuchte (unten). Die senkrechten grauen Linien kennzeichnen die gewählten Witterungsabschnitte (TDJ = Tag des Jahres).

Im Folgenden wird kurz auf die zu den Referenzen ermittelten Testreferenzjahre eingegangen. Das TRJ der Gegenwart besteht aus insgesamt 18 Witterungsabschnitten (siehe Abbildung 5-3). Diese Witterungsabschnitte wurden aus den Jahren 1990–2012 ausgewählt und stammen zu etwa 60 % aus der Periode 1990–1999. Etwa 45 % der Witterungsabschnitte erstrecken sich über eine Länge von 20 bis 30 Tagen.

Das TRJ des Szenarios RCP8.5 besteht aus insgesamt 20 Witterungsabschnitten, welche insgesamt aus dem Zeitraum 1990–2014, jedoch mit lediglich etwa 30 % aus der Periode 1990–1999 stammen. Diese Witterungsabschnitte sind tendenziell etwas kürzer als für das TRJ der Gegenwart. Die Maximallänge von 30 Tagen wird nicht erreicht. Die Hälfte der Witterungsabschnitte ist weniger als 20 Tage lang.

Der Vergleich des Jahresgangs des TRJs der Gegenwart mit der zugehörigen Referenz (Abbildung 5-3) zeigt, dass das TRJ dem Verlauf der Referenz folgt und der Jahresgang wiedergegeben werden kann. Gleichzeitig beinhaltet das TRJ aber die natürliche Variabilität der Zeitreihen, welche nicht durch die Referenz wiedergegeben werden kann. Weiterhin kann durch die Nutzung des TRJ sichergestellt werden, dass alle berücksichtigten Größen untereinander konsistent sind.

5 Fazit

Mit dieser Methode zur Erstellung von Testreferenzjahren stehen für solche hier betrachteten Anwendungen nun erstmals für die experimentelle Klimafolgenforschung realistische Witterungs- und Emissionsdatensätze für die Simulation verschiedener Zukunftsszenarien für einen bestimmten Standort zur Verfügung.

Die hier vorgestellten Testreferenzjahre wurden abschließend an die technischen Limitationen der Klimakammern angepasst. So mussten Grenzwerte und maximal mögliche Änderungsraten der Steuerungsgrößen in die finalen Datensätze, die für die Programmierung der Klimakammern verwendet wurden, einfließen.

Die in diesem Beitrag beschriebene Methodik wurde für den Mittelgebirgsstandort Spessart angewendet, lässt sich aber mit entsprechend verfügbaren Messdaten auf andere Regionen übertragen. Zudem ist das Verfahren auf analoge Fragestellungen bei Identifikation der die Zielgröße bestimmenden Leitvariablen flexibel anpassbar.

6 Förderhinweis

Dieses Projekt wurde im Rahmen des vom Umweltbundesamt (UBA) geförderten F&E-Projekts valORTree (Validierung des phytotoxischen Ozonflusses in Nadeln und Blättern als Voraussetzung einer realitätsnahen, integrierten Risikobewertung für die Ökosystemleistungen von

Wäldern in Deutschland, FKZ 3717 51 257 0) im Auftrag der TU München von der MeteoSolutions GmbH durchgeführt.

Literatur

BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR), 2017: Handbuch: Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf>, zuletzt geprüft am 25.01.2021.

HÜBENER, H., SPEKAT, A., BÜLOW, K., HÜBENER, H., SPEKAT, A., BÜLOW, K., FRÜH, B., KEULER, K., MENZ, C., RADTKE, K., RAMTHUN, H., RATHMANN, T., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., 2017a: ReKliEs-De Nutzerhandbuch: REKLIES-DE Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.

HÜBENER, H., BÜLOW, K., FOOKEN C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S., KEULER, K., MENZ, C., MOHR, V., RADTKE, K., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., WOLDT, M., 2017b: ReKliEs-De Ergebnisbericht: REKLIES-DE Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.

Autoren

DR. ULRIKE GELHARDT
MeteoSolutions GmbH
Wilhelminenstraße 2
64283 Darmstadt
ulrike.gelhardt@meteosolutions.de

DR. FANNY KITTLER
MeteoSolutions GmbH
Wilhelminenstraße 2
64283 Darmstadt
fanny.kittler@meteosolutions.de

JÜRGEN LANG
MeteoSolutions GmbH
Wilhelminenstraße 2
64283 Darmstadt
juergen.lang@meteosolutions.de

PROF. DR. LUDGER GRÜNHAGE
Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Pflanzenökologie
Heinrich-Buff-Ring 26
35392 Gießen
gruenhageludger@gmail.com

DR. MANUELA BAUMGARTEN
Technische Universität München
Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2
85354 Freising
manuela.baumgarten@tum.de

S. HETTRICH, W. A. MÜLLER, U. CUBASCH, H. FELDMANN, B. FRÜH, J. GRIEGER, CH. KADOW, F. KASPAR, CH. KOTTMEIER, A. PAXIAN, I. POLKOVA, J. SCHEFFLER, D. STAMMER, B. TIEDJE, U. ULBRICH, F.S.E. VAMBORG, J. MAROTZKE

6

MiKlip – von einem wissenschaftlichen Konzept zu einem prä-operationellen System für dekadische Klimavorhersagen

MiKlip – turning a scientific concept into a pre-operational system for decadal climate predictions

Zusammenfassung

Dekadische Klimavorhersagen füllen die Lücke zwischen saisonalen Klimavorhersagen und langzeitigen Klimaprojektionen und ermöglichen damit der Wirtschaft und dem öffentlichen Sektor die Entwicklung zukunftsfähiger Handlungsstrategien. MiKlip (**M**ittelfristige **K**limap**ro**gnosen) war ein nationales, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt, das die wissenschaftlichen Grundlagen der Klimavorhersagbarkeit erforschte und ein Klimavorhersagesystem mit einem Zeithorizont von einem Jahr bis zu zehn Jahren entwickelte. Hier stellen wir dar, wie während des Projektes aus einem wissenschaftlichen Konzept der Prototyp eines operationellen Vorhersagesystems entstand, welche wissenschaftlichen Fragen untersucht und welche Klimainformationen für private wie öffentliche Nutzer bereitgestellt wurden.

Summary

Decadal climate predictions fill the gap between seasonal climate forecasts and long-term climate projections; they support private and public sectors in developing sustainable strategies for the future. MiKlip (German for mid-term climate prediction) was a national research project funded by the Federal Ministry of Education and Research to investigate the scientific basis for climate predictability and to develop a climate prediction system for a time horizon of one year up to ten years. Here we present how during the project a scientific concept was transformed into the prototype of an operational forecasting system, which scientific questions were addressed, and which climate information was provided to public and private users.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten ist die globale Klima- veränderung mit ihren Auswirkungen immer deutlicher in Erscheinung getreten. Daher gibt es in der Gesellschaft einen steigenden Bedarf an zuverlässigen Informationen über die zukünftigen klimatischen Entwicklungen. Nicht nur die langzeitlichen Entwicklungen, sondern auch mittelfristige Klimavorhersagen, die sich über Zeitspannen von einem Jahr bis zu zehn Jahren erstrecken, sind für viele Entscheidungen und Planungen sowohl in der Wirtschaft, als auch im öffentlichen Sektor von besonderem Interesse. Klimaprojektionen sind dafür mitunter zu langfristig ausgelegt, Wettervorhersagen oder saisonale Vorhersagen zu kurzfristig. Hieraus ist ein Bedarf an dekadischen Klimavorhersagen erwachsen.

Bis 2011 befassten sich nur wenige Studien mit dem Thema dekadischer Klimavorhersagen, die sich zudem deutlich in

ihrer wissenschaftlichen Fragestellung und ihrer Methode, wie der Ausgangszustand für die Modellsimulationen bestimmt wird („Initialisierung“, siehe MAROTZKE 2016), unterschieden. Eine vergleichende Bewertung dieser unterschiedlichen Ansätze war nur eingeschränkt möglich. Ein konsolidiertes und wissenschaftlich belastbares System ist jedoch die Grundvoraussetzung für den operationellen Betrieb dekadischer Klimavorhersagen. Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde von 2011 bis Anfang 2020 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das MiKlip-Projekt (MiKlip steht für „**M**ittelfristige **K**limap**ro**gnosen“) gefördert. Einerseits sollten die wissenschaftlichen Grundlagen dekadischer Klimavorhersagbarkeit ausgebaut werden, andererseits sollte daraus ein operationelles dekadisches Klimavorhersagesystem entwickelt werden, welches den Anforderungen aus Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlichem Sektor gerecht wird. MiKlip bestand aus vier Forschungsmodulen sowie einem Synthesemodul, welches das globale Vorhersage- und Eva-

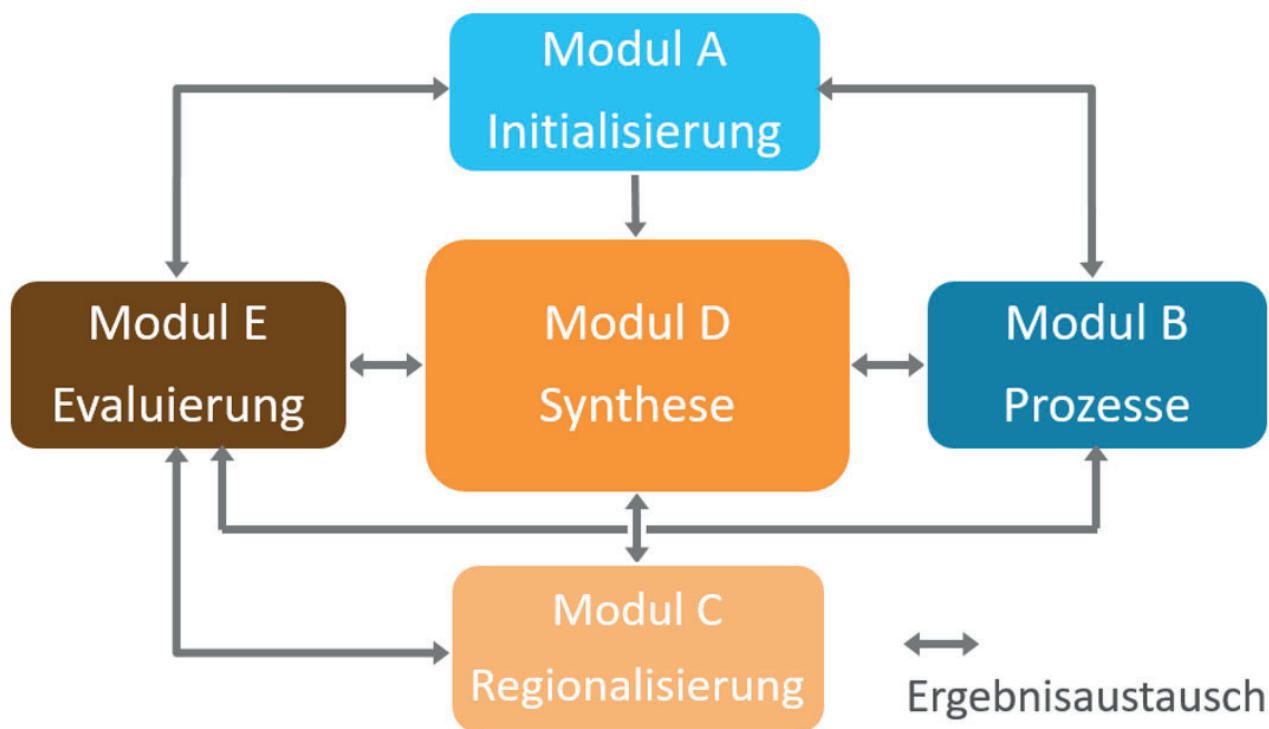


Abb. 6-1: Die fünf Themenbereiche (Module) von MiKlip II. Modul A untersuchte die Initialisierungsmethoden und -daten sowie Ensembleerzeugung dekadischer Klimavorhersagen., Modul B betrachtete klimarelevante Prozesse, Modul C erstellte regionalisierte Klimavorhersagen mit Fokus auf Europa, und Modul E untersuchte die Vorhersagegüte durch prozessbasierte Evaluierungsmethoden sowie Nachprozessierung und erzeugte Daten für die Evaluierung. Zentraler Knotenpunkt in MiKlip war Modul D, welches die Ergebnisse der einzelnen Module in ein globales Vorhersage- und Evaluierungssystem synthetisierte. Modul D koordinierte das Gesamtprojekt und bildete die Schnittstelle zu den anwendungsorientierten Auswertungen.

luierungssystem entwickelte (Abbildung 6-1). Das Projekt verlief in zwei Phasen über einen Zeitraum von jeweils ungefähr vier Jahren. In der ersten Phase wurden die wissenschaftlichen Grundlagen erforscht und die Realisierbarkeit dekadischer Klimavorhersagen geprüft (MAROTZKE 2016). Hier wurde ein vertieftes Verständnis der Vorhersagbarkeit klimatischer Trends und Ereignisse auf dekadischer Zeitskala geschaffen und in ersten Versionen des Vorhersagesystems geprüft.

In der zweiten Phase von MiKlip, die hier genauer beschrieben wird, wurde ein prä-operationelles System entwickelt, das nach wissenschaftlicher Evaluation in den operationellen Betrieb des Deutschen Wetterdienstes (DWD) integriert wurde. Ein Meilenstein zur Veranschaulichung der MiKlip-Projektresultate war die Bereitstellung und Visualisierung der aktuellen dekadischen Klimavorhersagen auf der eigens entwickelten MiKlip-Vorhersage-Webseite. Ferner wurden zwei Pilotprojekte als Schnittstelle zu nicht-klimawissenschaftlichen Anwendern aus dem öffentlichen und privatwirtschaftlichen Sektor durchgeführt. Weitere grundlegende Bausteine waren die methodische Weiterentwicklung in den Bereichen Initialisierung, Prozesse, Regionalisierung und Evaluierung sowie die Identifikation und Beantwortung neuer Fragestellungen wie die Nachprozessierung (z. B. Bias-Korrektur) dekadischer Klimavorhersagen und die Vorhersagbarkeit weiterer, bisher noch nicht

berücksichtigter Erdsystemkomponenten, insbesondere des Kohlenstoffkreislaufs.

2 Dekadische Klimavorhersagen und die MiKlip-Vorhersage-Webseite

Ein wesentliches Anliegen von MiKlip war die Erstellung aktueller dekadischer Klimavorhersagen. Ab 2017 wurde hierfür eine Vorhersage-Webseite mit aktuellen Vorhersagen und Hintergrundinformationen eingerichtet (<https://www.fona-miklip.de/decadal-forecast/decadal-forecast-for-2019-2028/>). Ziel der MiKlip-Vorhersage-Webseite war es, die Ergebnisse der dekadischen Klimavorhersagen zu veröffentlichen und über eine interaktive Schnittstelle der Öffentlichkeit verständlich zu erklären. Bei der Entwicklung der Vorhersage-Webseite war es wichtig, eine Balance zu finden zwischen den Ansprüchen potentieller Nutzer, die sich zuerst einmal für die Vorhersageergebnisse interessieren, und der wissenschaftlichen Evaluierung der Vorhersagen (KADOW 2020).

Die dargestellten Vorhersagen bauen auf der Entwicklung sowohl eines globalen als auch eines regionalen Vorhersagesystems auf. Das globale System basiert auf dem globalen Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie MPI-ESM (*Max Planck Institute Earth*

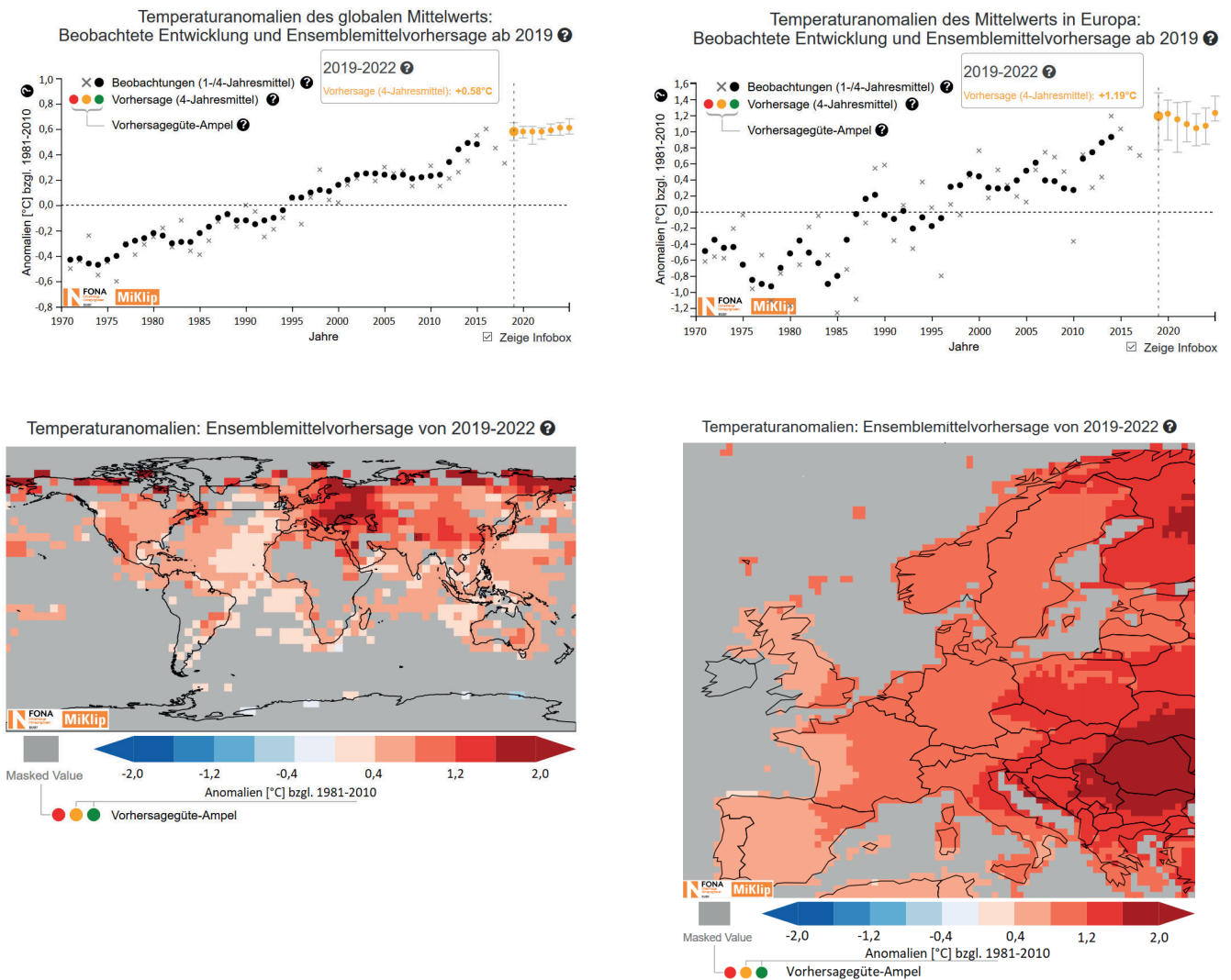


Abb. 6-2: (oben) MiKlip-Vorhersage der globalen Mitteltemperatur (links) und der Mitteltemperatur in Europa (rechts) für den Zeitraum 2019 bis 2028. Gezeigt sind 4-Jahresmittelwerte der Temperaturabweichungen sowie deren Streubreite. Gezeigt sind ferner Beobachtungsdaten ab 1970 für jährlich gemittelte Temperaturabweichungen (graue Kreuze), sowie deren 4-Jahresmittelwerte (schwarze Punkte). Aussagen über die Zuverlässigkeit der Vorhersagen lassen sich anhand der Vorhersageampel und den daraus resultierenden Farben für die künftigen 4-Jahresmittel treffen. Vergleichsreferenz ist das 30-Jahresmittel von 1981 bis 2010. (unten) Ensemblemittelvorhersage der (links) globalen und (rechts) europäischen Temperaturabweichungen für den Zeitraum 2019 bis 2022. Dargestellt sind Temperaturen nur für die Gitterpunkte, deren Vorhersagegüte signifikant besser ist als die Klimatologie oder historische Klimasimulation. Die Abbildungen stammen von der MiKlip-Vorhersage-Webseite (www.fona-miklip.de, aktualisiert im Januar 2019).

System Model; GIORGETTA 2013, MÜLLER 2018); zusätzlich wurden seit 2018 mittels des regionalen Klimamodells COSMO-CLM (*Consortium for Small-Scale Modelling in Climate Mode*) auch Vorhersagen mit einem regionalen Fokus auf Europa veröffentlicht (FELDMANN 2019). Dies war weltweit das erste Mal, dass regionale Klimavorhersagen auf diesen Zeitskalen publiziert wurden. Weitere essentielle Elemente der Vorhersagesysteme bestehen aus einer geeigneten Initialisierung, nachgewiesener Überprüfung der Vorhersagegüte und der Nachprozessierung der Vorhersagen. Die methodischen Entwicklungen sind umfassend in Abschnitt 3 dargestellt.

Sämtliche Vorhersagen, sowohl die globalen, als auch die regionalen, unterliegen einer Prüfung der Vorhersa-

güte, bevor sie auf der MiKlip-Webseite veröffentlicht werden. Dazu werden für die aktuell genutzte Version des Vorhersagesystems ab dem Jahr 1961 „Hindcasts“ gerechnet. Hierbei handelt es sich um retrospektive Vorhersagen – initialisiert mit dem Klimazustand des Jahres 1961, 1962 etc. –, und die Ergebnisse werden mit den tatsächlichen Beobachtungsdaten sowie nicht-initialisierten Simulationen verglichen. Letztere entsprechen den anfangs genannten Klimaprojektionen für die Simulationsperiode mit historisch beobachtetem Treibhausgasgehalt der Atmosphäre. Die so ermittelte Vorhersagegüte ermöglicht eine Einschätzung, welche vom Vorhersagesystem erzeugten Klimainformationen vertrauenswürdig sind. Die Information über die Vorhersagegüte wird auf der Webseite gemeinsam mit der Vorhersage dargestellt und erläutert.

Die MiKlip-Vorhersage-Webseite stellt den Prototyp einer operationellen Vorhersage dar und zeigt zunächst nur bodennahe Temperaturvorhersagen für die gesamte Erdoberfläche (Abbildung 6-2). Es werden Temperaturvorhersagen im Jahresmittel und für laufende 4-Jahresmittel gezeigt. Die Mittelung dient dazu, eventuelle hochfrequente Schwankungen aufgrund natürlicher Variabilität herauszufiltern. Dargestellt werden Vorhersagen mit 5° räumlicher Auflösung global und 0,5° über Europa sowie räumliche Mittel für den Nordatlantik, Europa und global. Die Vorhersagen werden auf zwei unterschiedliche Arten angezeigt, einmal als Mittelwert des Ensembles und einmal als statistische Verteilung aller Ensemblemitglieder.

Für die erleichterte Einschätzung der Vorhersagegüte auf einen Blick werden Ampelfarben verwendet (Abbildung 6-2). Grün steht für eine signifikante Verbesserung der Vorhersagegüte gegenüber den beiden alternativ verwendeten Referenzvorhersagen, beobachtete Klimatologie und nicht-initialisierte Simulation des historischen Klimas. Gelb deutet an, dass es zumindest gegenüber einer der beiden Referenzvorhersagen eine signifikante Verbesserung gibt, wohingegen rot bedeutet, dass es keine signifikante Verbesserung der Vorhersage gegenüber den beiden Referenzen gibt. In den Karten werden die Vorhersagen nur für die Gitterboxen gezeigt, für die die Ampel grün oder gelb anzeigt (Abbildung 6-2 unten). Seit Projektende werden die dekadischen Klimavorhersagen (ab dem Vorhersagezeitraum 2020–2029) im operativen Betrieb auf der Klimavorhersage-Webseite des DWD veröffentlicht, siehe <https://www.dwd.de/klimavorhersagen>.

3 Entwicklung des MiKlip-Klimavorhersage- und Evaluierungssystems

Die Grundlagen für das MiKlip-Vorhersagesystem sind das globale Erdsystemmodell MPI-ESM sowie das regionale COSMO-CLM mit dem Fokus auf Europa. Das integrierte Evaluierungssystem FREVA (Freie Universität Berlin Evaluation System) bildet das Bindeglied zwischen den Entwicklungen des globalen und regionalen Modells sowie der Evaluation der Vorhersagegüte und der Publikation der Ergebnisse auf der Webseite. Im Folgenden sind die Entwicklung des zentralen Vorhersage- und Evaluierungssystems (MiKlip Modul D) skizziert sowie beispielhafte Ergebnisse aus den weiteren Modulen (A, B, C und E) beschrieben.

3.1 Das globale Vorhersagesystem basierend auf MPI-ESM (Modul D)

Das MPI-ESM ist ein gekoppeltes Erdsystemmodell und integriert die Komponenten Ozean, Atmosphäre, Land, Meereis und Ozeanbiogeochemie (GIORGETTA 2013). Die neueste Modellversion wurde für CMIP6 (CMIP: *Coupled Model Intercomparison Project*, Projekt des Weltklimaforschungsprogramms WCRP zum Vergleich gekoppelter Klimamodelle) zur Verfügung

gestellt, standardmäßig in einer räumlich relativ niedrigen Auflösung (MPI-ESM1.2-LR). Für das Vorhersagesystem in MiKlip II wurde MPI-ESM eigens zu einer höheren Auflösung weiterentwickelt (MPI-ESM1.2-HR, MÜLLER 2018). Dies ist auch die Modellversion, die für operationelle saisonale Klimavorhersagen benutzt wird. Die Auflösung beträgt in der Atmosphäre horizontal zirka 100 km, mit 95 vertikalen Schichten, und im Ozean horizontal nominell zirka 0,4°, mit 40 vertikalen Schichten.

Die Güte der dekadischen Vorhersagen mit MPI-ESM1.2-HR wurde durch Hindcasts für einen Zeitraum bestimmt, für den anhand verfügbarer Beobachtungen geeignete Anfangsbedingungen für das Modell erstellt werden konnten (Initialisierung – Modul A). Der Zeitraum (1961 bis heute) wurde vor allem aufgrund der gegenüber früheren Perioden verbesserten Verfügbarkeit ozeanischer Messgrößen gewählt. Zunächst wurden in einem Assimilationslauf bestehende Reanalyseprodukte des EZMW (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen) mithilfe einer einfachen numerischen Methode (*nudging* – siehe auch Modul A) bei jedem Zeitschritt mit dem Modellzustand, und je nach Methode auch mit der Modellklimatologie, verknüpft (assimiliert). Für das zentrale Vorhersagesystem wurden die ERA40/ERA-Interim-Reanalysen des EZMW für die Atmosphärenkomponente im *Full-Field*-Verfahren und die ORAS4-Reanalysen für die Ozeankomponente im Anomalie-Verfahren verwendet (siehe hierzu auch Modul A zur Beschreibung der Verfahren). Zusätzlich wurden die Meereiskonzentrationen (NSIDC: *National Snow and Ice Data Center*) assimiliert. Dabei wurde das Anomalie-Verfahren gewählt, um mögliche Süßwassereinträge aufgrund der unterschiedlichen Klimatologien zu vermeiden. Als Randbedingungen z.B. für Ozon, Aerosol, Sonneneinstrahlung und die Landnutzung wurden die aktuellen Datensätze des CMIP6 verwendet.

Mit den Anfangswerten aus dem Assimilationslauf wurden schließlich die Hindcasts gerechnet. Insgesamt wurde ein Ensemble von zehn Mitgliedern erstellt, indem der Zustand des Klimasystems im Modell zu Beginn der Simulation für das jeweilige Startjahr (Anfangsbedingungen) für jedes Ensemblemitglied um einen weiteren Tag versetzt wurde. Das Modell wurde schließlich für jedes Ensemblemitglied und jährliche Initialisierung zehn Jahre in die Zukunft gerechnet. Dabei entstanden zirka 6000 Modelljahre, die für die Bestimmung der Vorhersagegüte herangezogen wurden.

Die Vorhersagegüte unserer dekadischen Klimavorhersagen ist positiv gegenüber der Klimatologie als Referenzvorhersage für die globale 2 m Lufttemperatur für die Vorlaufzeit von 1-10 Jahren (siehe BORCHERT 2019, POHLMANN 2019) und liefert relevante Klimainformationen, beispielsweise für Anwendungen, die das Trendverhalten der kommenden 10 Jahre nutzen wollen. Wissenschaftliches Interesse besteht darüber hinaus daran, inwieweit die Initialisierung der internen Klimavariabilität

über den Trend hinaus die Vorhersagegüte verbessert. Zu diesem Zweck wurden auch die historischen (nicht-initialisierten) Läufe als Referenzvorhersagen herangezogen. Dabei wurde deutlich, dass die Vorhersagegüte zwar stark vom Trend beeinflusst wird, zusätzlich jedoch regional die interne Klimavariabilität vorhergesagt und somit die Vorhersagegüte verbessert werden kann. Hervorzuheben ist die subpolare Region im Nordatlantik. Sie ist insbesondere wichtig für die Fernwirkung der internen Variabilität des Nordatlantik hin zur erhöhten Vorhersagbarkeit über dem eurasischen Kontinent (BORCHERT 2019).

Das Vorhersagesystem weist ferner Vorhersagegüte anderer physikalisch relevanter Größen auf, zum Beispiel Sturmzugbahnen, Starkwinde und blockierende Wetterlagen in den nördlichen Extratropen (SCHUSTER 2019) oder die quasi-biennale Oszillation (QBO) in den Tropen (POHLMANN 2019). Die hohe Vorhersagegüte dieser dynamischen Größen in den nördlichen Extratropen ist vielversprechend und geht einher mit der Verbesserung dieser Größen durch die höher aufgelöste Atmosphärenkomponente in MPI-ESM-HR (MÜLLER 2018, SCHUSTER 2019). Erwähnenswert ist ferner die Vorhersagegüte von gesellschaftlich relevanten Größen, wie die Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Sommertemperaturen über den nördlichen Extratropen (BORCHERT 2019) oder die Vorhersagbarkeit mehrjähriger Dürren (PAXIAN 2019).

3.2 Modell-konsistente Anfangsbedingungen (Modul A)

Die Bestimmung der Anfangsbedingungen nebst Aufspannen eines passenden Ensembles war das zentrale Anliegen von Modul A. Da die Atmosphäre und der Ozean in der Realität durch Energieübertragung und Stoffflüsse eng miteinander verbunden sind, müssen diese auch im Modell örtlich und zeitlich genau aufeinander abgestimmt sein. Deshalb ist die Entwicklung von Methoden zur Implementierung der Anfangsbedingungen und das Klimamodell von großer Bedeutung. Modul A untersuchte verschiedene solcher Methoden um die Anfangsbedingungen möglichst naturgetreu abzubilden (POLKOVA 2019). Als Referenz wurde ein häufig eingesetztes Assimilationsverfahren basierend auf der „Nudging-Methode“. Nudging ist eine sequentielle Datenassimilationsmethode, bei der die Modellfelder durch das Hinzufügen eines Quellterms so modifiziert werden, dass sie mit den Beobachtungen übereinstimmen.

In MiKlip wurden mehrere Methoden getestet, darunter das Anomalie-Verfahren und das *Full-Field*-Verfahren. Im Anomalie-Verfahren werden lediglich die beobachteten Anomalien zu jedem Zeitschritt in die Modelllösungen assimiliert. Dies hat den Vorteil, dass das gewöhnliche Modellverhalten (Modellklimatologie) nicht beeinflusst wird. Alternativ kann das Modell so nah wie möglich an die Absolutwerte der Beobachtungen angepasst werden (*Full-Field*-Verfahren). In beiden Fällen entstehen systematische Fehler, die über nachträgliche Driftadjustierung korrigiert werden können.

Das bestehende Nudging-Verfahren hat sich zwar für die Klimavorhersagen mit dem MPI-ESM als geeignet erwiesen (MAROTZKE 2016, POHLMANN 2019), es gibt allerdings grundsätzliche Einschränkungen hinsichtlich des Modellverhaltens und auch des Arbeitsablaufes zur Bestimmung der Vorhersagegüte und Erstellung der Vorhersagen. Eine Vergleichsstudie der Vorhersagesysteme aus MiKlip I (2011 bis 2015) weist in allen Assimilationsläufen Diskontinuitäten des ozeanischen Wärmeinhalts im Nordatlantik nach, die auf den Gebrauch von externen Assimilationsprodukten und deren Assimilation im Nudging-Verfahren zurückzuführen sind. Änderungen im ozeanischen Wärmeinhalt werden bei dieser Vorgehensweise nicht allein durch die Summe aller Wärmeflüsse an der Oberfläche und im Ozeaninneren verursacht, sondern es entstehen auch künstliche Flüsse, welche die Vorhersagegüte im Nordatlantik signifikant degradieren (KRÖGER 2017). Für die Verbesserung der Konsistenz zwischen dem Modell und die assimilierten Beobachtungen werden in MiKlip II (2015 bis 2019) diesbezüglich weitere Verfahren erprobt und deren Verbesserungen gegenüber dem Basissystem (Nudging-Verfahren) verglichen (POLKOVA 2019 und Referenzen).

Der Ensemble-Kalman-Filter (EnKF) wurde zur Weiterentwicklung kommender Systeme ausgewählt, da er sich als Verbesserung gegenüber dem Basissystem erweist. So zeigten Hindcasts auf der Grundlage von MPI-ESM1.2-LR und dem EnKF gegenüber dem Basissystem deutliche Verbesserungen der Vorhersagegüte für verschiedene Größen im Nordatlantik und Pazifik (BRUNE 2018). Mit einer Verbesserung der Vorhersagbarkeit im Nordatlantik können auch genauere Vorhersagen über dem Eurasischen Kontinent erwartet werden. Dies ist jedoch noch Gegenstand der Forschung.

Des Weiteren beinhaltet der EnKF eine „modell-konsistente-Assimilation“, da Beobachtungen direkt in das MPI-ESM assimiliert werden. Dies mildert den „Initialisierungsschock“, eine anfänglich starke Drift, die auftritt, wenn das Modell aus einem Zustand gestartet wird, der nicht aus diesem Modell selbst herrührt. Der EnKF macht zudem das Vorhersagesystem unabhängiger von der Entwicklung externer Ozean-Reanalysen, die von anderen Arbeitsgruppen mit ihren jeweiligen Modellen erstellt werden.

3.3 Prozesse und Modellauflösung (Modul B)

Ein weiteres Ziel von MiKlip war ein verbessertes Grundverständnis dekadischer Klimavorhersagen, unter anderem durch die Identifikation maßgeblicher physikalischer Prozesse für die Vorhersagbarkeit auf dekadischen Zeitskalen sowie deren Sensitivität gegenüber unterschiedlichen Modellauflösungen und Modellfehler (Bias). So untersuchte Modul B in MiKlip II stratosphärische Prozesse und wie diese durch Änderungen im solaren und vulkanischen Antrieb beeinflusst werden (TIMMRECK 2016), außerdem wie Atmosphäre-Ozean-Kopplung und Bias die dekadische Klimavariabilität beeinflussen (DREWS 2016) und in welchem Maße sich die Variabilität der ozeanischen Koh-

lendioxidaufnahme beschreiben und vorhersagen lässt (LI 2016).

Besonders erwähnenswert sind Arbeiten zur Vorhersagbarkeit der Aufnahme von Kohlenstoff im Ozean. Der Ozean stellt ein enormes Kohlenstoffreservoir dar und übersteigt die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre um das Tausendfache. Die Ozeane nehmen derzeit etwa 25 bis 30 % der jährlichen anthropogenen CO₂-Emissionen auf, wobei dem Nordatlantik und dessen Tiefenkonvektion eine Schlüsselrolle zukommt. Mithilfe des MiKlip-Vorhersagesystems konnte zum ersten Mal gezeigt werden, dass die CO₂-Aufnahme des Ozeans vorhersagbar ist (LI 2016). Insbesondere im Nordatlantik, wo starke dekadische Schwankungen der ozeanischen CO₂-Aufnahme zu beobachten sind, zeigt das System eine Vorhersagbarkeit derselben bis zu 4-7 Jahren im Voraus (LI 2016). Dies ist bemerkenswert, da es der erste Nachweis ist, dass dekadische Klimavorhersagen über die klassischen physikalischen Parameter hinaus (wie etwa Temperatur, Druck, Salzgehalt) machbar sind. Auf der Grundlage komplexer biochemischer Prozesse wird zum ersten Mal eine integrierte Größe des Erdsystems (CO₂-Aufnahme) prognostiziert.

Die CO₂-Aufnahme des Ozeans bestimmt, zusammen mit der Biosphäre, den Anteil der anthropogenen Emissionen, die in der Atmosphäre verbleiben, und regeln somit über den anthropogenen Treibhauseffekt die gegenwärtige und zukünftige Klimaerwärmung. Die Paris-Vereinbarung des UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) formuliert als Ziel eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C bis 2 °C, was unmittelbar eine globale CO₂-Bestandsaufnahme und Emissionsreduktion verlangt. Eine wesentliche Herausforderung in diesem Zusammenhang ist aber die Vorhersage der ozeanischen CO₂-Aufnahme für die kommenden Dekaden sowie das Verständnis derer Unsicherheiten (MAROTZKE 2017). Mit dem dekadischen Klimavorhersagesystem ist somit ein Werkzeug für die Überwachung und die Vorhersage einer der wichtigsten CO₂-Senken geschaffen worden.

3.4 Regionalisierung dekadischer Klimavorhersagen (Modul C)

Mitunter sind für Anwendungen Klimainformationen in hoher räumlicher Auflösung nötig. Ein erklärtes Ziel von MiKlip war die Entwicklung regionaler dekadischer Klimavorhersagen und die Bereitstellung von lokalen nutzerorientierten Klimainformationen, die aufgrund der groben Auflösung des globalen Modells nicht oder nur eingeschränkt möglich sind. Insgesamt wurde in Modul C eine vollständige Regionalisierung für vier Hindcast-Generationen durchgeführt. Zusammen mit den nicht-initialisierten historischen Simulationen sowie weiteren Sensitivitätssimulationen stehen zirka 20.000 Simulationsjahre mit dem COSMO-CLM zur Verfügung. Dieser große Pool an regionalen Simulationen ist auch über die dekadischen Prognosen hinaus von großem Wert, insbesondere bei der Untersuchung von Extremereignissen.

Bereits in MiKlip I wurde die Initialisierung der regionalen Hindcasts getestet, sowie die grundlegende Vorhersagegüte und der Mehrwert der Regionalisierung von ersten kleineren Hindcast-Ensembles erkannt (z.B. MIERUCH 2014). Allerdings waren für einen prä-operationellen Betrieb die Informationen für eine systematische Bestimmung der Vorhersagegüte noch lückenhaft. Einerseits war die Anzahl der Startzeitpunkte zu gering, andererseits war die Verschiedenartigkeit der Regionalmodelle zu hoch, was zu einer unvollständigen Abbildung der Vorhersagegüte führte. In MiKlip II wurden das zentrale regionale Vorhersagesystem basierend auf dem COSMO-CLM weiterentwickelt und ein vollständiger Satz Hindcasts mit jeweils 10 Ensemblemitgliedern erstellt.

Eine Reihe von Auswertungen zur Verifikation regionaler dekadischer Klimavorhersagen unterstützen den Mehrwert der Initialisierung des regionalen Modells für Europa gegenüber dem globalen Modell (z.B. REYERS 2019, FELDMANN 2019). Gegenüber der Klimatologie weisen die regionalen Hindcasts durchweg eine positive Vorhersagegüte für bodennahe Temperaturen, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten auf. Auch gegenüber nicht-initialisierten Experimenten unterstreichen die regionalen Hindcasts den Nutzen der Initialisierung, insbesondere in Südeuropa. Gegenüber den Hindcasts des globalen Modells zeigen die regionalen Hindcasts eine verbesserte Vorhersagegüte, insbesondere in Regionen mit komplexer Topographie, beispielsweise über Skandinavien oder Südosteuropa. FELDMANN (2019) wenden zusätzlich eine in MiKlip entwickelte Bias-Korrektur (Rekalibrierung – siehe Modul E) an und können die Vorhersagegüte der regionalen Hindcasts nochmals deutlich verbessern (Abbildung 6-3).

Dekadische Klimavorhersagen auf der Grundlage des regionalen Klimamodells konnten zudem für anwendungsorientierte Größen Klimainformationen auf regionaler Skala liefern. MÖMKEN (2019) analysieren das Potential der dekadischen Vorhersagen in Bezug auf Hitzewellen und Frosttage, Starkniederschläge und Stürme. Temperaturbezogene Indizes (Frosttage, Hitzetage) zeigen eine sehr hohe Vorhersagegüte mit Korrelationen bis $r=0,9$. MÖMKEN (2019) untersuchen ferner relevante Größen für den landwirtschaftlichen Sektor wie Wachstumstage und -dauer von Pflanzen. Diese Arbeiten machen deutlich, dass die MiKlip-Vorhersagen auch für anwendungsbezogene Fragestellungen verwendet werden können (siehe hierzu auch Abschnitt 4).

Der Aufwand an Rechenleistung ist derzeit jedoch noch sehr groß. Die Optimierung hinsichtlich des Ressourceneinsatzes bleibt eine offene Forschungsfrage.

3.5 Evaluierung dekadischer Klimavorhersagen (Modul E)

Essentiell für die Verwendung der Vorhersagen ist die Einschätzung ihrer Qualität, zum einen durch Verifikation der Hindcasts und zum anderen durch Evaluierung der im Modell repräsentierten Prozesse. Die Entwicklung von adäquaten Konzepten zur Verifikation der generierten

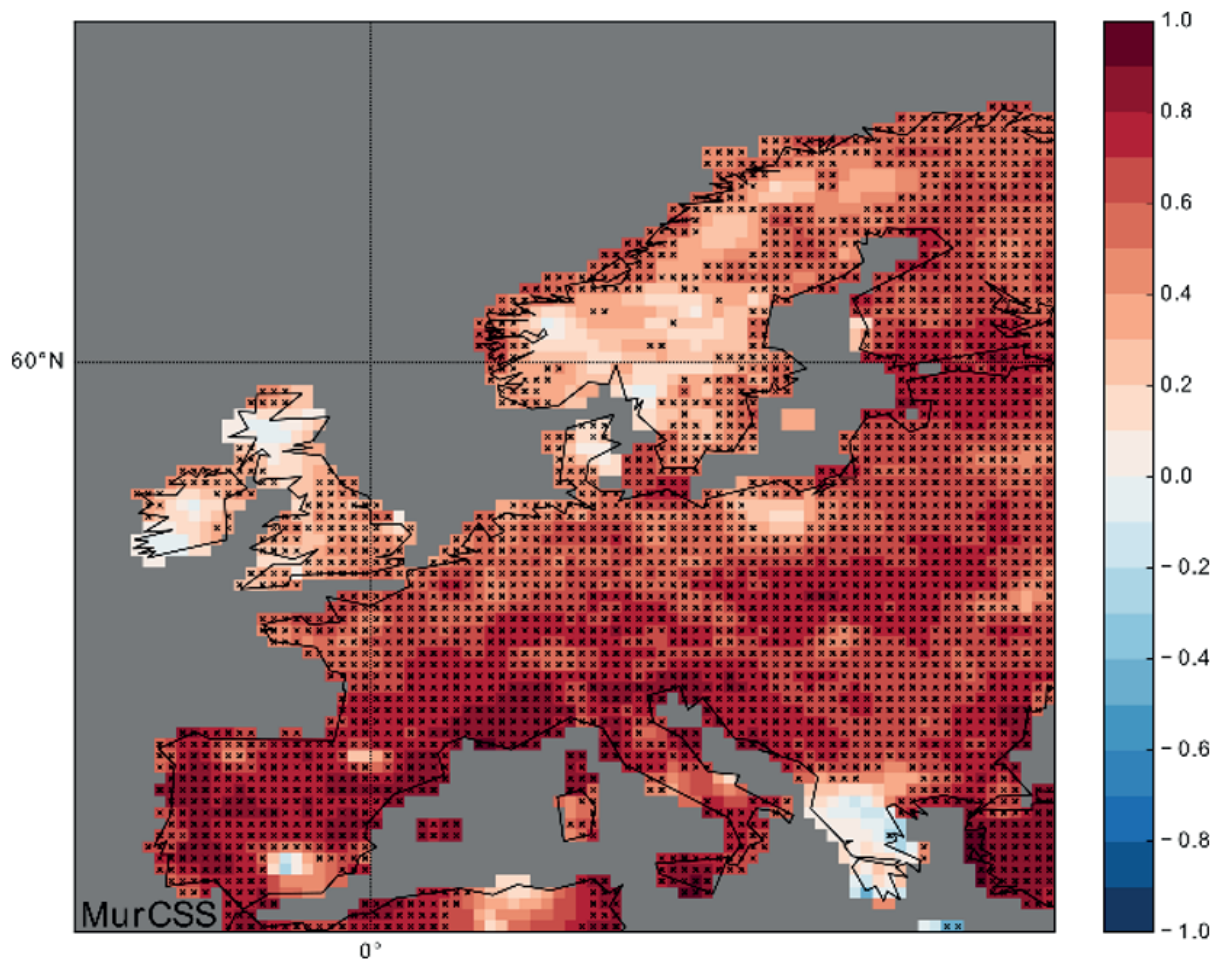


Abb. 6-3: Vorhersagegüte des regionalen Vorhersagesystems für die durchschnittliche Tageshöchsttemperatur im Sommer (JJA) für die Vorhersagejahre 2 bis 5, und für den Zeitraum 1965 bis 2011. Gezeigt ist die Vorhersagegüte unter Einbezug der Rekalibrierung. Dabei beschreiben positive/negative Werte eine bessere/schlechtere Vorhersagegüte der dekadischen Vorhersage gegenüber der Referenzvorhersage der Klimatologie, beides im Vergleich zu Beobachtungen. Die schwarzen Kreuze zeigen an, wo die Vorhersagegüte signifikant ist (aus FELDMANN 2019).

Hindcasts zusammen mit der Erstellung von neuen Datenprodukten zur Modellevaluierung waren die Hauptziele von Modul E. Ansätze zur prozessorientierten Evaluierung sowie zur Nachbearbeitung von Ensemblesimulationen zur Ableitung nutzerrelevanter und verlässlicher Wahrscheinlichkeitsvorhersagen (verlässlich im Sinne der Übereinstimmung der möglichen Ereignisvielfalt von Modell und Beobachtungen) waren ein weiteres zentrales Anliegen von Modul E. So knüpfte Modul E an die erste Phase von MiKlip an, in der gezeigt werden konnte, dass die Vorhersagegüte auch für abgeleitete Größen wie Zugbahndichten extra-tropischer Zyklone oder Winterstürme vorhanden ist (KRUSCHKE 2015, SCHUSTER 2019).

Zur Nachbearbeitung von dekadischen Vorhersagen waren bestehende Nachprozessierungsmethoden, wie sie etwa für Wahrscheinlichkeitsvorhersagen im Bereich saisonaler Klimavorhersagen entwickelt wurden, bisher nicht unmittelbar anwendbar. Voraussetzungen für die Anwendung werden maßgeblich von Stichprobengröße, zeitabhängigem Modellfehler (Drift) oder Klimatrends beeinflusst. Im Rahmen von Modul E wurde ein Verfahren entwickelt, das diese

Faktoren für eine Korrektur dekadischer Klimavorhersagen berücksichtigt (PASTERNAK 2018). Die Autoren verwenden ein statistisches Modell mit einem parametrischen Ansatz und weisen damit ein deutlich verbessertes Trendverhalten und Ensemblestreuung in den dekadischen Klimavorhersagen nach. Diese sogenannte Rekalibrierungsmethode ist nun Bestandteil der Nachprozessierung der MiKlip-Vorhersagen (Abschnitt 2).

4 Bereitstellung von Klimainformationen

Neben den wissenschaftlichen Zielsetzungen und der Entwicklung eines dekadischen Klimavorhersagesystems hatte MiKlip II zum Ziel, die Klimainformationen der interessierten Öffentlichkeit sowie potentiellen Anwendern aus Behörden und der Privatwirtschaft bereitzustellen. Dies wurde einerseits durch die Entwicklung der Webseite realisiert (siehe Abschnitt 2) und andererseits durch zwei Nutzerprojekte, die den Bedarf potentieller Anwender analysierten und anwendungsorientierte Auswertungen vornahmen. Für ausgewählte Fallstudien wurde Kontakt

zu Vertretern aus der Agrar-, Forst- und Wasserwirtschaft, der erneuerbaren Energien- und Tourismus-Branche, der Versicherungswirtschaft und aus humanitären Hilfsorganisationen aufgenommen. Ihr Interesse besteht beispielsweise an Veränderungen von Schwellenwert-Klimaindizes wie Hitzetagen, Hitzewellen, Sturmtagen und Vegetationszeiten, sowie an der jährlichen oder saisonalen Temperatur- und Niederschlagsverteilung, solaren Einstrahlung oder am Auftreten von Überflutungen, Dürren oder El Niño. Generell werden regionale Klimainformationen, mindestens in der räumlichen Auflösung des regionalen Vorhersagemodells bevorzugt oder benötigt.

Die Nutzerprojekte konnten zur Sensibilisierung der Nutzer für die noch wenig bekannten dekadischen Klimavorhersagen beitragen. Umfragen und Diskussionen auf Nutzer-Workshops zu möglichen dekadischen Vorhersageprodukten sowie zur MiKlip-Vorhersage-Webseite zeigen, dass es einen großen Bedarf und viele Anwendungsfelder für dekadische Klimavorhersagen in Behörden gibt. Allerdings ist für viele potentielle Anwender die Vorhersagegüte aus physikalischen, dynamischen oder systematischen Gründen noch begrenzt. Zudem sind nicht alle Nutzerwünsche aus wissenschaftlichen Gründen oder Ressourcen Gründen realisierbar. Nichtsdestotrotz können erste nutzerrelevante dekadische Vorhersageprodukte abgeleitet werden, deren Vorhersagegüte für spezifische Regionen, Zeiträume und Anwendungen quantifiziert werden kann. Rückmeldungen aus der Privatwirtschaft zu vorläufigen prototypischen Produkten zeigen, dass die erzielte Vorhersagegüte aber meist noch als zu niedrig für Entscheidungsfindungen eingestuft wird und zudem ein nutzergerechterer Zugang zu den Informationen (z. B. vereinfachte Darstellungen der Methoden, erweiterte persönliche Beratung) gefunden werden müsste, um die Nutzbarkeit der dekadischen Vorhersagen voranzubringen.

5 Ausblick

Mit den dekadischen Klimavorhersagen hat das MiKlip-Projekt die bis dahin existierende Lücke zwischen saisonalen Klimavorhersagen und den längerfristigen Klimaprojektionen geschlossen. Die Überführung des prä-operationellen globalen Klimavorhersagesystems aus dem Forschungsprojekt MiKlip in den Routinebetrieb des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde Anfang 2020 abgeschlossen. Damit werden die dekadischen Klimavorhersagen beim DWD routinemäßig erstellt, ausgewertet und auf einer Klimavorhersagen-Webseite (www.dwd.de/klimavorhersagen) im Rahmen des DWD-Internetportals angeboten. Sie ergänzen den langfristigen Teil der DWD-Entwicklungslinie „Nahtlose Vorhersagen und Projektionen auf allen Zeitskalen (*Seamless Prediction*)“.

Trotz aller Fortschritte besteht weiterhin Forschungsbedarf. Das derzeitige MiKlip-System mit seinen Komponenten bedarf einer stetigen Weiterentwicklung, um eine höhere Vorhersagegüte zu erreichen. Die derzeit wichtigste

Aufgabe besteht darin, das auf MPI-ESM basierende Vorhersagesystem auf das neue Erdsystemmodell ICON zu migrieren. Darüber hinaus ist die Entwicklung einer verbesserten Initialisierungsmethode beispielsweise auf Basis des Ensemble-Kalman-Filters vielversprechend. Aber auch die Assimilation zusätzlicher Beobachtungsdaten, insbesondere von Klimatelementen mit langem Gedächtnis, verbessert die Beschreibung des Anfangszustands des Klimasystems und hat damit potenziell einen positiven Einfluss auf die Vorhersagegüte. Zusätzlich werden weitere nutzerorientierte Vorhersageprodukte entwickelt, die bei geeigneter Wahl eine höhere Vorhersagegüte als die Standardvariablen aufweisen können. Um Nutzerwünsche nach hoher Auflösung erfüllen zu können, soll zeitnah eine rechenzeiteffiziente Regionalisierung mit einem statistischen Verfahren auf 6-12 km Auflösung über Deutschland aufgebaut werden.

Danksagung

MiKlip wurde vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen von FONA (Forschung für nachhaltige Entwicklung) gefördert und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, agierend als Projektträger, betreut. Ermöglicht wurde MiKlip auch durch die enge Zusammenarbeit mit dem Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg, dessen Rechenressourcen die technische Basis für unsere Vorhersagen lieferten. Wir möchten uns an dieser Stelle auch bei allen bedanken, die direkt oder indirekt an MiKlip beteiligt waren und somit zum Erfolg des Projektes beigetragen haben.

Literatur

- BORCHERT, L. F., POHLMANN, H., BAEHR, J., NEDDERMANN, N.-C., SUAREZ-GUTIERREZ, L., MÜLLER, W.A., 2019: Decadal Predictions of the Probability of Occurrence for Warm Summer Temperature Extremes. *Geophys. Res. Lett.* **46**, doi:10.1029/2019GL085385.
- BRUNE, S., DÜSTERHUS, A., POHLMANN, H., MÜLLER, W.A., BAEHR, J., 2018: Time dependency of the prediction skill for the North Atlantic subpolar gyre in initialized decadal hindcasts. *Climate Dynamics* **51**, 1947–1970, doi: 10.1007/s00382-017-3991-4.
- DREWS, A., GREATBATCH, R.J., 2016: Atlantic Multi-decadal Variability in a model with an improved North Atlantic Current. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 8199–8206, doi:10.1002/2016GL069815.
- FELDMANN, H., PINTO, J.G., LAUBE, N., UHLIG, M., MÖMKEN, J., PASTERNAK, A., FRÜH, B., POHLMANN, H., KOTTMEIER, C., 2019: Skill and added value of the MiKlip regional decadal prediction system for temperature over Europe. *Tellus / A* **71**, doi:10.1080/1600870.2019.1618678.
- GIORGETTA, M.A., et al., 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **5**, 572–597, doi:10.1002/jame.20038.

- KADOW, C., TIEDJE, B., ILLING, S., GRIEGER, J., RICHLING, A., PASTERNAK, A., FELDMANN, H., PAXIAN, A., REINHARDT, K., MÜLLER, W.A., POHLMANN, H., HETTRICH, S., VAMBORG, F.S.E., MAROTZKE, J., in Vorb.: Decadal Predictions as a Climate Service.
- KRÖGER, J., POHLMANN, H., SIENZ, F., MAROTZKE, J., BAEHER, J., KÖHL, A., MODALI, K., POLKOVA, I., STAMMER, D., MÜLLER, W. A., VAMBORG, F. S. E., 2017: Full-field initialized decadal predictions with the MPI Earth System Model: An initial shock in the North Atlantic. *Clim. Dyn.* **51**, doi: 10.1007/s00382-017-4030-1.
- KRUSCHKE, T., RUST, H.W., KADOW, C., MÜLLER, W.A., POHLMANN, H., LECKEBUSCH, G.C., ULBRICH, U., 2015: Probabilistic evaluation of decadal prediction skill regarding Northern Hemisphere winter storms. *Met. Zeitschrift* **25**, 721-738, doi:10.1127/metz/2015/0641.
- LI, H., ILYINA, T., MÜLLER, W.A., SIENZ, F., 2016: Decadal predictions of the North Atlantic CO₂ uptake. *Nature Communications* **7**, doi:10.1038/ncomms11076.
- MAROTZKE, J., et al., 2016: MiKlip - a National Research Project on Decadal Climate Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **97**, doi:10.1175/BAMS-D-15-00184.1.
- MIERUCH, S., FELDMANN, H., SCHÄDLER, G., LENZ, C.-J., KOTHE, S., KOTTMEIER, C., 2014: The regional MiKlip decadal forecast ensemble for Europe: the added value of downscaling. *Geosci. Model Dev.* **7**, 2983-2999, doi: 10.5194/gmd-7-2983-2014.
- MÖMKEN, J., FELDMANN, H., PINTO, J.G., BULDMANN, B., LAUBE, N., KADOW, C., PAXIAN, A., TIEDJE, B., KOTTMEIER, C., MAROTZKE, J., 2019: The regional MiKlip decadal prediction system for Europe – Hindcast skill for extremes and user-oriented variables. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.6824.
- MÜLLER, W.A., et al., 2018: A high-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *JAMES* **10**, 1383-1413, doi:10.1029/2017MS001217.
- PASTERNAK, A., BHEND, J., LINIGER, M.A., RUST, H.W., MÜLLER, W.A., ULBRICH, U., 2018: Parametric Decadal Climate Forecast Recalibration (Deforest 1.0). *Geosci. Model Dev.* **11**, 351-368, doi:10.5194/gmd-11-351-2018.
- PAXIAN, A., ZIESE, M., KREIENKAMP, F., PANKATZ, K., BRAND, S., PASTERNAK, A., POHLMANN, H., MODALI, K., FRÜH, B., 2019: User-oriented global predictions of the GPCC drought index for the next decade. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 3-21, doi: 10.1127/metz/2018/0912.
- POHLMANN, H., MÜLLER, W.A., BITTNER, M., HETTRICH, S., MODALI, K., PANKATZ, K., MAROTZKE, J., 2019: Realistic quasi-biennial oscillation variability in historical and decadal hindcast simulations using CMIP6 forcing. *Geophys. Res. Lett.* **46**, 14118-14125, doi:10.1029/2019GL084878.
- POLKOVA, I., BRUNE, S., KADOW, C., ROMANOVA, V., GOLLAN, G., BAEHR, J., GLOWIENKA-HENSE, R., GREATBATCH, R.J., HENSE, A., ILLING, S., KÖHL, A., KRÖGER, J., MÜLLER, W.A., PANKATZ, K., STAMMER, D., 2019: Initialization and ensemble generation for decadal climate predictions: A comparison of different methods. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**, 149-172, doi.org/10.1029/2018MS001439.
- REYERS, M., FELDMANN, H., MIERUCH, S., PINTO, J.G., UHLIG, M., AHRENS, B., FRÜH, B., MODALI, K., LAUBE, N., MÖMKEN, J., MÜLLER, W.A., SCHÄDLER, G., KOTTMEIER, C., 2019: Development and prospects of the regional MiKlip decadal prediction system over Europe: Predictive skill, added value of regionalization and ensemble size dependency. *Earth Syst. Dynam.* **10**, 171-187, doi.org/10.5194/esd-10-171-2019.
- SCHUSTER, M., GRIEGER, J., RICHLING, A., SCHARTNER, T., ILLING, S., KADOW, C., MÜLLER, W.A., POHLMANN, H., PFAHL, S., ULBRICH, U., 2019: Improvement in the decadal prediction skill of the North Atlantic extratropical winter circulation through increased model resolution. *Earth Syst. Dynam.* **10**, 901-917, doi:10.5194/esd-10-901-2019.
- TIMMRECK, C., POHLMANN, H., ILLING, S., KADOW, C., 2016: The impact of stratospheric volcanic aerosol on decadal-scale climate predictions. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 834–842, doi:10.1002/2015GL067431.

Autoren

DR. SEBASTIAN HETTRICH
Leibniz Universität Hannover
Institut für Meteorologie und Klimatologie
Herrenhäuser Str. 2
30419 Hannover
hettrich@muk.uni-hannover.de

DR. WOLFGANG A. MÜLLER
PROF. DR. JOCHEM MAROTZKE
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstrasse 53
20146 Hamburg
wolfgang.mueller@mpimet.mpg.de
jochem.marotzke@mpimet.mpg.de

UNIV.-PROF. DR. ULRICH CUBASCH
DR. JENS GRIEGER
UNIV.-PROF. DR. UWE ULBRICH
Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
12165 Berlin
cubasch@zedat.fu-berlin.de
jens.grieger@met.fu-berlin.de
ulbrich@met.fu-berlin.de

HENDRIK FELDMANN
PROF. DR. CHRISTOPH KOTTMEIER
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO)
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
hendrik.feldmann@kit.edu
christoph.kottmeier@kit.edu

DR. BARBARA FRÜH
DR. FRANK KASPAR
DR. ANDREAS PAXIAN
Deutscher Wetterdienst
Frankfurt Str. 135
63067 Offenbach
barbara.frueh@dwd.de
frank.kaspar@dwd.de
andreas.paxian@dwd.de

DR. IULIIA POLKOVA
PROF. DR. DETLEF STAMMER
Universität Hamburg
Institut für Meereskunde
Bundesstrasse 53
20146 Hamburg
iuliia.polkova@uni-hamburg.de
detlef.stammer@uni-hamburg.de

DR. CHRISTOPHER KADOW
Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ)
Bundesstraße 45 a
20146 Hamburg
kadow@dkrz.de

DR. JANICE SCHEFFLER
UK Centre for Ecology & Hydrology
Bush Estate
Penicuik
Midlothian
EH26 0QB
UNITED KINGDOM
JanSch@ceh.ac.uk

DR. BENTE TIEDJE
Climate Service Center Germany (GERICS)
Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Fischertwiete 1
20095 Hamburg
bente.tiedje@hzg.de

DR. FREJA S. E. VAMBORG
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
(ECMWF)
Shinfield Park
Reading
RG2 9AX
UNITED KINGDOM
freja.vamborg@ecmwf.int

J. SUTMÖLLER, E. SCHÖNFELDER, H. MEESENBURG

7 Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft

Perspectives of applying projections of climate change in forestry

Zusammenfassung

Der Klimawandel betrifft die Forstwirtschaft in vielfältiger Weise. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist nach den Klimaprojektionen mit einer deutlichen Temperaturzunahme und veränderten Niederschlagsverteilung zu rechnen. Die Andauer und Intensität von Trockenperioden werden zunehmen. Die Jahre 2018 und 2019 haben gezeigt, dass aufeinanderfolgende Trockenjahre zu einer starken Zunahme biotisch und abiotisch bedingter Waldschäden führen können. Um die Ergebnisse der Klimamodelle für forstliche Fragestellungen zu nutzen, ist es notwendig, ein Downscaling der Modellergebnisse durchzuführen. Mithilfe des *Quantil Mapping (QM)* werden die Rasterdaten der Klimaszenarien auf ausgewählte Stationen des Deutschen Wetterdienstes angepasst. Das Verfahren erzeugt kontinuierliche Zeitreihen für verschiedene Klimavariablen in täglicher Auflösung. In diesem Beitrag wird das Verfahren vorgestellt und die Nutzung der Klimadaten für forstliche Fragestellungen in Nordwestdeutschland anhand ausgewählter Beispiele dargestellt.

Summary

Climate change affects forestry in manifold ways. According to climate projections, a significant increase in temperature and a change in precipitation seasonality can be expected by the end of the century. The duration and intensity of drought periods will increase. The years 2018 and 2019 demonstrated that consecutive drought years can severely increase biotic and abiotic damage to forest ecosystems. The use of the results of climate models for forestry issues requires downscaling. Raster data of the climate scenarios are adapted to selected climate stations of the German Weather Service using *quantile mapping (QM)*. The method generates transient time series of various climate variables in daily resolution. A brief description of the method is followed by a presentation of selected examples on the use of climate data for forest management in Northwest Germany.

1 Einleitung

Das Jahr 2018 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. Gleichzeitig zählt 2018 zu den niederschlagsärmsten Jahren seit Messbeginn. Die Serie zu warmer und zu trockener Monate setzte sich auch in den Jahren 2019 und 2020 fort. Viele Böden in Nordwestdeutschland waren zu Beginn der Vegetationsperiode 2019 nur unzureichend mit Wasser gefüllt (SUTMÖLLER et al. 2019), so dass die Bäume bereits frühzeitig unter Wassermangel litten. Infolge der sichtbaren Schäden wird der Waldzustand im Kontext der Klimaerwärmung auch in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Neben den direkten Folgen der Trockenheit sind die geschwächten Bäume anfälliger für biotische Schäden

(z. B. Borkenkäferbefall) und Stürme. Die Forstwirtschaft in Deutschland ist von einer Vielzahl an Waldschäden betroffen, deren Ursache unter anderem in der rasant voranschreitenden Klimaänderung begründet ist.

Die Jahre 2018 und 2019 können als Blaupause für ein zukünftiges Klima in Deutschland dienen. Nach den aktuellen Klimaprojektionen werden in Zukunft die Andauer und Intensität von Trockenperioden zunehmen. Für die Forstwirtschaft mit ihren langen Produktionszeiträumen von 100 und mehr Jahren stellen Klimaprojektionen ein wichtiges Planungsinstrument dar, um auf abgesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen Anpassungsstrategien zu entwickeln, die die Ökosystemleistungen der Wälder sichern können.

Auf Grundlage des ReKliEs-De-Projektvorhabens (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) stehen erstmals für Deutschland umfassende Ensembles regionaler Klimaprojektionen der aktuellen RCP-Klimaszenarien (*Representative Concentration Pathway*) des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) in einer hohen räumlichen Auflösung zur Verfügung (HÜBENER et al. 2017). Die Daten wurden für verschiedene Klimavariablen nach einem einheitlichen Format ausgewertet und aufbereitet. Aus dem Gesamtensemble mit 26 verschiedenen Modellkombinationen für das RCP8.5-Klimaszenario („Weiter-wie-bisher-Szenario“) wurde für Anwender von Wirkmodellen im Rahmen des Bund-Länder-Fachgespräches ein sogenanntes Kern-Ensemble ausgewählt, das nach vorgegebenen Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (Tab. 7-1, DALELANE et al. 2018). Für das Klimaszenario RCP2.6 („Klimaschutz-Szenario“), das annähernd die Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens abbildet, liegen für fünf der acht Modellsimulationen des RCP8.5-Kern-Ensembles Ergebnisse vor (Tab. 7-1).

Die Ergebnisse des RCP8.5-Ensembles werden herangezogen, da dieses „Weiter-wie-bisher-Szenario“ auch aufgrund der aktuellen Emissionsentwicklung die maximalen Anpassungserfordernisse für die forstliche Planung bedingt. Um Entscheidungsträgern aus der Forstplanung und der Politik jedoch auch die Auswirkungen des Klimawandels und die dabei notwendigen Anpassungsmaßnahmen bei Erreichen des 2-Grad-Ziels zu verdeutlichen, wird an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) auch das RCP2.6-Szenario in den Auswertungen berücksichtigt. Ziel ist es, den Entscheidungsträgern zu verdeutlichen, welche Schäden vermieden werden können, wenn das „Klimaschutz-Szenario“ eingehalten wird.

Tab.: 7-1: Für das Kern-Ensemble des Bund-Länder-Gespräches ausgewertete Simulationen des ReKliEs-De-Ensembles.

Modell (GCM_RCM_Szenario*)	RCP8.5	RCP2.6
E12_RAC_RXX	X	X
MI5_CLM_RXX	X	X
HG2_WRF_RXX	X	-
MP1_CLM_RXX	X	X
MP1_WRF_RXX	X	X
HG2_W13_RXX	X	-
MP1_W13_RXX	X	X

*GCM = General Circulation Model (Global Climate Model), RCM = Regional Climate Model

2 Quantile Mapping – eine Methode zur Biaskorrektur und zum Downscaling von Klimaprojektionsdaten

Im Rahmen des ReKliEs-De-Projektvorhabens erfolgten Klimasimulationen einheitlich auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 0,11° (ca. 12 km). Diese decken die großen Flussgebiete Deutschlands lückenlos ab (HÜBENER et al. 2017). Die Modelldaten umfassen sowohl die Vergangenheit (ab 1951) und projizieren gleichzeitig mögliche Klimaverläufe bis zum Jahr 2100, sodass für jeden Modelllauf eine kontinuierliche Zeitreihe in täglicher Auflösung vorliegt. Die Modelldaten sind für forstliche Planungen allerdings nicht ausreichend, sodass ein Verfahren gefunden werden musste, um die Projektionen mit einer deutlich höheren räumlichen Auflösung abzubilden. An der NW-FVA wurden dazu mithilfe des *Quantile Mapping*-Verfahrens die Modelldaten auf Gitterbasis an ausgewählte Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) angepasst (FEIGENWINTER et al. 2018). Die so erzeugten Zeitreihen an den Klimastationen können in einem zweiten Schritt mittels Regionalisierungsverfahren an beliebige Punkte und in beliebige Rasterweiten interpoliert werden.

2.1 Methodik

Das verwendete Verfahren des *Quantile Mapping* (QM) erlaubt es, aus den Klimamodellwerten plausible Schätzwerte für die DWD-Stationen abzuleiten (FEIGENWINTER et al. 2018). Ausgangspunkt des QM-Verfahrens ist eine Kalibrierungsperiode, in welcher sowohl tägliche Beobachtungen, als auch tägliche Modellwerte vorliegen. Hier hat sich ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren als ausreichend für eine stabile Schätzung erwiesen, wobei mindestens 25 Jahre mit Messwerten belegt sein müssen. Für jeden Tag eines Jahres werden kumulative Verteilungen sowohl der Messwerte als auch der Modellwerte berechnet (Abb. 7-1). Die Berechnung erfolgt in diskretisierter Form als Perzentile zwischen 0 und 1 mit einem Abstand von 0,01. Zusätzlich werden für jeden Tag neben den entsprechenden Tageswerten auch die Werte der benachbarten 30 Tage herangezogen (je 15 Tage vor und nach dem Termin).

Für jeden Tag des Jahres können aus projizierten Modellwerten zukünftige Werte an den einzelnen DWD-Stationen aus der Differenz der Verteilungen geschätzt werden. Dazu wird aus dem projizierten Modellwert für einen bestimmten Tag des Prognosebereiches der zugehörige Perzentilwert der kumulativen Verteilung des Kalibrierungsbereiches für diesen Tag berechnet und die Differenz zur Verteilungsfunktion der Messwerte addiert (Abb. 7-1). Das Fehlen einzelner Tagesmesswerte ist relativ unschädlich für das Verfahren, da die Perzentile der Verteilung davon nur wenig beeinflusst werden. Größere Ungenauigkeiten bei der Prognose sind zu erwarten, wenn die prognostizierten Modellwerte in die extremen Randbereiche der Verteilungsfunktion des Kalibrierungsbereiches fallen. Hier wäre zu überlegen, den Kalibrierzeitraum zu erweitern bzw. die Anzahl der benachbarten Tageswerte

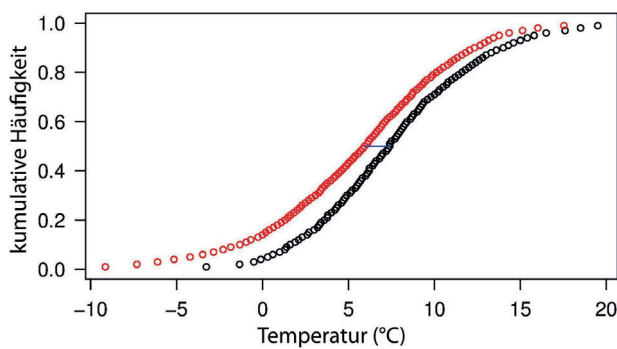


Abb. 7-1: Kumulative Verteilungen der Lufttemperatur anhand der Perzentile für einen beliebigen Tag (rot=Modellwerte, schwarz=Messwerte, blau=Differenz der Mediane).

zu erhöhen, um den Definitionsbereich dieser Verteilung zu vergrößern.

Die gesamten Rechnungen, das Bearbeiten der Klimadateien und die Transformation der Modellwerte auf die DWD-Messstationen erfolgt in der Statistikumgebung R. Die Klimadateien wurden mit der Library „ncdf.tools“ verarbeitet. Die Berechnungen mit den Modellwerten erfolgt mit der noch unveröffentlichten Library, die im Rahmen der neuen Schweizer Klimaszenarien CH2018 entwickelt wurde.

2.2 Ergebnisse der Modellkalibrierung / -validierung

Die Modellkalibrierung erfolgte für den Zeitraum von 1971 bis 2000. Entsprechend der Vorgabe zur Mindestanzahl von Beobachtungsdaten liegen deutschlandweit für den Kalibrierzeitraum Daten des DWD von 4185 Niederschlagsstationen sowie Zeitreihen für die Temperatur an 489 Stationen, die relative Feuchte an 375 Stationen, die Sonnenscheindauer an 272 Stationen und die Windgeschwindigkeit an 242 Stationen vor (in den Zeitreihen wurden teilweise Lücken gefüllt). Für die Güte der Anpassung wurden das Bestimmtheitsmaß und die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) herangezogen. Die Gütemaße beziehen sich jeweils auf das dreißigjährige Jahresmittel sowie auf die Mittelwerte der Quartale (Jahreszeiten). Dabei zeigte sich, dass das Bestimmtheitsmaß und die NSE für die Jahresmitteltemperatur und die mittlere Jahresniederschlagssumme eine sehr hohe Anpassungsgüte in der Kalibrierperiode von mehr als 0,99 erzielen, wobei Werte von 1.0 vollständige Übereinstimmung bedeuten würden. Für die Mittelwerte der Quartale liegt die Übereinstimmung in der Kalibrierperiode bei mehr als 0,95. Auch für die übrigen Klimavariablen ergibt sich für die Kalibrierperiode eine sehr gute Anpassung, wobei für einzelne Quartale insbesondere bei der relativen Feuchte die NSE auch weniger als 0,80 beträgt. Für den Validierungszeitraum von 1951 bis 1980 ergibt sich für die meisten Modellsimulationen bei allen Klimavariablen eine erwartungsgemäß geringere, jedoch ebenfalls noch hohe Modellgüte von mehr als 0,90. Die Bandbreite der Abweichung für die Jahresmitteltemperatur ist in der Kalibrierperiode für alle Modellsimulati-

onen an den Stationen des DWD sehr gering. An den meisten Stationen liegt die Abweichung bei $\pm 0,1$ K (Abb. 7-2, oben links). In der Validierungsperiode 1951 bis 1980 sind die Abweichungen etwas größer und betragen bezogen auf die Jahresmitteltemperatur maximal $-1,0$ K bis $+1,0$ K. Die Quartil-Werte (Wertebereich zwischen 25 und 75 %-Quartil) schwanken dabei lediglich um $0,2$ K (Abb. 7-2, oben rechts). Die Streuung der Quartile und der *Whisker* (Min-, Max-Werte) ist bei allen Modellläufen ähnlich. Die korrigierten mittleren Niederschlagssummen zeigen für die Kalibrierperiode eine geringe Abweichung von rund ± 10 % im Vergleich zu den Stationsmesswerten (Abb. 7-2, unten links). Für die Periode 1951 bis 1980 sind die berechneten Abweichungen mit ± 30 % größer (Abb. 7-2, unten rechts).

Das QM-Verfahren zeigt für die Mitteltemperaturen und die mittleren Niederschlagssummen eine sehr gute Anpassung der Modellwerte an die Messwerte der DWD-Stationen. Die für die Kalibrierperiode gefundenen Regressionsbeziehungen liefern auch für die Periode 1951 bis 1980 gute Ergebnisse. Die etwas stärkere Streuung ergibt sich aus dem Fehler der Modellsimulationen der Regionalmodelle für die Validierungsperiode. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das verwendete Downscaling- und Biaskorrekturverfahren sehr robust ist und damit auf den Projektionszeitraum bis 2100 fortgeschrieben werden kann. Für jeden Klimaparameter einer Modellsimulation steht somit eine kontinuierliche Zeitreihe von 1951 bis 2100 zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet das Regionalmodell WRF, dessen Simulation erst im Jahr 1970 startet.

2.3 Interpolation von Stationsdaten

Um Aussagen für bestimmte Standorte beziehungsweise für die Planungseinheiten der Forstwirtschaft treffen zu können, ist es notwendig, die Stationsdaten in die Fläche zu interpolieren. Hierzu wurden verschiedenen Verfahren getestet und mittels Gütekriterien überprüft. Der Methodenvergleich ergab, dass in Abhängigkeit des untersuchten Klimaparameters verschiedene Interpolationsverfahren die beste Anpassung erzielten (AHRENDTS et al. 2018). Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH hat umfangreiche Verfahren zur Interpolation von meteorologischen Antriebsdaten implementiert. Für die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag zeigte das kombinierte Verfahren aus *Inverse Distance Weighting* (IDW) und Höhenregression eine hohe Anpassungsgüte an unabhängige Messdaten von Intensivmessflächen in Nordwestdeutschland. Auch die räumliche Interpolation auf verschiedene Rasterweiten (1 km bis 200 m räumliche Auflösung) zeigte plausible Ergebnisse. Mit den erprobten Regionalisierungsverfahren ist es möglich, die räumliche Verteilung ausgewählter Klimavariablen und abgeleiteter Indikatoren zu schätzen.

3 Nutzung von Klimaprojektionsdaten für die Forstpraxis

Bereits in der Vergangenheit wurden an der NW-FVA die Ergebnisse von Klimaszenarien genutzt, um das zukünf-

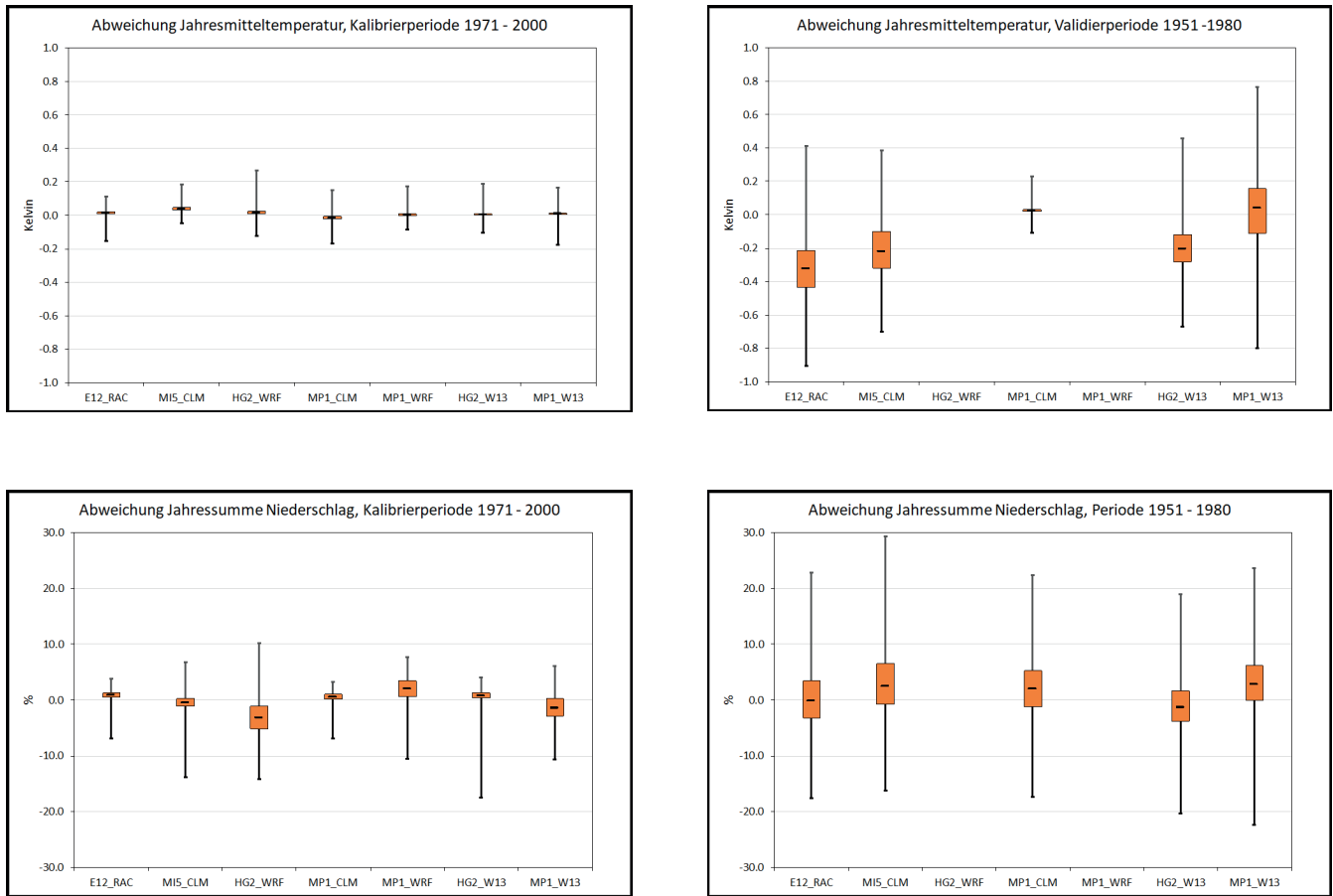


Abb. 7-2: Abweichungen zwischen beobachteter und mithilfe des *Quantile Mapping*-Verfahrens simulierter Jahresmitteltemperatur (oben) und Jahressumme des Niederschlags (unten) an den Stationen des DWD für die Projektionen des Kern-Ensembles, Periode 1971 – 2000 (links), Periode 1951 – 1980 (rechts). Die senkrechten Striche geben die maximale Spannweite, die Boxen die beiden zentralen Quartile (25%- und 75%-Quantil), der horizontale Strich den Median der Abweichungen an.

tige Anbaurisiko der Hauptbaumarten abschätzen zu können (SPELLMANN et al. 2007). In der Regel wurden dabei jedoch die Ergebnisse nur eines Regionalmodells berücksichtigt (z. B. WETTREG, STARS II). Folglich wurde die Unsicherheit der Klimaentwicklung, die beispielsweise für das RCP8.5 eine Temperaturzunahme zwischen +3 und +5 K für den Zeitraum von 2071 bis 2100 erwarten lässt (HÜBENER et al. 2017), außer Acht gelassen. Für einzelne Auswertungen wurde lediglich aus verschiedenen Modellläufen eines Regionalmodells anhand der mittleren Niederschlagssummen eine „trockene“ (niederschlagsarme) und eine „feuchte“ (niederschlagsreiche) Variante ausgewählt, um die Spannweite möglicher Entwicklungen zu erfassen (SPELLMANN et al. 2007).

Das ReKliEs-De-Projektvorhaben hat jedoch gezeigt, dass die Ergebnisse der Regionalmodelle in Abhängigkeit von dem antreibenden Globalmodell sehr stark variieren können. Dies betrifft insbesondere den Projektionszeitraum von 2071 bis 2100 (HÜBENER et al. 2017). Da die Klimavariablen sich dabei nicht in eine einheitliche Richtung verändern, z. B. nach trocken warm, ist es notwendig, die vollständige Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung zu berücksichtigen. Dies ist umso notwendiger, wenn weitere Klimakennwerte, wie die kli-

matische Wasserbilanz und andere Trockenheitsindizes abgeleitet werden.

3.1 Auswertungsmethoden und Anwendungsbereiche in der Forstwirtschaft

Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen die Forstwirtschaft in vielfältiger Weise. Die Klimamodelle lassen eine veränderte saisonale Niederschlagsverteilung und eine deutliche Temperaturzunahme bis zum Jahr 2100 erwarten. Dies würde sich auf die Standortverhältnisse und damit die Produktivität der Wälder auswirken. Zusätzlich ist damit zu rechnen, dass biotische (Schadinsekten und Pilze) und abiotische Risiken (Trockenheit, Stürme) zunehmen und die Vitalität und das Wachstum der Bäume vermindern. Die Jahre 2018 und 2019 haben gezeigt, dass als Folge von zwei Trockenjahren eine erhöhte Mortalität (Absterberate) auftritt. Waldbaukonzepte erfassen und beschreiben die verschiedenen Risiken modellgestützt, um diese in eine Gesamtstrategie für Anpassungsmaßnahmen umzusetzen (SPELLMANN et al. 2007, BÖCKMANN et al. 2019).

Es wird erwartet, dass in Zukunft die Wälder in Deutschland einem erhöhten Trockenstressrisiko ausgesetzt sein werden. Insbesondere die Temperaturzunahme und die Verlängerung

der Vegetationsperiode werden den Verdunstungsanspruch der Bäume stark erhöhen. Um das Trockenstressrisiko abzuschätzen, werden verschiedene Indikatoren verwendet. Ein einfacher und flächenhaft zu bestimmender Indikator stellt die Standortwasserbilanz dar, die sich aus der Summe der klimatischen Wasserbilanz (KWB) und dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser, der nutzbaren Feldkapazität (nFK), berechnet. Die KWB ist die Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung. Die potenzielle Verdunstung wird nach FAO-Norm für eine einheitliche Grasbedeckung und dem Ansatz von Penman/Monteith berechnet. Die nFK kann aus Bodenübersichtskarten oder der Forstlichen Standortskartierung abgeleitet werden. Die Forstliche Standortskartierung beschreibt die Wuchsbedingungen von Waldstandorten hinsichtlich Wasser- und Nährstoffversorgung in einer hohen räumlichen Auflösung. Die Einschätzung des Trockenstressrisikos für die Hauptbaumarten erfolgt anhand von Schwellenwerten der Standortwasserbilanz, die aus Auswertungen zu forstlichen Inventuren, wie der Bundeswaldinventur (einer großflächigen Erfassung der Waldverhältnisse in Deutschland), Literaturrecherchen und Expertenwissen beruhen (BÖCKMANN et al. 2019). Anhand der Klassifizierung kann für jedes Ergebnis eines Modelllaufes zur Standortwasserbilanz eine flächenhafte Abschätzung des Trockenstressrisikos erfolgen. Da jede Modellsimulation gleich wahrscheinlich ist, wird aus den einzelnen Risikoeinstufungen ein Gesamtrisiko für jede Baumart abgeleitet (Abb. 7-3). Zur Einschätzung des Trockenstressrisikos werden noch weitere Trockenstressindikatoren wie die relative Verdunstung (Verhältnis tatsächlicher zu potenzieller Verdunstung) oder der relative nutzbare Bodenwassergehalt, der das Verhältnis zwischen aktuellem Bodenwassergehalt und nFK angibt, ausgewertet. Diese erfordern jedoch den Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen und werden deshalb meist nur auf der Plotskala, z.B. für die Traktecken der Bundeswaldinventur, berechnet.

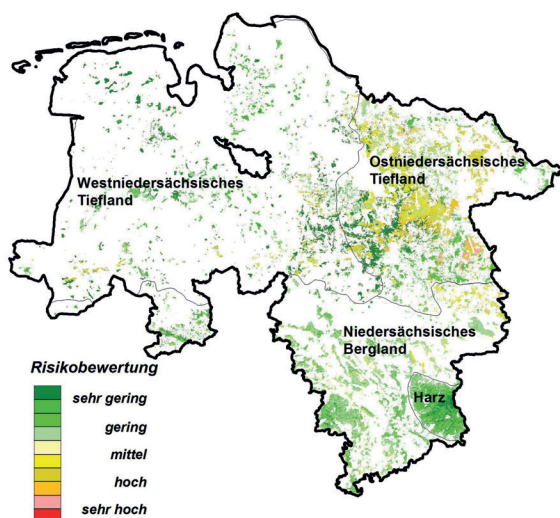


Abb. 7-3: Trockenstressrisiko abgeleitet aus der Standortwasserbilanz für eine hypothetische Baumart für die Waldflächen in Niedersachsen.

Die Produktivität eines Waldstandortes wird an der NW-FVA mit einem klimasensitiven Standort-Leistungsmodell beschrieben (ALBERT und SCHMIDT 2012). Das Modell benötigt neben den Klimavariablen Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode Informationen zum atmosphärischen Stickstoffeintrag und zur Wasser- und Nährstoffversorgung eines Standortes. Die Wasserversorgung eines Standortes hängt maßgeblich von den physikalischen Bodeneigenschaften (Bodenart, Lagerung, etc.) und den klimatischen Verhältnissen ab. Im Kontext des Klimawandels kann die Bestandesproduktivität durch die Verschiebung im Standort-Leistungs-Bezug abgeschätzt werden. Anhand sogenannter mehrdimensionaler Ökogramme (Abb. 7-4) wird die Veränderung der Produktivität anschaulich dargestellt (ALBERT und SCHMIDT 2012). Das Beispiel zeigt für drei Zeitabschnitte im Vergleich zum status quo die Veränderung der Standortleistungsfähigkeit. Da zwei Varianten des Klimaszenarios („trocken“ und „feucht“) berücksichtigt werden, kann ein Unsicherheitsbereich angegeben werden. Die Berücksichtigung von mehr als zwei Modellvarianten kann durch Ertragsklassenhüllen, die den Unsicherheitsbereich umschließen, veranschaulicht werden.

Die biotischen Risiken werden infolge der Klimaerwärmung zunehmen, da viele wärmeliebende Schadinsekten und Pilze günstigere Bedingungen für ihre Entwicklung und Ausbreitung vorfinden werden. Gleichzeitig ist damit zu rechnen, dass auch neue nicht heimische Arten einwandern werden. Im Jahr 2019 stellte vor allem der Borkenkäfer für die Fichte eine große Bedrohung dar. Flächenhaft wurden viele Bestände befallen und starben ab. Mithilfe eines statischen Modells wird an der NW-FVA die Befallswahrscheinlichkeit für die Fichte geschätzt (OVERBECK und SCHMIDT 2012). Das Modell benötigt als Klimaparameter die Temperatursumme in der Vegetationszeit und erlaubt damit das Borkenkäferbefallsrisiko unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen zu schätzen. Neben den Schadinsekten spielen Pilze zunehmend eine bedeutende Rolle im Schadbild der Bäume. Teilweise treten diese im Zusammenspiel mit den Schadinsekten auf. Einer der wichtigsten Haupttreiber für die Entstehung neu entstehender oder neu auftretender pilzlicher Waldbaumerkrankungen ist der Klimawandel.

Für die Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Waldbrandrisikos anhand verschiedener Waldbrandindizes werden als Treibervariablen ebenfalls flächenhafte Daten der Klimaelemente benötigt. Für das Norddeutsche Tiefland ist bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer deutlichen Zunahme des Waldbrandrisikos zu rechnen (SPELLMANN et al. 2017).

4 Fazit und Ausblick

Die Forstwirtschaft ist aufgrund der langen Produktionszeiträume darauf angewiesen, wissenschaftlich abgesicherte Aussagen zu den klimatischen Veränderungen zu nutzen, um zukünftig durch nachhaltige und klimasensitive Anpassungsmaßnahmen die Produktionsgrundlagen und Ökosystemleistungen der Wälder zu sichern. Mit

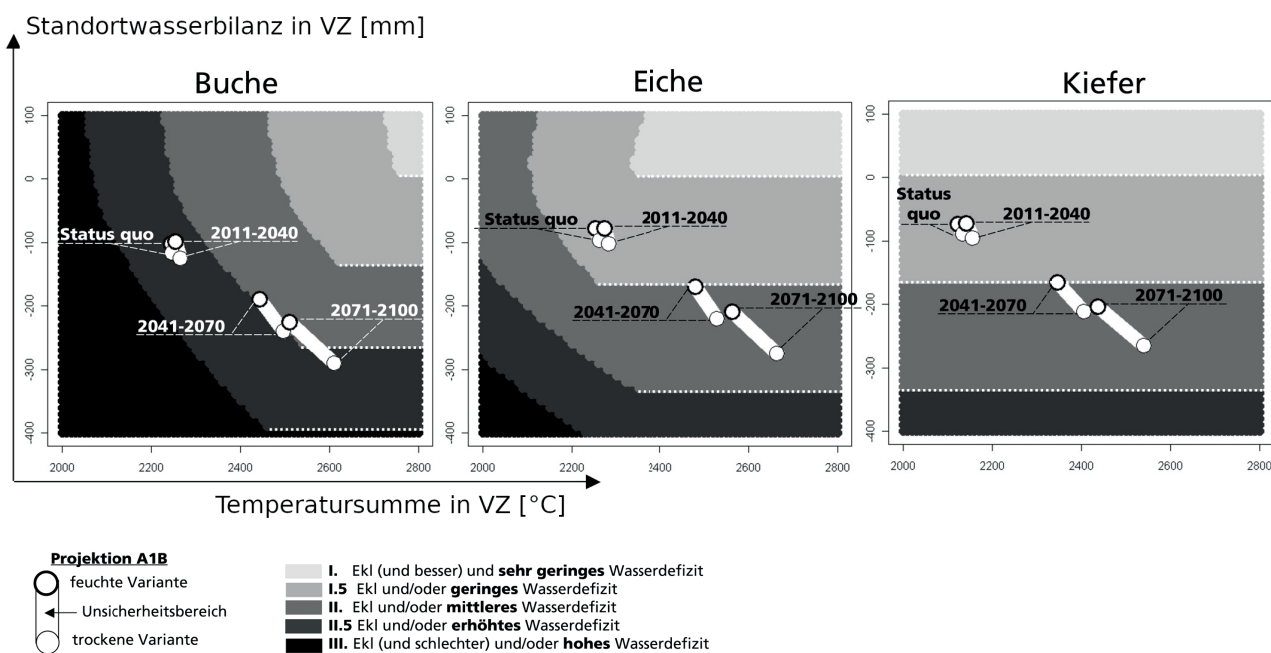


Abb. 7-4: Mehrdimensionale Ökogramme zur Standortleistungsfähigkeit für einen Standort und die Baumarten Buche, Eiche und Kiefer; VZ = Vegetationszeit, EKL = Ertragsklasse (ALBERT und SCHMIDT 2012).

dem ReKliEs-De-Projektvorhaben werden erstmalig für Deutschland Klimaprojektionsdaten bereitgestellt, die aufgrund der räumlichen Auflösung und dem einheitlichen Datenformat für vielfältige Anwendungsbereiche genutzt werden können. Die potenziellen Nutzer sind nun gefordert, diese Daten in ihre Wirkmodelle und Auswertungen einzubeziehen, damit möglichst viele Anwendungsbereiche mit dem gleichen Klimadatensatz arbeiten. Im Projekt ReKliEs-De wurde von Anfang an darauf Wert gelegt, die potenziellen Nutzer von Klimaprojektionsdaten einzubinden. Diese nutzerorientierte Herangehensweise hat dazu geführt, dass die Ergebnisse der verschiedenen Modellsimulationen so aufbereitet wurden, dass sie ein einheitliches Format und einen Mindestumfang an Klimavariablen umfassen. Gleichzeitig wurde mit dem Ergebnisbericht auch ein Nutzerhandbuch herausgegeben, das es nicht in der Verwendung von Datenbanken geschulten Anwendern ermöglicht, mit diesen umfangreichen Datensätzen zu arbeiten. Damit hat das Projekt aus unserer Sicht einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Akzeptanz der Klimamodellierung geleistet.

Für die forstliche Planung besteht aber weiter das Problem, dass die räumliche Auflösung der Klimamodelle nicht ausreichend ist. Das hier vorgestellte Verfahren zum Downscaling stellt eine Möglichkeit dar, die Daten auch für kleine Planungseinheiten zu nutzen. Es wäre jedoch wünschenswert, wenn ein Downscaling der Daten zentral durchgeführt würde und diese dann der Nutzergemeinde zur Verfügung gestellt würden. Dafür wäre eine Institution oder Arbeitsgruppe notwendig, die bereit wäre, das gesamte Postprozessing von Klimaprojektionsdaten in enger Abstimmung mit den Nutzern zu übernehmen. Da kontinuierlich neue Klimasimulationen durchgeführt werden, könnten durch einen zentralen Ansprechpartner auch

die Ergebnisse neuer Klimamodellläufe und weitere den Nutzer interessierende Anwendungsmöglichkeiten kommuniziert werden.

Klimaprojektionsdaten werden mittlerweile bei fast allen forstlichen Fragestellungen genutzt, sei es in Wirkmodellen als auch bei der Ableitung von waldbaulichen Anpassungsstrategien. Für die Forstpraxis besteht die große Herausforderung darin, trotz großer klimatischer Unsicherheiten zum Ende des Jahrhunderts, die Multifunktionalität der Wälder unter verändertem Klima zu erhalten und Optionen für forstliche Anpassungsstrategien abzuleiten. Dafür sollten die einzelnen Risiken integrativ zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt werden (SPELLMANN et al. 2017).

Danksagung

Die Autoren möchten den Projektpartnern von CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz und insbesondere Herrn Dr. Sven Kotlarski von MeteoSwiss für die Bereitstellung der R-Routinen zum *Quantile Mapping*-Verfahren und die Unterstützung danken.

Literatur

- AHREND, B., SCHMIDT-WALTER, P., FLECK, S., KÖHLER, M., WEIS, W., 2018: Wasserhaushaltssimulationen und Klimadaten. *Freiburger Forstliche Forschung* **101**, 74-94.
- ALBERT, M., SCHMIDT, M., 2012: Standort-Leistungs-Modelle für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien unter Klimawandel. *Archiv f. Forstw. u. Lansch. ökol.* **46**, 57-71.

- BÖCKMANN, T., HANSEN, J., HAUSKELLER-BULLERJAHN, K., JENSEN, T., NAGEL, J., NAGEL, R. V., OVERBECK, M., PAMPE, A., PETEREIT-BITTER, A., SCHMIDT, M., SCHRÖDER, M., SCHULZ, C., SPELLMANN, H., STÜBER, V., SUTMÖLLER, J., WOLLBORN, P., 2019: Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Niedersächsische Landesforsten (Hrsg.): Aus dem Walde - Schriftenreihe *Waldentwicklung in Niedersachsen*, Band 61, 170 S.
- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A., 2018: A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble *J. Appl. Meteorol. Clim.* **57**, 477-491, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1.
- FEIGENWINTER, I., KOTLARSKI, S., CASANUEVA, A., FISCHER, A., SCHWIERZ, C., LINIGER, M. A. 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland. *Technical Report MeteoSwiss* **270**, 44 S.
- HÜBENER, H., BÜLOW, K., FOKKEN, C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S., KEULER, K., MENZ, C., MOHR, V., RADTKE, K., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., WOLDT, M., 2017: ReKliEs-De Ergebnisbericht. doi: 10.2312/WDC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.
- HÜBENER, H., SPEKAT, A., BÜLOW, K., FRÜH, B., KEULER, K., MENZ, C., RADTKE, K., RAMTHUN, H., RATHMANN, T., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., 2017: ReKliEs-De Nutzerhandbuch. doi: 10.2312/WDC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.
- OVERBECK, M., SCHMIDT, M., 2012: Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management* **266**, 115-125.
- SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J., MEESENBURG, H., 2007: Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Der Wald*, **62**. Jg., 1246-1249.
- SPELLMANN, H. et al. 2017: Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. *Beiträge aus der NW-FVA* **18**, 436 S.
- SUTMÖLLER, J., WAGNER, M., SCHELER, B., MEESENBURG, H., EICHHORN, J., 2019: Der Bodenfeuchtezustand zu Beginn der Vegetationszeit 2019. *AFZ-Der Wald* **74**, 15, 46-49.

Autoren

JOHANNES SUTMÖLLER
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen
Johannes.Sutmoeller@nw-fva.de

DR. EGBERT SCHÖNFELDER
ehemals: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Waldwachstum
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen

DR. HENNING MEESENBURG
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen
Henning.Meeseburg@nw-fva.de

8

M. HERBST, E. FALGE, C. FRÜHAUF

Regionale Klimamodellierung – Perspektive Landwirtschaft

Regional Climate Modelling – Perspective Agriculture

Zusammenfassung

Agrarmeteorologische Wirkmodelle dienen dazu, die Auswirkungen von Wetterabläufen und Klimaänderungen auf die für die landwirtschaftliche Praxis wichtigen Prozesse zu beschreiben. Im vorliegenden Beitrag wird am Beispiel des DWD-Wasserhaushaltsmodells AMBAV die Bedeutung einer adäquaten Berücksichtigung spezifischer Vegetationseigenschaften für eine robuste Modellierung der für die Landwirtschaft relevanten Wasserhaushaltsgrößen aufgezeigt. Nach einer kurzen Beschreibung der aktuellen Modellversion werden Anwendungen dieses Wirkmodells in der regionalen Klimamodellierung erläutert. Diese erstrecken sich von stationsbasierten Prozessanalysen und speziellen Aspekten des Extremwettermonitorings über rückblickende agrarklimatische Auswertungen bis hin zu routinemäßigen Einsätzen in der Politikberatung.

Summary

Agrometeorological impact models describe the effects of weather patterns and climate change on surface processes that are relevant for agriculture. In the present chapter the DWD's water balance model AMBAV is used as an example to demonstrate the importance of an adequate representation of vegetation properties for a robust modelling of agriculturally relevant water balance components. Following a brief description of the current model version, some applications of the model within the regional climate modelling are illustrated. They range from station based process analyses and specific aspects of extreme weather monitoring to retrospective agroclimatic evaluations and routine services within political consulting.

1 Einleitung

Die Landwirtschaft bekommt die Auswirkungen von Witterungsschwankungen und Klimaänderungen unmittelbar zu spüren. Eine Reihe ungewöhnlicher Witterungsverläufe in den vergangenen Jahren hat zu einer erheblichen Sensibilisierung betroffener Menschen und Einrichtungen geführt und die Erwartungen an die regionale Klimamodellierung und ihre Berücksichtigung in der Politikberatung verstärkt. So fiel im Jahr 2017 nach einem frühen Vegetationsbeginn ein großer Teil der Obstblüte einem starken Spätfrostereignis zum Opfer, und regional wirkten sich zunächst eine frühsummerliche Trockenheit, dann jedoch eine ungewöhnlich nasse Periode im Spätsommer und Herbst negativ auf die Ernte aus. Viele Maisbestände in den westlichen Landesteilen hielten auf den aufgeweichten Böden den herbstlichen Stürmen nicht stand. In einigen Teilen Norddeutschlands waren die Ernte später Kartoffeln und Rüben und

die Aussaat des Wintergetreides nicht möglich, da die übersättigten Böden nicht mehr mit landwirtschaftlichen Maschinen befahren werden konnten. Ganz andere Herausforderungen stellten sich der Landwirtschaft im Folgejahr 2018, das sich nach einem späten Vegetationsstart (örtlich sogar mit „weißem Ostern“ Anfang April) nahezu bundesweit durch Temperaturrekorde und extreme Trockenheit auszeichnete, die zu erheblichen Ernteausfällen führten. Der Grund für dieses Extremereignis lag in einer ungewöhnlich konstanten Wetterlage von Mitte April bis weit in den Juli hinein mit Hochdruckgebieten über Großbritannien und Skandinavien. Dies führte dazu, dass vor allem in Niedersachsen und in den östlichen Bundesländern nur rund ein Drittel bis die Hälfte der üblichen Niederschlagsmenge fiel. Angesichts der gleichzeitig aufgetretenen hohen Temperaturen und des damit verbundenen Verdunstungsanspruches der Atmosphäre wies die klimatische Wasserbilanz (also die Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung,

d. h. Verdunstung einer gut wasserversorgten Grasfläche) lokal Defizite bis über 400 mm auf. Im folgenden, nur durchschnittlich nassen Winter fand keine vollständige Wiederauffüllung der tieferen Bodenschichten mit Wasser statt. Die Dürre des Vorjahres wirkte im Jahr 2019 folglich noch nach und betraf nun, in einem Jahr mit etwa durchschnittlichem Niederschlag, vor allem die Forst-ökosysteme. Selbst einheimische Baumarten kamen mit dem fehlenden Wasser in den tieferen Bodenschichten nicht zurecht.

Seitens der Land- und Forstwirtschaft sowie der zuständigen Bundes- und Landesbehörden hat aufgrund der beschriebenen Abfolge besonderer Wetterlagen das Interesse an tragfähigen Aussagen zu Trends und Projektionen sowie zur Einordnung von als extrem wahrgenommenen Ereignissen oder Entwicklungen stark zugenommen. Insbesondere werden Abschätzungen zum Gebietswasserhaushalt, zum pflanzenspezifischen Wasserbedarf und zur saisonalen Wasserverfügbarkeit im Boden auf regionaler Ebene nachgefragt. Dazu sind – neben robusten in-situ-Beobachtungsdaten – agrarmeteorologische Wirkmodelle erforderlich, die mikrometeorologische, pflanzenphysiologische und agrarwissenschaftliche Kenntnisse und Ansätze miteinander verknüpfen. So spielt für die agrarmeteorologische Risikoabschätzung eine entscheidende Rolle, dass die bei uns großflächig angebauten Pflanzenarten zu unterschiedlichen Zeiten ihren größten Wasserbedarf haben (z. B. der Raps im Mai während der Kornfüllungsphase, viele Getreidearten im Juni während der Reifungsphase oder der Mais im Juli während der Ausbildung der Kolben) und aufgrund ihrer unterschiedlichen Wurzelsysteme im Laufe der jeweiligen Vegetationsperiode das Wasser aus verschiedenen Bodenschichten entziehen. Die daraus resultierenden Anforderungen an die regionale Klimamodellierung beinhalten folglich die Berücksichtigung der Boden- und Vegetationseigenschaften einschließlich der ober- und unterirdischen Biomasseentwicklung sowie der physiologischen Reaktionen auf meteorologische Steuerfaktoren und deren Auswirkungen auf den aktuellen Wasserverbrauch und somit den Bodenwasservorrat. Dass die Pflanzenentwicklung in der Agrarlandschaft auch maßgeblich von den Bewirtschaftungsaktivitäten abhängt, unterstreicht die Bedeutung detaillierter Wirkmodelle für die regionale Klimamodellierung.

2 AMBAV als kulturspezifisches Wirkmodell für Verdunstung und Bodenfeuchte

Das in der DWD-Abteilung Agrarmeteorologie entwickelte und seit Jahrzehnten operationell eingesetzte Modell AMBAV (Agrarmeteorologische Berechnung der Aktuellen Verdunstung, LÖPMEIER 1994) berechnet die einzelnen Komponenten der Verdunstung (Transpiration, Interzeptionsverdunstung und Bodenverdunstung) mit einem klassischen Penman-Monteith-Ansatz, der mit einem Modell zur Bodenhydraulik verknüpft wurde (BRADEN 2012). Es bildet ein anschauliches Beispiel für die

landwirtschaftliche Perspektive der regionalen Klimamodellierung. AMBAV zeichnet sich durch eine genaue Berücksichtigung der phänologischen Entwicklung der jeweils betrachteten Kulturpflanzenart aus und berücksichtigt den rückgekoppelten Einfluss eines austrocknenden Bodens auf den pflanzlichen Wasserverbrauch. Die Version von LÖPMEIER (1994) wurde in den vergangenen Jahren in folgenden Punkten weiterentwickelt:

Aus den stündlichen meteorologischen Eingangsdaten werden sämtliche Komponenten der Energiebilanz berechnet (Nettostrahlung, Bodenwärmestrom, fühlbarer und latenter Wärmestrom) und eine geschlossene Energiebilanz vorausgesetzt. Die Verdunstungskomponenten werden getrennt berechnet, d. h. als parallele Prozesse für die relativen Anteile von trockener Vegetation, nasser Vegetation und freiem Boden an der Gesamtoberfläche. Oberflächenabfluss, Versickerung und kapillarer Aufstieg werden für jeden Zeitschritt simuliert. Die Beschreibung des Wassertransfers im Boden mittels der Richards-Gleichung bezieht die Boden-Kardinalwerte θ_{sat} , θ_{FK} , θ_{WP} und θ_{res} (Sättigungswassergehalt, Feldkapazität, Welkepunkt und Restwassergehalt) aus *Lookup*-Tabellen, welche für jede Bodenschicht die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) tabellierten Kardinalwerte für verschiedene Bodentypen (definiert durch Ton- und Schluffgehalt), Dichten und Humusgehalte wiedergeben. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird nach VERECKEN et al. (1990) berechnet. Als Startwerte können für jede Bodenschicht die volumetrische Bodenfeuchte, die oben genannten Kardinalwerte oder das Matrixpotential im Gleichgewicht mit dem Gravitationspotential vorgegeben werden. Unterhalb der modellierten Bodenschichten können über das Setzen des dortigen Matrixpotenzials ein Grundwasseranschluss oder eine Sperrschicht simuliert werden.

Bei der Modellierung der Evaporation und Transpiration über die Penman-Monteith-Gleichung wurden die aerodynamischen, Boden- und Vegetations-Widerstände für den Wasserdampftransport neu parametrisiert. Dies beinhaltet eine artspezifische Beschreibung der stomatären Leitfähigkeit (g_s) und ihrer Steuerung durch Temperatur, Einstrahlung (direkte und diffuse Einstrahlung auf besonnten und beschatteten Blättern), Dampfdruckdefizit und Bodenfeuchte (nach JARVIS 1976). Der/die Nutzer/in des Modells kann dabei einen Maximalwert für g_s und einen Schwellenwert für die Wirkung der Bodenfeuchte vorgeben.

Für die artspezifische Modellierung der Wurzelentwicklung wird eine optimumsförmige Wurzelverteilung angenommen (Abb. 8-1). Dazu wurde der Ansatz von FAN et al. (2016) weiterentwickelt. Grundlage für die spezifischen Wurzelprofile bilden die Darstellungen im Wurzelatlas der Kulturpflanzen von KUTSCHERA et al. (2009). Zudem wurde eine Änderung des Wurzeltiefenwachstums mit der Zeit seit Aussaat implementiert. Die Skalierung erfolgt durch die vom Nutzer vorgebbare maximale Durchwurzelungstiefe. In Abb. 8-1 wird exemplarisch gezeigt, dass die

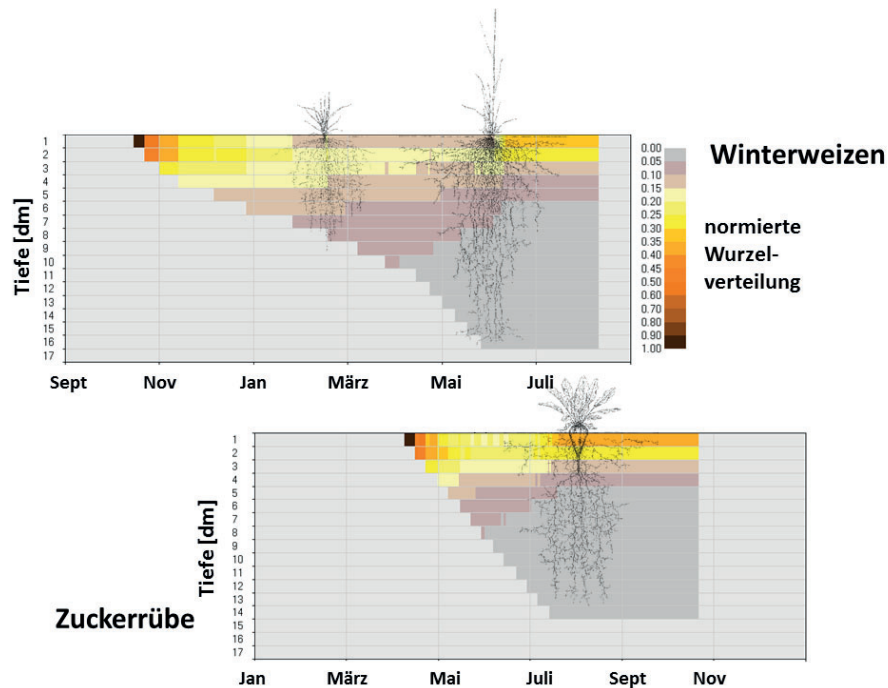


Abb. 8-1: Illustration der Wurzelsysteme von Winterweizen und Zuckerrübe nach KUTSCHERA et al. (2009) und die daraus für AMBAV abgeleitete relative Verteilung der Wurzeln in 10 cm mächtigen Bodenschichten bis zur maximalen Durchwurzelungstiefe über die jeweilige Anbauperiode.

Wurzeln der Rübe schneller in die Tiefe wachsen als die des Getreides und im Hochsommer und Herbst die komplette Bodensäule bis 1,4 m Tiefe für die Wasseraufnahme nutzen können.

Bezüglich der oberirdischen Vegetationsentwicklung werden in AMBAV der grüne und der abgestorbene Blattflächenindex (*Leaf Area Index*, LAI), die Bestandshöhe sowie der Bedeckungsgrad als Funktion der fortschreitenden Phänophasen (nach BBCH-Definition, siehe MEIER 1997) berechnet (Abb. 8-2). Gesteuert wird der Verlauf durch fünf vom Nutzer anzugebende, kulturspezifische Eintrittstermine phänologischer Phasen. Auch der Aussaat-Termin sowie unterschiedliche Tage für Erntereife und physikalische Ernte werden berücksichtigt. Die Skalierung der Vegetationsentwicklung erfolgt durch vom Nutzer vorgebbare Maximalwerte. Optional kann die ober- und unterirdische Vegetationsentwicklung auch mittels eines Wärmesummenmodells gesteuert werden. Ober- und unterirdische Bestandsentwicklung sind im Modell aneinandergekoppelt.

In dem in Abbildung 8-2 gezeigten Beispiel wird veranschaulicht, dass die stärkste Blatentwicklung bei der Zuckerrübe erst einsetzt, wenn das Wintergetreide bereits abreift. Mit der Blattflächenentwicklung geht auch der Wasserbedarf einher, so dass auch die zeitliche Verteilung des Jahresniederschlags eine wichtige Information für die „Perspektive Landwirtschaft“ darstellt. So wird beispielsweise bei der Diskussion von klimatischen Trends oft übersehen, dass in den letzten Jahrzehnten ausgerechnet in dem für das Wintergetreide kritischen Zeitabschnitt von Mitte März bis Mitte Mai die Trockenperioden zugenommen haben (Abb. 8-3). So hat sich seit der Referenzperiode 1961-1990 die

Anzahl der Tage ohne Niederschlag in diesem Zeitfenster je nach Region um 5 bis 10 Tage erhöht.

Eine Modellierung des kompletten Vegetationszyklus von Winterkulturen über den Jahreswechsel hinweg ist möglich, wobei der Berechnungszeitraum ab dem 01.01.1961 frei wählbar ist. Gestartet werden kann mitten in einem Vegetationszyklus, und auch die Simulation mehrerer Vegetationszyklen hintereinander ist möglich. Die Berechnungen erfolgen für alle DWD-Stationen mit stündlich verfügbarer Lufttemperatur, -feuchte, kurz- und langwelliger Strahlung, Niederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit. Validierte Parametrisierungen liegen für Winterweizen und -gerste, Sommerweizen und -gerste, Roggen, Mais, Zuckerrübe, Kartoffel sowie Winterraps vor. Neben der aktuellen Situation sind auch die durch den Klimawandel erwarteten Änderungen von Interesse. Das Modell AMBAV kann neben Klima- und Vorhersagedaten auch mit Klimaprojektionsdaten betrieben werden (siehe Abschnitt 3.5).

3 Anwendungsbeispiele des AMBAV-Wirkmodells

3.1 Stationsbasierte, pflanzenspezifische Bodenfeuchteverläufe

Das vorgestellte Modell wird im DWD für verschiedene Fragestellungen eingesetzt. So lässt sich beispielsweise für eine ausgewählte Region auf Basis einer repräsentativen DWD-Wetterstation rückblickend der Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Schichten bis in 2 m Tiefe berechnen und grafisch darstellen. Damit können Trends sichtbar gemacht und mögliche Risiken identifiziert werden. Dies ist am Beispiel der AMBAV-Berechnungen für die drei Jahre 2017

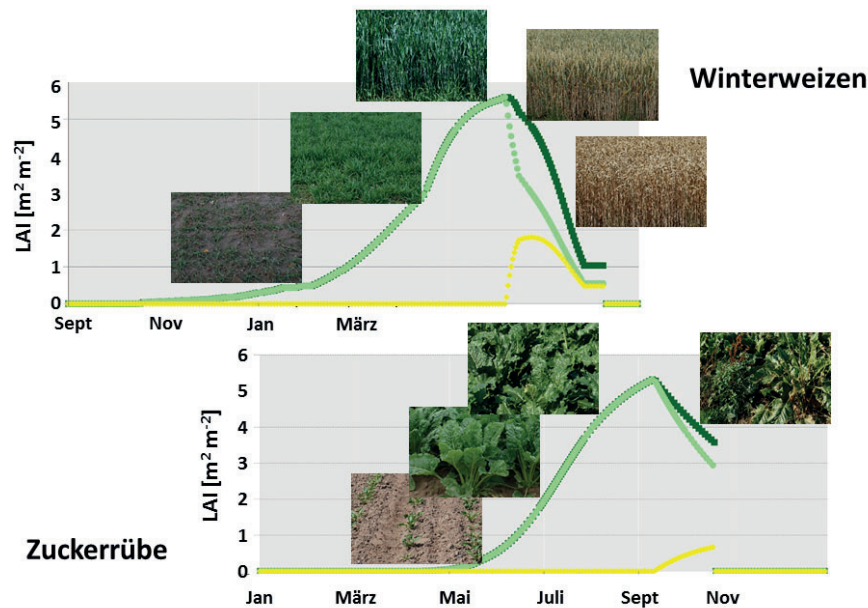


Abb. 8-2: Saisonale Entwicklung des grünen (hellgrün) und des gesamten (dunkelgrün) Blattflächenindex (LAI) von Winterweizen und Zuckerrüben am Beispiel der für Braunschweig und das Jahr 2018 modellierten Zahlen. Der abgestorbene LAI ist gelb dargestellt. Die Fotos wurden ebenfalls am DWD-Standort Braunschweig in den jeweiligen Entwicklungsphasen im Jahr 2018 aufgenommen.

(nass), 2018 (trocken) und 2019 (durchschnittlicher Niederschlag) für zwei Standorte und je zwei Kulturen (Winterweizen und Zuckerrüben) dargestellt (Abb. 8-4). Die DWD-Stationen Braunschweig und Freising-Dürnast wurden deshalb ausgewählt, weil es hier DWD-Versuchsfelder gibt, auf denen die Modellergebnisse regelmäßig validiert werden. Zunächst illustriert Abbildung 8-4, dass nach normalen und regenreichen Jahren sämtliche Bodenschichten im Verlauf des Winters durch die Niederschläge wieder aufgefüllt werden, bevor zunächst das Getreide und etwas später dann auch die Zuckerrüben dem Boden erneut Wasser entziehen. Nach dem besonders trockenen Sommer 2018 erreichten jedoch die nur durchschnittlichen Niederschläge des

nachfolgenden Winters in vielen Regionen (wie hier am Beispiel Braunschweig dargestellt) die tieferen Schichten nicht. Das Jahr 2019 war trotz einiger regenarmer Perioden im Sommer längst nicht so niederschlagsarm wie 2018, jedoch setzte sich in vielen Regionen durch die ungünstigen Startbedingungen die Bodentrockenheit fort und verschärfte sich in den tieferen Schichten sogar noch. Das damit verbundene Risiko für die Ernterträge ist durch Fernerkundungsdaten nicht abschätzbar, da diese nur die obersten Bodenschichten „sehen“ und über die Situation in den tieferen Bereichen der Wurzelzone keine Aussagen machen können. AMBAV füllt in dieser Hinsicht eine wichtige Lücke für die Politikberatung.

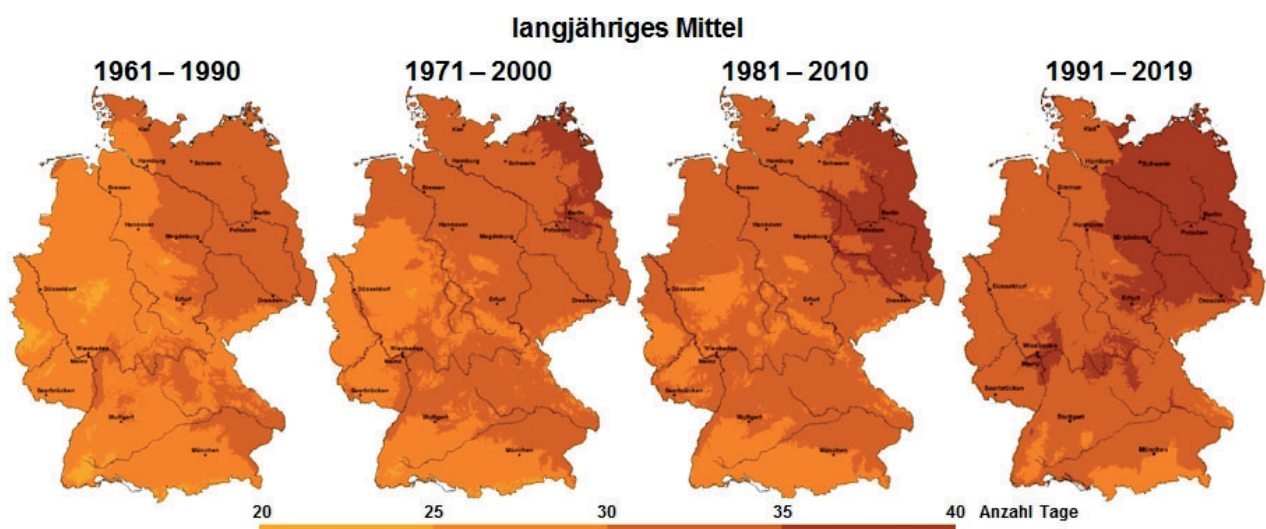


Abb. 8-3: Anzahl der Tage ohne Niederschlag (Tagessumme < 0,1 mm) von Mitte März bis Mitte Mai für 30-jährige Mittelungsintervalle seit 1961 (GÖMANN et al. 2015, modifiziert).

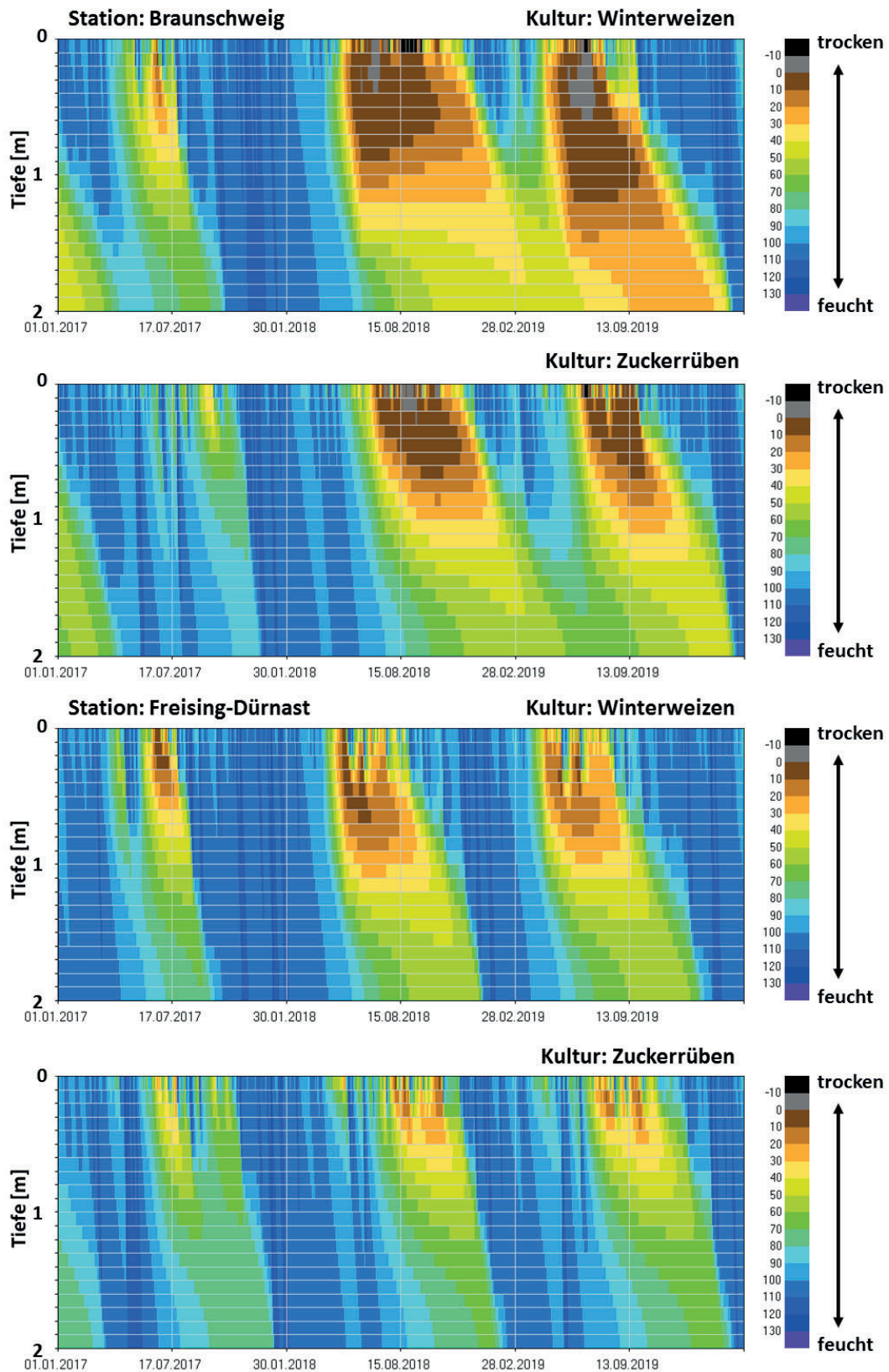


Abb. 8-4: Zeitverlauf der mit AMBAV modellierten Bodenfeuchte in % nutzbarer Feldkapazität über drei meteorologisch unterschiedliche Jahre für lehmige Sandböden in Braunschweig bzw. Freising-Dürnast. Dargestellt sind die Zahlen für 0 – 2 m Bodentiefe mit einer vertikalen Auflösung von 10 cm, und zwar für beide Standorte jeweils für Winterweizen und Zuckerrüben.

3.2 Kartendarstellungen zur Visualisierung regionaler Besonderheiten des Agrarklimas und zur Identifizierung von Extremsituationen

Am Beispiel des Dürrejahres 2018 lässt sich mittels interpolierter Karten der AMBAV-Modellberechnungen illustrieren, dass die Sommertrockenheit zunächst noch nicht die eher auf schwereren Böden angebauten Hackfrüchte, sondern in erster Linie den Getreideanbau auf leichten Böden in Mitleidenschaft zog (Abb. 8-5). Gemittelt über die drei Sommermonate Juni, Juli und August fiel die nutzbare Feldkapazität in 0 – 60 cm Tiefe unter Zuckerrüben auf schweren Böden regional kaum unter 30 % nutzbarer Feldkapazität, während leichte Böden unter Wintergetreide in weiten Gebieten Nord-, Mittel- und Westdeutschlands bereits Wassergehalte unterhalb dieses für viele Pflanzen kritischen Schwellenwertes aufwiesen.

3.3 Identifizierung von agrarklimatischen Trends in den vergangenen Jahrzehnten

Zunehmend nachgefragt wird ein Einsatz des AMBAV-Modells zur objektiven Beschreibung von agrarklimatischen Trends wie zum Beispiel der langfristigen Entwicklung der Bodenfeuchte in den zurückliegenden Jahren und Jahrzehnten. So wurden in den vergangenen Jahren ebenso oft die Vernässung im Herbst und Winter, die die Bodenbefahrbarkeit beeinträchtigt, wie die zunehmenden Ernteeinbußen durch Trockenheit im Frühjahr und Sommer thematisiert. Dass beide Phänomene zumindest in der Tendenz zu belegen sind, zeigt eine Analyse der 30-jährigen mittleren Bodenfeuchten unter Winterweizen für ausgewählte Monate und verschiedene Böden (Abb. 8-6). In den für Wachstum und Reifung wichtigen Monaten Mai bis Juli hat auf leichten Böden insbesondere in den östlichen Regionen

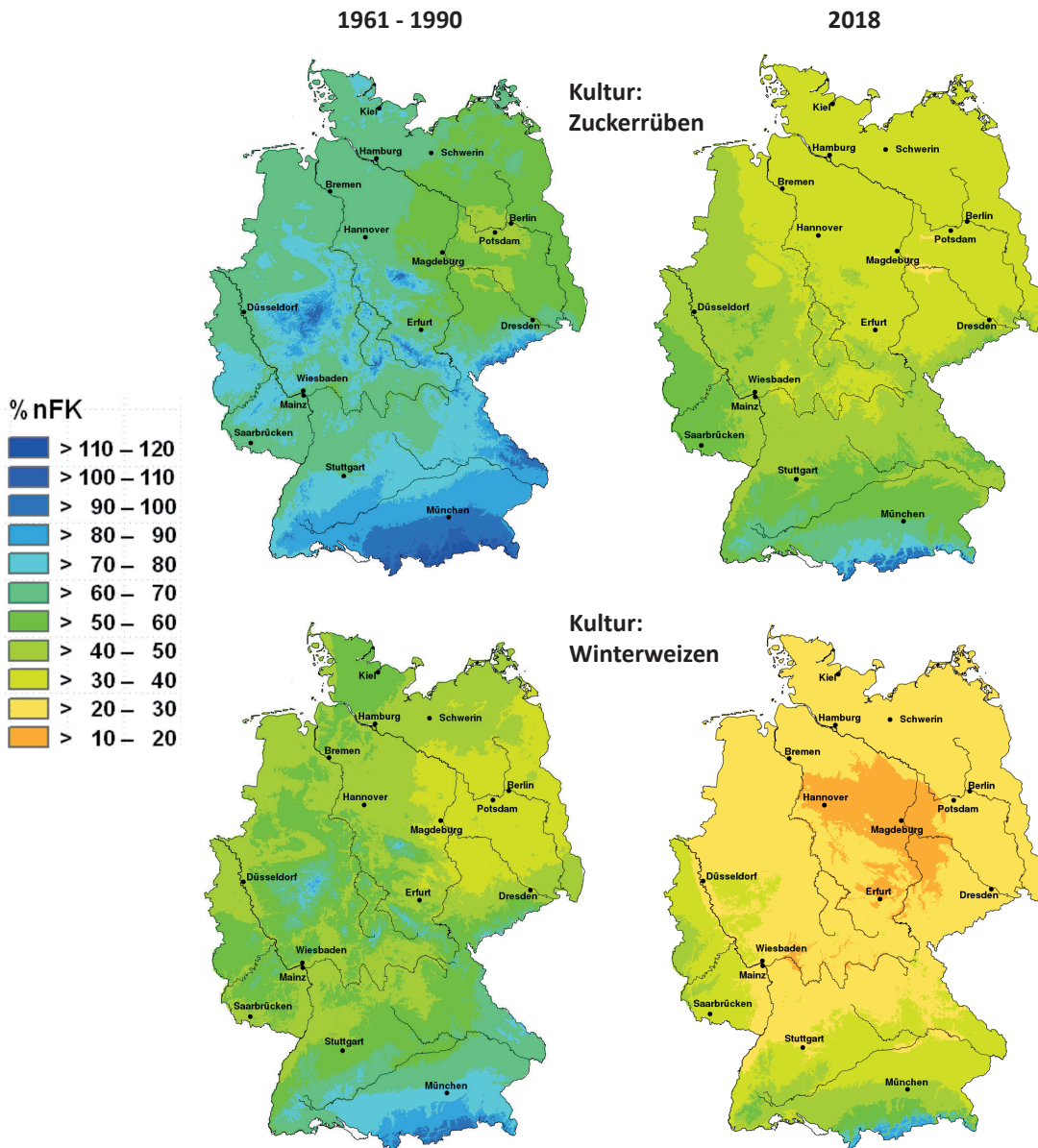


Abb. 8-5: Sommerliche Bodenfeuchte von 0 – 60 cm (Mittelwert der Monate Juni bis August) in % nutzbarer Feldkapazität (%nFK) im langjährigen Mittel 1961-1990 (links) und im Jahre 2018 (rechts) für Zuckerrüben auf schwerem Boden (oben) bzw. Winterweizen auf leichtem Boden (unten), Quelle: www.deutscher-klimaatlas.de.

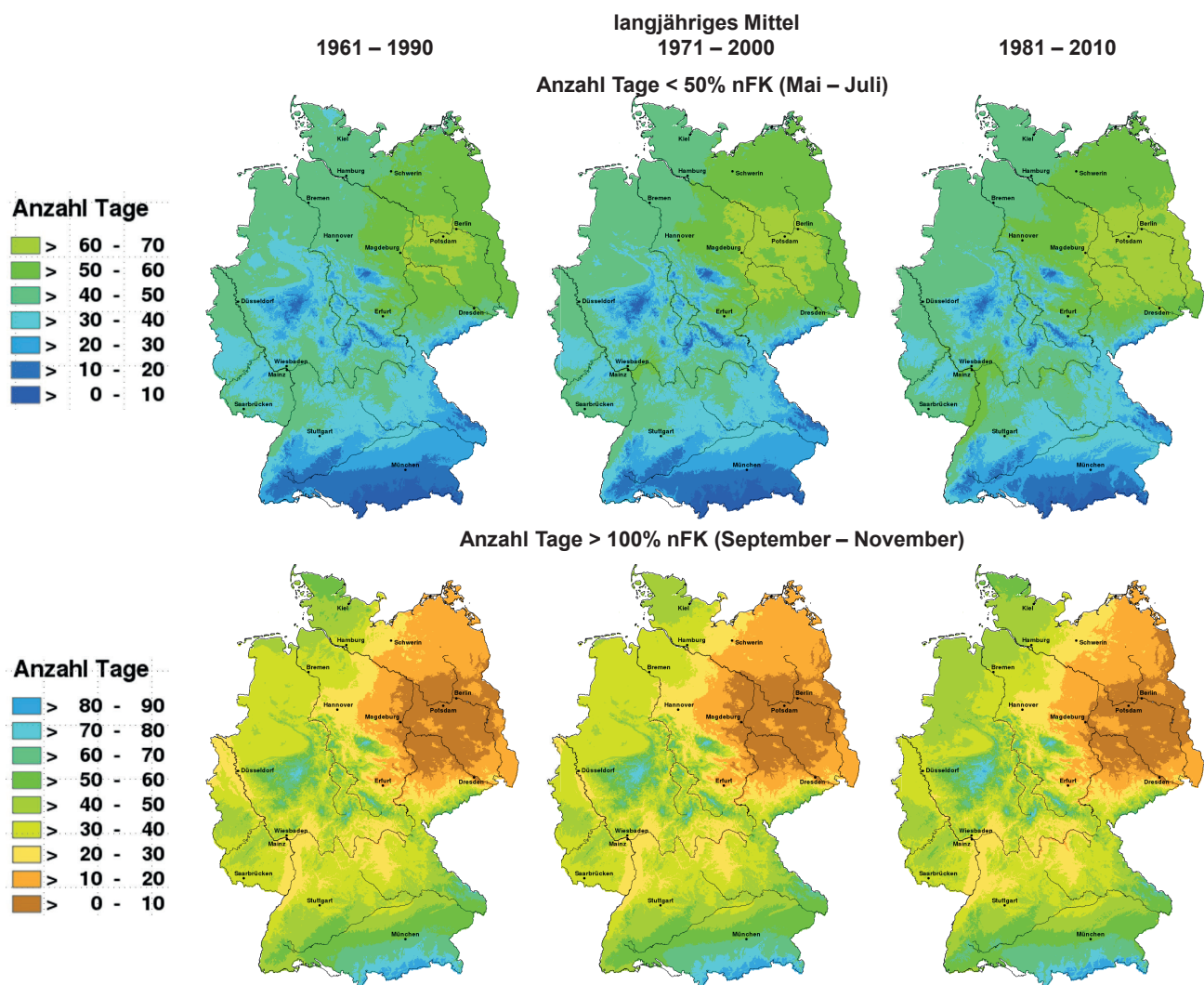


Abb. 8-6: 30-jährige Mittelwerte der Anzahl der Tage mit Bodenwassergehalten < 50% nutzbarer Feldkapazität im Zeitraum Mai bis Juli für Wintergetreide auf leichten Böden (oben) sowie der Tage mit Bodenwassergehalten > 100 % nutzbarer Feldkapazität im Zeitraum September bis November für Wintergetreide auf einem schweren Boden.

die Anzahl der Tage mit suboptimaler Wasserversorgung in den letzten Jahrzehnten zugenommen, während in den für die Aussaat von Winterungen entscheidenden Monaten September bis November im gleichen Zeitraum die Anzahl der Tage mit hohen Bodenfeuchten in den westlichen Regionen auf schweren Böden ebenfalls zugenommen hat. Diese Analyse zeigt, dass die Variabilität der regionalklimatischen Rahmenbedingungen für die hiesige Landwirtschaft zunimmt und Anpassungen der landwirtschaftlichen Praxis zur Risikominimierung unerlässlich macht. Agrarmeteorologische Wirkmodelle können dabei helfen, mögliche regionalspezifische Anpassungsmaßnahmen wie beispielsweise die Auswahl weniger wasserbedürftiger Kulturen, die Beregnung oder die pfluglose Ackerbewirtschaftung besser zu planen.

3.4 Praktische Anwendung des Modells in der Politikberatung

Die Abteilung Agrarmeteorologie des DWD versorgt routinemäßig zwei Mal in der Woche das Bundesministerium

für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) mit Karten zur (mit AMBAV modellierten) Bodenfeuchtesituation landwirtschaftlicher Kulturen. Hierbei werden Wochen-Mittelwerte der beiden zurückliegenden Wochen und die, für die kommende Woche auf Basis der Vorhersagewerte, zu erwartenden Bodenfeuchten in % nutzbarer Feldkapazität für die Hauptdurchwurzelungszone (0 bis 60 cm) dargestellt. Die Berechnungen erfolgen exemplarisch für die Kulturen Wintergetreide und Zuckerrüben mit einer Rasterversion des Modells, die den jeweils vorherrschenden Boden aus der Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000) zugrunde legt. Bei besonders starken Abweichungen von den langjährigen Mittelwerten in Form von starker Trockenheit oder Nässe werden vom DWD, in Absprache mit dem BMEL, Sonderberichte erstellt. Für die Einschätzung solcher Abweichungen wird ein Vergleich der aktuellen Daten mit den mittleren mit AMBAV modellierten Bodenfeuchten der betreffenden Kalenderwoche für den gesamten Zeitraum seit 1961 herangezogen.

3.5 Nutzung der regionalen Klimaprojektionsdatensätze

Regionale Klimaprojektionsdatensätze, die mithilfe agrarmeteorologischer Wirkmodelle erzeugt wurden, sind im Deutschen Klimaatlas (www.deutscher-klimaatlas.de) dargestellt. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels beruhen die Darstellungen noch auf dem SRES (*Special Report of Emission Scenarios*) A1B-Szenario, künftig werden jedoch die RCP (*Representative Concentration Pathways*) Szenarien zugrunde gelegt. Gezeigt werden im Klimaatlas Trendlinien für ausgewählte Monate oder Jahreszeiten in Form geglätteter Mittelwerte für die einzelnen Klimamodelle, die im Ensemble des DWD verwendet werden. Zudem sind Karten dargestellt mit den regionalen Abweichungen der mittleren simulierten Bodenfeuchte gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 für auswählbare 30-Jahres-Perioden bis 2100. Genutzt werden die Projektionsdatensätze auch zur Abschätzung des künftigen Beregnungsbedarfs in der Landwirtschaft. Kulturspezifische Projektionen zur Wasserbilanz landwirtschaftlicher Böden bilden eine wichtige Basisinformation bei der Beantragung von Nutzungsrechten (Wasserkontingente) für die Landwirtschaft durch die zuständigen Verbände.

4 Ausblick

Eine Rückkopplung vom Wirkmodell und der dort berechneten aktuellen Verdunstung und Bodenfeuchte zu den Klimamodellen fehlt bislang und wäre eine folgerichtige Weiterentwicklung der regionalen Klimamodellierung. Vorher müssen die Wirkmodelle allerdings flexibler an die sich ändernden Landnutzungsformen infolge der Veränderung des Klimas und der politischen Vorgaben für die Land- und Forstwirtschaft angepasst werden. So wird gegenwärtig an der Abbildung von Fruchtfolgen und Zwischenfruchtanbau im AMBAV-Modell gearbeitet. Zur Qualitätssicherung der Modellergebnisse sind außerdem umfassende Validierungsstudien in Vorbereitung, die auf Verdunstungs- und Bodenfeuchte-Messdaten aus anderen Forschungsprojekten und -infrastrukturen wie zum Beispiel ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) oder TERENO (*Terrestrial Environmental Observatories*) zurückgreifen werden. Darüber hinaus wird an einer stärkeren Einbeziehung von Fernerkundungsdaten aus dem Copernicus-Programm gearbeitet, wodurch nicht nur die Güte, sondern auch die räumliche Auflösung der Modellsimulationen verbessert werden soll.

Literatur

- BRADEN, H., 2012: Agrarmeteorologische Modelle des Wasser- und Energiehaushalts beim Deutschen Wetterdienst. In: Agrar- und Forstmeteorologie. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **38**, 11-19.
- FAN, J., McCONKEY, B., WANG, H., JANZEN, H., 2016: Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research* **189**, 68-74.
- GÖMANN, H., BENDER, A., BOLTE, A., DIRKSMEYER, W., ENGLERT, H., FEIL, J.-H., FRÜHAUF, C., HAUSCHILD, M., KRENGEL, S., LILIENTHAL, H., LÖPMEIER, F.-J., MÜLLER, J., MUßHOFF, O., NATKHIN, M., OFFERMANN, F., SEIDEL, P., SCHMIDT, M., SEINTSCH, B., STEIDL, J., STROHM, K., ZIMMER, Y., 2015: Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, *Thünen Report* **30**, 312 Seiten.
- JARVIS, P.G., 1976: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond* **273**, 593-610.
- KUTSCHERA, L., LICHTENEGGER, E., SOBOTIK, M., 2009: Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. DLG-Verlag, Band 7.
- LÖPMEIER, F.-J., 1994: Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Z. Bewässerungswirtsch.* **29**, 2, 157-167.
- MEIER, U. (Hrsg.), 1997: BBCH-Monograph. Growth stages of plants. Entwicklungsstadien von Pflanzen. Estadios de las plantas. Stades de développement des plantes. Wien: Blackwell Wissenschafts-Verlag, 622 Seiten.
- VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J., 1990: Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* **149** (1), 1-12.

Autoren

DR. MATHIAS HERBST
Deutscher Wetterdienst
Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung
Bundesallee 33
38116 Braunschweig
mathias.herbst@dwd.de

DR. EVA FALGE
Deutscher Wetterdienst
Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung
Bundesallee 33
38116 Braunschweig
eva.falge@dwd.de

DR. CATHLEEN FRÜHAUF
Deutscher Wetterdienst
Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung
Bundesallee 33
38116 Braunschweig
cathleen.fruehauf@dwd.de

E. NILSON

9

Vier Probleme bei der Umsetzung von „Klimawissen“ in die Praxis – Überlegungen zum Aufbau von Klimaprojektionsdiensten aus der Perspektive einer gewässerkundlichen Bundeseinrichtung

Four problems when bringing “climate knowledge” into practice – Considerations for the construction of climate projection services from the perspective of a federal water institution

Zusammenfassung

Verschiedene Gesetzesnovellen der vergangenen Jahre verpflichten planende und planprüfende Akteure in vielen Bereichen zur Berücksichtigung des Klimawandels und seiner Auswirkungen. Die Frage nach dem „Wie?“ bleibt dabei offen und muss zeitnah sowie für alle Akteure praktikabel beantwortet werden. Anderenfalls kann der Aspekt „Klimawandel“ zu einem Planungshemmnis, z. B. für Maßnahmen der Klimaanpassung werden. Basierend auf Erfahrungen aus dem Bereich der Gewässerkunde, werden als wesentliche Herausforderungen identifiziert: (1) Das Fehlen von (ausreichend strukturierten) Informationen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen, (2) die fehlende Synchronität von taktgebenden Sachstandserhebungen zum Thema Klimawandel, (3) die fehlende Transparenz bezüglich der je nach Klimawirkungsanalyse unterschiedlichen Datengrundlagen und Qualitätskriterien und (4) das Fehlen einer anerkannten Konvention, mit der die unvermeidbar unsicheren Informationen über zukünftige Klimaentwicklung in die Bemessungspraxis überführt werden können. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass wesentliche Voraussetzungen zur Lösung sind: (a) die gemeinsame Entwicklung und Anwendung von Standards für Klimafachdienste sowie (b) eine von Pragmatismus gekennzeichnete Diskussion zu den Regeln einer Anwendung von Klimawissen in der Planungs- und Bemessungspraxis. Als Vorlage kann dabei die derzeit gängige, auf Beobachtungsdaten gestützte Bemessungspraxis dienen. Auch hier wird trotz vieler Unsicherheiten ein Konsens bezüglich der Bemessungswerte erzielt. Es werden Aktualisierungstakte etabliert, die eine Planung in einem naturgemäß variablen Umfeld ermöglichen.

Summary

Various legislative amendments oblige planners and auditors in various fields to take climate change impacts into account. The question about how this could be achieved is open and needs to be answered in a timely and practical manner. Otherwise, the aspect of “climate change” can become an obstacle to planning, for example of climate adaptation measures. Based on experiences from the field of hydrology, the main challenges identified are (1) the lack of (sufficiently structured) information on climate change and its impacts, (2) the lack of synchrony of different climate change assessments, (3) the lack of transparency on the different data sets and quality criteria used in different impact assessments and (4) the absence of an accepted convention on how to translate unavoidably uncertain information about future climate development into design practice. The essential prerequisite for the solution is (a) the joint development and application of standards by climate service providers, and (b) a pragmatism-based discussion on the rules of applying climate change to the design and planning practice. The current design practice based on observational data can be used as a template. Here too, despite many uncertainties, a consensus on rated values is reached and update cycles are established that provide reliable guidance for planning procedures in a naturally variable environment.

1 Einleitung

Klimawirkungsanalysen, also die systematische Evaluierung der spezifischen Auswirkungen des Klimawandels und seiner Bedeutung für ein betrachtetes System, werden sukzessive als Instrumente der Prüfung der Zu-

kunfts-fähigkeit eines Bauwerks, eines Wirtschaftssektors, eines Ökosystems, eines politischen Ressorts oder Handlungsfeldes etabliert. Damit verlässt die Befassung mit dem Klimawandel endgültig den Forschungskontext und hält Einzug in die Bemessungs- und Bewertungspraxis. Wie nachfolgend dargelegt wird, verläuft dieser

Übergang holprig. Verschiedene Herausforderungen müssen gemeistert werden, um zu vermeiden, dass die Berücksichtigung des Klimawandels ein Umsetzungshemmnis bei Planungsvorgängen und zukunftsgerichteten Veränderungen wird.

Im Unterschied zum Forscher ist der Praktiker nicht primär an Erkenntnissen bezüglich bestehender Wirkungszusammenhänge interessiert, sondern hat im Rahmen seiner Arbeit einen pragmatischen Zugang zur Thematik und möchte technisch unkompliziert, inhaltlich transparent, verlässlich und somit schnell und kostengünstig Kenntnis darüber erlangen, ob und ggf. für welchen Zeithorizont und in welchem Maße die Folgen des Klimawandels in seinem Handeln (z. B. bei der Lebenszyklusplanung eines Bauwerks) zu berücksichtigen sind. Die nachfolgenden Ausführungen schildern bestehende Hemmnisse, die in diesem Zusammenhang derzeit auftreten.

2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Deutschland

Die vorgestellten Erfahrungen stammen aus dem Handlungsfeld Wasserwirtschaft, das in vielfacher Weise vom Klimawandel betroffen ist und Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche unseres gesellschaftlichen Lebens hat (BUTH et al. 2015). Zu den für Deutschland projizierten wasserwirtschaftlich relevanten Änderungen gehören Zunahmen der Hochwasserabflüsse bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts, Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts und ein beschleunigter Anstieg des Meeresspiegels über das Ende des 21. Jahrhunderts hinaus. Die Kernaussagen wurden in mehreren Studien bestätigt (z. B. BUTH et al. 2015; NILSON et al. 2014, 2020; HÄNSEL et al. 2020) und führen zu einer intensiven Diskussion bezüglich des Anpassungsbedarfs in der Wasserwirtschaft, insbesondere im Hochwasserrisiko- und Niedrigwassermanagement. Anpassungsentscheidungen werden unter anderem dadurch erschwert, dass sich der Grad der projizierten Änderungen und der erforderlichen Anpassung je nach verwendeter Datenquelle unterscheidet. Einige Gründe für die Unterschiede werden in den folgenden Abschnitten dargelegt.

3 Daten und Methoden

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt werden bereits seit vielen Jahren untersucht (z. B. BARTELS et al. 2004). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde befasst sich in diesem Kontext mit überregionalen Fragen der Wasserwirtschaft, zum Beispiel der Verkehrswasserwirtschaft in Deutschland (NILSON et al. 2014, 2020).

Der dabei angewendete Arbeitsablauf setzt bei hydrometeorologischen Größen (Lufttemperatur, Niederschlag,

Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte) und deren projizierten Änderungen an und setzt diese mittels eines Wasserhaushaltsmodells in hydrologische Größen um (Abfluss, Verdunstung, Schnee, ...). Häufig nachgefragte Kennwerte sind beispielsweise hydrologische Hauptwerte (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser) sowie für die Schifffahrt und Bemessungsfragen relevante Kennwerte an Pegeln in den Einzugsgebieten der großen Flüsse Mitteleuropas (Rhein, Elbe, Donau, Weser und Ems). Als Beispiele seien die mit den sogenannten gleichwertigen Wasserständen, Regulierungsniedrigwasserständen oder höchsten Schifffahrtswasserständen korrespondierenden Abflüsse (GIQ20, RNQ, HSQ) oder Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten (HQ10, HQ100, HQ1000) genannt. Die zugrundeliegenden Modelle und Auswertungsmethoden wurden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen von Forschungsprogrammen entwickelt (z. B. NILSON et al. 2014, 2019). Die Auswertung und Datenbereitstellung erfolgt für weite Teile des Bundesgebietes über einen derzeit als Pilot eingerichteten Dienst (NILSON et al. 2019). Genutzt werden die Daten unter anderem für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (KWVA) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) und verschiedener Bundesressorts, die im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel zusammenarbeiten (vgl. BUTH et al. 2015; in Vorbereitung: KWVA 2021).

Ausgangspunkt bilden derzeit acht globale Klimamodelle (*General Circulation Model*, GCM, davon zwei mit zwei unterschiedlichen Realisierungen, d. h. zehn GCM-Läufe) des *Coupled Model Intercomparison Project Nr. 5* (CMIP5, MEEHL und BONY 2011), die in den Projekten EURO-CORDEX (JACOB et al. 2014) und ReKliEs-De (HÜBENER et al. 2017) mit neun regionalen Klimamodellen (*Regional Climate Model*, RCM, davon zwei in unterschiedlichen Versionen, also elf RCM-Varianten) für Mitteleuropa dynamisch bzw. statistisch regionalisiert wurden. Im April 2019, dem Zeitpunkt, als der Datenbestand für die genannte KWVA 2021 durch die beteiligten Partner eingefroren wurde, waren 41 historische Klimasimulationen mit 39 unterschiedlichen Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen verfügbar. Zukunftsprojektionen lagen auf Basis von drei repräsentativen Konzentrationspfaden vor (RCP8.5 „weiter-wie-bisher“, RCP4.5 „moderat“ und RCP2.6 „Klimaschutz“), wobei nur das Szenario RCP8.5 mit allen GCM-RCM-Kombinationen projiziert wurde (16 x RCP4.5; 17 x RCP2.6). Das „Roh-Ensemble“ (alle RCP, GCM und RCM) umfasste somit insgesamt 74 Simulationen.

Von den 74 Simulationen konnten 22 (basierend auf 13 GCM-RCM-Kombinationen) aufgrund von Fehlern bei der Datenproduktion (Experimentdesign, Datenausgabe) nicht weiter verwendet werden (DWD 2019). Weitere 8 statistische Simulationen (basierend auf 6 GCM-RCM-Kombinationen) wurden aus der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen, da sie die internationalen Einzugsgebiete Deutschlands nicht für alle in der Wasserhaushaltsmodellierung erforderlichen Größen

vollständig abdecken. Somit verblieben zunächst 44 Simulationen (basierend auf 21 GCM-RCM-Kombinationen) im so genannten „Referenz-Ensemble“ für die Klimafolgenbewertung in Deutschland. Diese Kombinationen stellen in Verbindung mit dem Szenario RCP8.5 („Weiter-wie-bisher“; 21 Simulationen basierend auf 19 GCM-RCM-Kombinationen) die Grundlage der KWVA 2021 des Bundes dar. Wie unten, sowie in Beitrag 2 dieses Heftes dargelegt wird, werden für wasserhaushaltsbezogene Klimawirkungsanalysen auf Bundesebene nur 16 und auf Landesebene nur 10 der 21 RCP8.5-Simulationen verwendet beziehungsweise für die Verwendung empfohlen (Stand Oktober 2019).

Der Deutsche Wetterdienst nimmt die Aufbereitung und meteorologische Auswertung der regionalen Klimamodell-daten für die verschiedenen Klimawirkungsanalysen des Bundes und der Länder vor (siehe Beitrag 3 in diesem Heft). Zu den Aufbereitungsschritten gehört eine multivariate Biasadjustierung (CANNON 2018) auf Basis des hydrometeorologischen Referenzdatensatzes HYRAS (Tageswerte; z.B. RAUTHE et al. 2013) sowie eine räumliche Disaggregation auf die ebenfalls von HYRAS vorgegebene 5 x 5 km.

Auf dieser Grundlage wurden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde Wasserhaushaltssimulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME durchgeführt (NILSON et al. 2020). LARSIM-ME ist ein räumlich verteiltes prozessorientiertes Modell, das die deutschen Flusseinzugsgebiete inklusive ihrer oberstrom gelegenen ausländischen Einzugsgebietsanteile in einer horizontalen Auflösung von 5 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag abdeckt. Die Verdunstungsberechnung erfolgt nach dem Ansatz von Penman-Monteith (ATV-DVWK 2002),

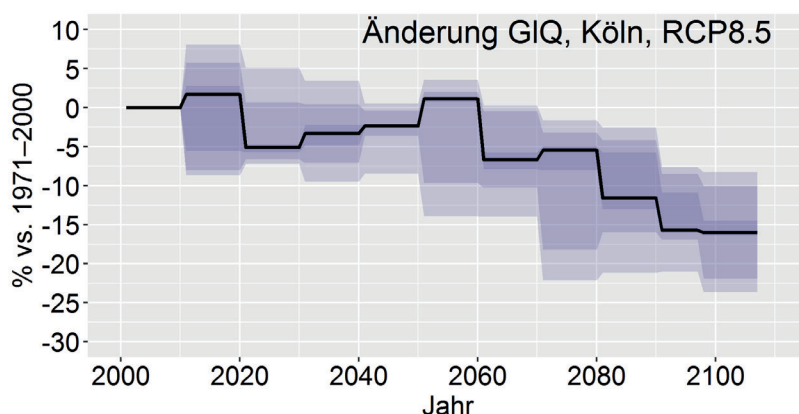


Abb. 9-1: Beispielhafte Auswertung zu den möglichen Änderungen des für das Wasserstraßenmanagement relevanten Kennwertes „GIQ“ (Abfluss, der im Mittel an 20 eisfreien Tagen pro hydrologischem Jahr unterschritten wird) gegenüber der Periode 1971-2000 am Pegel Köln auf Basis von 16 Abflussprojektionen unter Annahme des Szenarios RCP8.5. Die langjährig bestimmten Werte wurden – näherungsweise der Praxis der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes folgend – in der Auswertung jeweils für 10 Jahre „festgelegt“. Die Schattierungen umreißen Unsicherheitsbereiche, in die 70 % (hell), 50 % bzw. 20 % (dunkel) der Simulationen fallen. Die zentrale Schätzung (Median) des Ensembles ist als Linie dargestellt. Bei stark reduziertem GIQ ist an dieser Stelle des Rheins die Mindestwassertiefe von 2,50 m in der definierten Fahrrinne nicht mehr gewährleistet.

der die biasadjustierten Eingangsgrößen Lufttemperatur, Globalstrahlung, 10 m Wind, relative Luftfeuchte und Luftdruck erfordert. Eine wesentliche Eingangsgröße ist ferner der ebenfalls biasadjustierte Niederschlag, der hinsichtlich des in den HYRAS-Daten enthaltenen Niederschlagsmessfehlers LARSIM-intern nochmals angepasst wird. LARSIM-ME generiert Tageswerte aller Wasserhaushaltsgrößen (wie Schnee etc.), wobei der Abfluss an den Pegeln der großen Fließgewässer (Rhein, Elbe, obere Donau, Weser Ems) zu den Schlüsselprodukten zählt. Abbildung 9-1 zeigt eine beispielhafte, oft nachgefragte Auswertung für einen Niedrigwasserkennwert am Pegel Köln.

4 Herausforderungen

4.1 Problem 1: Informationsverpflichtung versus Informationsverfügbarkeit

Motiviert durch globale, europäische und nationale Strategien und Richtlinien ist die Berücksichtigung des Klimawandels in immer mehr nationalen Gesetzen sowie Normen verankert. Dabei geht es sowohl um den Aspekt „Klimaschutz“, als auch um Klimaanpassung. Mit Blick auf Planungsverfahren im Bereich der Wasserwirtschaft wird die Befassung mit dem Aspekt „Anpassung an den Klimawandel“ beispielsweise in den in Tabelle 9-1 aufgeführten Gesetzen gefordert.

Grundlage sind hierbei z.B. Vereinbarungen der Weltgemeinschaft (UN-Klimaabkommen von Paris, Artikel 7), EU-Richtlinien (z.B. EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, 2007/60/EG oder EU-Wasserrahmenrichtlinie, 2000/60/EG) und nationale Politikziele (z.B. Koalitionsvertrag der 19. Legislaturperiode).

Der oder die Planende ist somit verpflichtet, die jeweils relevanten Informationen zum Klimawandel zu berücksichtigen. Im Weiteren muss der oder die Planprüfende feststellen, ob diese Berücksichtigung adäquat erfolgt ist. Beide Akteure benötigen Informationen zum Klimawandel, um den Vorgaben des Gesetzgebers genügen zu können.

Diese liegen jedoch noch nicht für alle gefragten Aspekte vor. Einige Aspekte sind weiter entwickelt und konsolidierter (z.B. Temperaturveränderungen und ihre unmittelbaren Folgen) als andere (z.B. Meeresspiegelanstieg, Starkniederschlag/Sturzfluten). Wenn Informationen verfügbar sind, sind diese aber nicht immer so strukturiert und dokumentiert, dass sie in darstellbarer Zeit, zu darstellbaren Kosten und mit den üblicherweise vorhandenen Kenntnissen zu den naturwissenschaftlichen Zu-

Tab. 9-1: Auswahl von Gesetzen mit Bezug zum Thema Klimaanpassung.

Gesetz	Bezug Klimaanpassung
Raumordnungsgesetz (ROG)	Abschnitt 1, §2 (2) 6
Baugesetzbuch (BauGB)	Kapitel 2, Teil 1, Abschnitt 1 §136 (2) 1
Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)	Anlage 4, (4) c) hh)
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Kapitel 2, Abschnitt 1 §6 (1) 6

sammenhängen aber auch zur Handhabung der Daten verwendet werden können. Informationen zum Klimawandel werden oft in Form von wissenschaftlichen Publikationen oder Fachberichten von Forschungsprojekten und in den dort üblichen Datenformaten (z. B. netCDF) verbreitet, beziehen meist nicht die spezifischen Belange des Planenden beziehungsweise des Planprüfenden ein (Ort, Kennwert, betrachtete Größe, Darreichungsform) und erfordern viel fachliches und technisches Hintergrundwissen (z. B. wegen des Datenvolumens).

Folgen dieser Hürden können Verzögerungen in der Maßnahmenplanung, Kosten für die Erstellung klimawandelbezogener Gutachten und unter Umständen widersprüchliche oder falsche Bewertungen der Daten bezüglich Qualität und Aussage sein, was zu Einwänden und wiederum zu erhöhten Zeit- und Geldaufwänden oder schließlich gar zu einer unangepassten Bemessung sowie einer eingeschränkten oder unerwünschten Funktion der umgesetzten Maßnahme führen kann.

4.2 Problem 2: Aktualität versus Verbindlichkeit

Der Klimawandel und dessen Folgen müssen auf absehbare Zeit weiter beforscht werden, um immer besser begründete Informationen zu den zu erwartenden Veränderungen zu erhalten. Die Erkenntnislage und einige Änderungsaussagen werden sich mit weiterer Entwicklung der Modellwerkzeuge sowie Messdaten zum fortschreitenden Klimawandel in gewissen Grenzen und relativ engem Takt ändern.

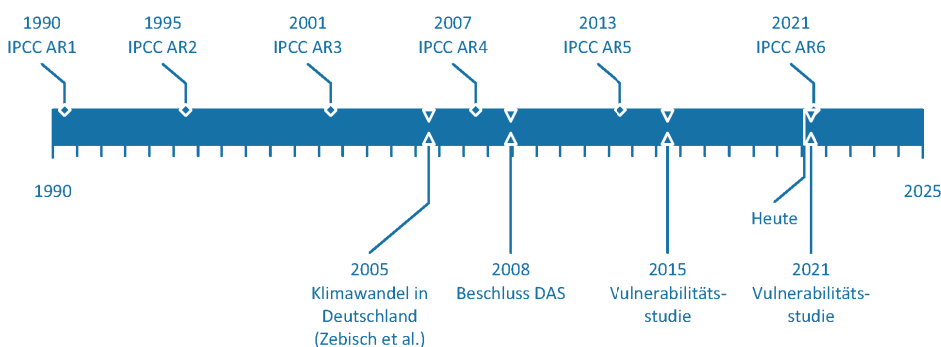


Abb. 9-2: Zeitstrahl mit dem „Takt“ der IPCC-Berichte und der Vulnerabilitätsstudien für Deutschland.

Tab. 9-2: Überblick über den Takt wichtiger Innovations- und Fortschreibungszyklen, die im Bereich der Klimaanpassung relevant sind (Auswahl).

Bezug	Takt (ca.)	letzte Veröffentlichung	nächste Veröffentlichung
IPCC-Sachstandsberichte	7 Jahre	2013	2021
DAS-Vulnerabilitätsberichte	6 Jahre	2015	2021
DAS-Monitoringberichte	4 Jahre	2019	2023
DAS-Fortschrittsberichte	4 Jahre	2020	2024
BMVI-Forschungsprogramme	5 Jahre	2020	2025
Bewirtschaftungspläne	6 Jahre	2015	2021
HWRM-Pläne	6 Jahre	2015	2021

Dieser Dynamik steht der Anspruch entgegen, robuste und verlässliche Grundlagen z. B. für die Planung und Anpassung der (Verkehrs-)Infrastruktur bereitzustellen. Beiden Ansprüchen, der Berücksichtigung aktuellen Wissens und der Verbindlichkeit von Entscheidungsgrundlagen, muss Genüge getan werden.

Der Wissenszuwachs der Klimafolgenforschung wird in regelmäßigen Abständen zusammengeführt. Taktgebend sind dabei die Berichte des Weltklimarates IPCC hinsichtlich globaler Klimaänderungen (alle 5 bis 8 Jahre seit 1990) sowie die Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen, die z. B. im Rahmen der DAS regelmäßig erstellt werden (ca. alle 6 Jahre seit 2015, Vorläufer ZEBISCH et al. 2005; Abbildung 9-2). Ferner führen größere Forschungsprogramme (z. B. KLIWA, KLIWAS, BMVI-Expertennetzwerk) immer wieder zu einem Erkenntniszuwachs, der berücksichtigt werden muss (Tabelle 9-2).

In der Bemessungspraxis ist es bei neuen Erkenntnissen auch ohne Klimawandel üblich, die Grundlagen regelmäßig auf den Prüfstand zu stellen, fortzuschreiben und bei Bedarf Bemessungswerte anzupassen. Damit wird dem aktuellen Klimawandel und der natürlichen Variabilität der Umweltbedingungen Rechnung getragen. Der Niedrigwasserkennwert „GIW“ (bzw. GIQ) wird beispielsweise etwa alle 10 Jahre geprüft (vgl. Abbildung 9-1).

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Zyklen nicht ideal aufeinander abgestimmt sind. Folgen der fehlenden Koordinierung sind ein Mangel an Kohärenz und Transparenz der in Planungsverfahren jeweils zu berücksichtigenden und zu verhandelnden Entscheidungsgrundlagen und Sachständen unterschiedlicher Ressorts und Sektoren und eine entsprechende Verunsicherung der re-

levanten Akteure. Die erforderliche Abstimmung kann zu Verzögerungen und zusätzlichen Kosten führen. Denkbar ist auch die Umsetzung von nicht aufeinander abgestimmten Maßnahmen mit der Konsequenz nicht gehobener Synergiepotentiale.

4.3 Problem 3: Vergleichbarkeit versus Ressort- und Wirkungsspezifität

Es ist wünschenswert, dass alle Ressorts (Umwelt, Verkehr, Wirtschaft), Sektoren (Agrar, Industrie, Dienstleistung) und Regionen (Küste, Binnenland) die Auswirkungen des Klimawandels auf Grundlage einheitlich gewählter Klimaszenarien und eines allgemein gültigen Klimamodellensembles bewerten. Tatsächlich stehen diesem Anspruch jedoch verschiedene praktische und fachliche Punkte entgegen.

Zum einen muss attestiert werden, dass sich die verschiedenen Ressorts und Sektoren (sowie auch deren Untereinheiten) unterschiedlich lang und unterschiedlich intensiv mit den Folgen des Klimawandels auseinandersetzen. Die jeweils verfügbaren Zeit- und Geldressourcen und der jeweils verfügbare eigene Methoden-, Daten- und Wissensfundus sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Ferner genügt in einigen Bereichen die Rechenkapazität nicht, um eine für die jeweilige Fragestellung erforderliche raum-zeitliche Auflösung für längere Zeiträume bzw. größere Regionen zu erreichen. Diese Bereiche können sich nur maßnahmenbezogen und mit einem gegenüber dem kompletten Ensemble deutlich begrenztem Rechenaufwand mit Informationen ausstatten.

Es existieren unterschiedliche Verfahren und „Experiment-Designs“, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Dazu gehören Verfahren der Ensemble-Reduktion. DALELANE et al. (2018) untersuchten die Änderungssignale verschiedener Klimakennwerte eines größeren Ensembles. Sie sortierten Simulationen mit ähnlichen Eigenschaften aus und reduzierten so das Datenvolumen, ohne dass sich die Spanne der Änderungsinformation wesentlich änderte. NILSON und KRAHE (2012) werteten ein Ensemble von Abflussprojektionen hinsichtlich verschiedener Kennwerte und Pegel aus. Für nachfolgende Klimawirkungsmodelle (z. B. Wassergütemodelle) wählten sie spezifisch Projektionen aus, die die Bandbreite des relevantesten Kennwertes und Pegels (z. B. Sommerniedrigwasser) repräsentierten.

Ein anderes Verfahren kann als „modifizierte Ereignisabfolge“ umschrieben werden und findet beispielsweise bei der sehr detailreichen Modellierung der Tidedynamik in der Inneren Deutschen Bucht unter Annahme verschiedener Meeresspiegelszenarien Anwendung. Dabei werden gezielt Abschnitte aus der Beobachtung ausgewählt und mit Klimaänderungsinformationen beaufschlagt (GELÄSCHUS et al. 2018).

Neben praktischen Argumenten stehen auch fachliche Argumente einer vollständigen Einheitlichkeit der verwend-

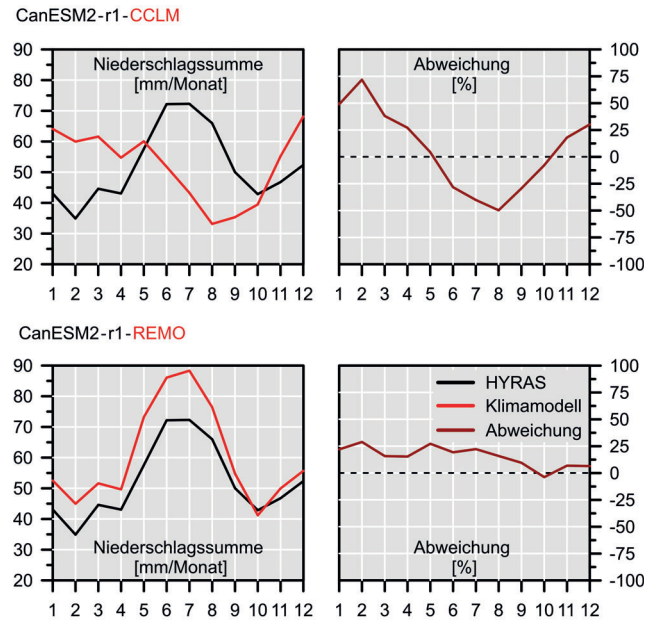


Abb. 9-3: Exemplarischer Vergleich des Niederschlagsjahresgangs (Monatssummen) der nicht biasadjustierten Modellkette CA2_CLM_85 (oben) und CA2_REM_R85 (unten) mit der Beobachtung (HYRAS) im Zeitraum 1971-2000 im Einzugsgebiet der Elbe.

ten Klimaszenarien und Klimamodellensembles entgegen. So gehört es zu den üblichen Arbeitsschritten bei der Klimawirkungsmodellierung, die Qualität der verwendeten Eingangsdaten (hier: Ergebnisse von Klimamodellen) zu prüfen. Die Eingangsdaten unterscheiden sich dabei je nach verwendetem Wirkmodell. Für die Wasserhaushaltsmodellierung spielt dabei die Größe „Niederschlag“ eine besondere Rolle, während andere Wirkmodelle, die zum Beispiel die thermische Belastung des Menschen im urbanen Bereich adressieren, die Lufttemperatur oder andere Größen im Fokus haben.

Modelle haben die Eigenschaft, die Realität nur vereinfacht und ausschnittsweise beziehungsweise näherungsweise zu beschreiben. Ein gewisser systematischer Fehler der verwendeten Klimamodelle, d.h. eine Abweichung von Vergangenheitssimulation und Beobachtung, ist somit unvermeidlich und zu berücksichtigen. Tatsächlich ist es beeindruckend, dass viele dieser Modelle, die abgesehen von der veränderlichen Zusammensetzung der Erdatmosphäre (hier als „Konzentrationspfade“ RCP) vollständig „frei“ laufen, so viele relevante Merkmale des Klimas in Mitteleuropa recht plausibel wiedergeben. Für einige Modelle und Auswertungsaspekte gilt dies jedoch nicht oder nur sehr eingeschränkt.

In Bezug auf eine belastbare wasserwirtschaftliche Klimawirkungsabschätzung muss beispielsweise gefordert werden, dass zumindest einige Grundzüge des Niederschlagsgeschehens (z. B. der Jahresgang) einigermaßen getroffen werden. Dies ist nicht in bei allen Kombinationen von globalem und regionalem Klimamodell der Fall. Einige Kombinationen (z. B. CA2_CLM_R85) zeigen selbst in

großen Einzugsgebieten einen gegenüber der Beobachtung konträren Jahresgang des Niederschlags und weichen damit deutlich von anderen Simulationen ab (siehe Abbildung 9-3).

Das bereits im Forschungsprogramm KLIWAS in ähnlicher Form angewendete Bewertungsschema (NILSON et al. 2014) wird hier nur im Überblick dargestellt, da es sehr dem in Beitrag 2 diesen Heftes für das Land Bayern vorgestellten Verfahren gleicht. Es schließt die Größen Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung ein. Untersucht werden neben dem Bias im einzugsgebietsbezogenen vieljährigen Jahresgang auch grundlegende räumliche Gradienten (z. B. Südwest-Nordost des vieljährigen Jahresniederschlags) und reine Datenfehler (z. B. Regionen oder längere Abschnitte mit Fehlwerten). Das Verfahren führt im Fall von Datenfehlern zu einem unmittelbaren Ausschluss von Modellkombinationen und zu einer Bias-gewichteten Rangfolge der Modelle. Letztere dient als Entscheidungshilfe für die Auswahl von Modellkombinationen.

Aufgrund der Bewertung werden aus den eingangs genannten 21 Modellketten 5 aus der weiteren Aufbereitung und Auswertung ausgeschlossen, so dass sich ein Ensemble von 16 Simulationen für RCP8.5 (11 für RCP4.5 und 10 für RCP2.6) ergibt (siehe Abbildung 9-4 und „BfG“ in Tabelle 9-3). Dieser Ausschluss bezieht sich unter anderem auf die wasserwirtschaftsbezogenen Aussagen im Rahmen der in Aktualisierung befindlichen Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsuntersuchung des Bundes. Drei Simulationen werden derzeit hinsichtlich technischer Fehler korrigiert und könnten in absehbarer Zeit dem Ensemble zur Verfügung stehen.

Extremwertstatistische Analysen können weitere Anhaltspunkte mit sich bringen, die ggf. zu einer weiteren Ausdünnung des Ensembles für diesen Zweck führen. Für die Ableitung extrem seltener Großereignisse mit Jährlichkeiten im Bereich >100 Jahre (z. B. „extreme Hochwasser“ laut

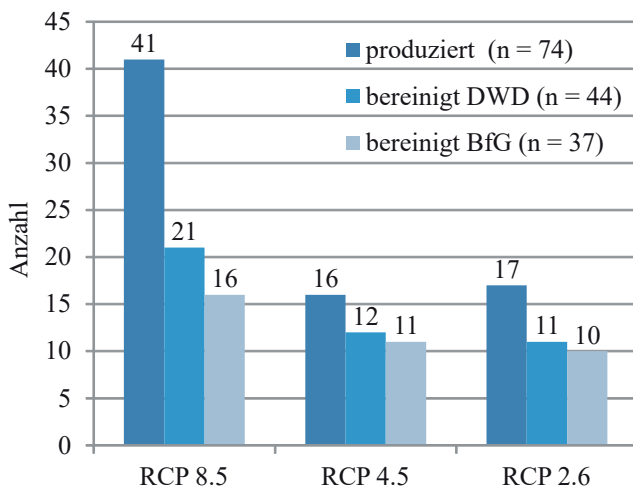


Abb. 9-4: Anzahl der regionalen Klimasimulationen für die verschiedenen RCP-Szenarien; gegliedert in das produzierte „Roh-Ensemble“, sowie zwei nach Qualitätskontrolle bereinigte „Referenz-Ensembles“ (vgl. Text).

Extrapolation auf maximal das Dreifache). Die BfG hat sich daher entschieden, für die extremwertstatistisch untersuchten Pegel die Serien jährlicher Hochwasser-Ereignisse aller 16 Simulationen des RCP8.5 in einem „Grand Sample“ zusammenzufassen. Argumente, die für dieses Vorgehen sprechen sind, dass (a) die Klimasimulationen nach einheitlicher Bias-Adjustierung vergleichbar sind und (b) nach Anwendung dieser Daten mit ein und demselben Wasserhaushaltsmodell (LARSIM-ME) auch die Abflusssimulationen als zu einer Stichprobe gehörend betrachtet werden können. Die Prüfung der empirischen Verteilung, die wesentliche Charakteristika der beobachtungsgestützten Verteilung widerspiegelt, stützt diese These. Eine Ausnahme sind die durch das globale Klimamodell HadGEM angetriebenen Modellketten. Diese produzieren unabhängig vom regionalen Klimamodell auffällig viele 1000-jährliche Hochwasserereignisse (3 bis 5 Ereignisse in 130 Jahren). Es muss überprüft werden, ob diese Ereignisse das Ergebnis plausibler Überregnungsmuster sind und ob eventuell die Bias-Adjustierung die Niederschläge im Extrembereich künstlich überhöht hat. Vorläufig werden die drei durch HadGEM angetriebenen Modellketten für extremwertstatistische Analysen nicht weiter betrachtet („BfG-Extrem“ in Tabelle 9-3).

Auf der Basis des BfG-Ensembles (Spalte „BfG“ in Tabelle 9-3) wurde eine Ensemble-Reduktion für niedrigwasserbezogene Klimawirkungen an Rhein und Elbe nach dem Verfahren von NILSON und KRAHE (2012; siehe oben) durchgeführt, um z. B. Wassergütefragen mit nur fünf repräsentativen Modellläufen beantworten zu können („BfG-Wassergüte“ in Tabelle 9-3).

Tab. 9-3: Übersicht der Modellkombinationen (GCM_RUN_RCM) und verschiedenen (Teil-)Ensembles im Kontext aktueller Klimawirkungsanalysen. Grau hinterlegt (und eingeklammert) sind Modellkombinationen, bei denen derzeit Datenfehler korrigiert werden und die in absehbarer Zeit zur Verfügung stehen sollen. Spalte „Bayern“ bezieht sich auf die Auswahl von ZIER et al. (Beitrag 2 in diesem Heft).

GCM_RUN_RCM	DWD	BfG	BfG-Extrem	BfG-Wassergüte	Bayern*
CA2_CLM_R85	X				
CA2_REM_R85	X	X	X		
E01_WRF_R85	X	(X)	(X)		(X)
E01_RAC_R85	X	X	X	X	X
E12_CLM_R85	X	X	X	X	X
E12_RAC_R85	X	X	X	X	X
E12_REM_R85	X	X	X		
HG2_CLM_R85	X				
HG2_RAC_R85	X	X			
HG2_RCA_R85	X	X			
HG2_REM_R85	X	X			
HG2_WRF_R85	X	(X)	(X)		(X)
IP5_RCA_R85	X	X	X		
MI5_CLM_R85	X	X	X	X	X
MI5_REM_R85	X	X	X		
MP1_CLM_R85	X	X	X		X
MP1_RCA_R85	X	X	X		X
MP1_REM_R85	X	X	X		
MP2_REM_R85	X	X	X		
MP1_WRF_R85	X	(X)	(X)		(X)
n (RCP8.5) =	21	16 (19)	13 (16)	5	7 (10)

4.4 Problem 4: Objektive Datenanalyse versus zielorientierte Entscheidung

Die Praxis braucht klimawandelangepasste Kennzahlen und Bemessungswerte. Dabei besteht oft die Erwartung oder der Wunsch, dass sich diese „Klimazuschläge“ als Ergebnis einer Datenanalyse von Modellausgaben gleichsam automatisch und objektiv errechnen lassen. Tatsächlich sind die Ergebnisse der Klima(wirkungs)modellierung gleich an mehreren Punkten ihrer Entstehung von subjektiven Entscheidungen geprägt. Dies beginnt mit der Festlegung der Szenarien zur Zusammensetzung der Erdatmosphäre (als Emissionsszenarien oder repräsentative Konzentrationspfade) und setzt sich fort über die Wahl der Kombinationen von globalem und regionalen Klimamodell (*Ensemble of Opportunity*) sowie der in diesen Modellen berücksichtigten Prozesse und Parameter. Ebenso subjektiv werden im Bereich der Wirkmodelle (z. B. Wasserhaushaltsmodell) Entscheidungen bezüglich der Auswahl von Systemdaten (Landnutzung), Prozessabbildungen (z. B. Verdunstungsansatz), des tolerierten Klimamodellbias (siehe oben), des verwendeten Bias-Adjustierungsverfahrens beziehungsweise der als „hinreichend“ erachteten Güte des Wirkmodells (z. B. Schwellenwerte für Gütemaße) getroffen. Weitere Konventionen gibt es bei der Auswertung von Ergebnissen, beispielsweise zur Art der Erfassung einer Ergebnisbandbreite über Minimum, Maximum, Perzentile, Verdichtungskorridore oder ein *Multi-model-mean*.

5 Diskussion und Fazit

Die Nutzbarkeit von Daten und Informationen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen muss deutlich erleichtert werden. Bereits die Übersicht der produzierten und verwendbaren Klimamodellkombinationen (Abschnitte 2 und 3.4) zeigt, wie schwierig und zeitaufwändig es ist, die aktuelle Sachlage zu erfassen. Dies untermauert den deutlich steigenden Bedarf an Klimaberatungsleistungen. Aufgrund der geänderten Gesetzeslage ist dabei Eile geboten, um Verzögerungen und Mehrkosten im Vollzug von Bau- und sonstigen Maßnahmen zu vermeiden.

Es gibt nur recht offene Definitionen dessen, was ein „Klimadienst“ ist und leisten muss (CORTEKAR et al. 2014). Im Kontext der Klimadienstleistungen gibt es „Klimadaten- und Projektionsdienste“, die Beobachtungs- und Projektionsdaten für Nutzer mit relativ viel technischem Hintergrundwissen bereitstellen (z. B. www.esgf-data.dkrz.de). Verbreitet sind ferner „Klimainformationsdienste“, die Zusammenhänge erklären und Daten in aggregierter und visuell aufbereiteter Form (Kennwerte, Karten, Berichte) bereitstellen (z. B. KlimaAtlas des DWD; KlimafolgenOnline des PIK; einige Bundesländer) und „Klimametadienste“, die als Drehscheibe zu verschiedenen Klimadaten und -informationsdiensten fungieren (z. B. das Klimavorsorgeportal des Bundes, www.klivoportal.de). Diese Dienste leisten grundsätzlich einen Beitrag zur Verbesserung des Informationsstandes, folgen aber weder einem einheitlichen und ausreichenden Qualitätsstandard,

noch sind sie ausreichend auf die Geschäftsprozesse der Nutzer abgestimmt. Wichtige Aspekte der Qualitätssicherung und Transparenz sind z. B. Aussagen darüber, welche Klimamodelle in welcher Version weshalb verwendet wurden und warum andere Modelle nicht berücksichtigt wurden. Es muss ferner sichergestellt werden, dass Produkte, deren Datengrundlage veraltet sind oder sich sogar als fehlerhaft herausgestellt haben, mit entsprechenden Hinweisen versehen oder aktualisiert werden. Da die derzeit verfügbaren Dienste oft forschungsfinanziert sind und damit nach Abschluss der Forschungsprojekte nicht weiter gepflegt werden, ist dies nicht immer gewährleistet. Es ist nur mit erheblichem Rechercheaufwand und für den Laien gar nicht möglich, aktuelles von überholtem Klimawissen zu unterscheiden. Die Art der Übersetzung von Forschungswissen in einen verfügbaren Dienst für die Praxis muss grundlegend überdacht und deutlich besser organisiert werden. Derzeit ist die Anwendung fehlerhafter und mittlerweile zurückgezogener Daten möglich!

Zur Qualitätssicherung gehört unter anderem die oben, aber auch bei ZIER et al. (Beitrag 2 in diesem Heft) angesprochene Bewertung und Auswahl von Klimamodellen, die hier für die spezifischen Anforderungen wasserhaushaltsbezogener Klimawirkungsanalyse durchgeführt wurde. Für andere Klimawirkungen (jenseits des Wasserhaushalts) spielen andere Eingangsgrößen eine Rolle. Es gelten andere Qualitätskriterien, die zu einer anderen Modellauswahl führen können. Wenn alle Kriterien gleichzeitig angewendet würden – z. B. mit dem Ziel ein für alle Bereiche bindendes Projektionsensemble zu erstellen –, bleiben möglicherweise nur sehr wenige bzw. keine gemeinsamen Modellkombinationen für die Abschätzung von Klimafolgen (inkl. deren Unsicherheiten) übrig. Die anwendungsspezifische Auswahl und damit eine gewisse Heterogenität der in unterschiedlichen Ressorts, Sektoren und Handlungsfelder verwendeten Datengrundlagen muss derzeit hingenommen werden. Es ist jedoch wichtig, die Unterschiede transparent zu machen und in einen Überblick zu bringen. Hier muss eine abgestimmte Kommunikation der verschiedenen sektorspezifischen „Klimafachdienste“ herbeigeführt werden.

Anwendungsspezifisch sind auch die Aufbereitung und die Darreichungsformen von Daten und Informationen. Um sicherzustellen, dass die Anwendung von Klimawandelinformationen zum Beispiel in Planungsvorgängen praktikabel ist, müssen die „Einstieghürden“ gesenkt werden, indem die Datenanbieter sich weiter als bisher auf die Nutzer zubewegen. Die Bereitstellung von vorkonfigurierten Karten und Tabellen im Internet ist sicherlich nicht ausreichend. Es ist anzustreben, sukzessive die Geschäftsprozesse der Nutzer zu analysieren und Schnittstellen im Detail auszugestalten.

Dabei können Erfahrungen und Vorgehensweisen der „klassischen“, auf Beobachtungsdaten basierenden Bemessungspraxis genutzt werden. Auch hier werden trotz Unsicherheiten in der Datengrundlage konkrete Werte festgelegt und abgestimmt und in für die Planer verlässlichen Aktua-

lisierungszyklen angewendet. Genannt sei die Praxis, zum Hochwasserschutz ein Bemessungshochwasser aufgrund von zyklisch zu überprüfenden statistischen Analysen festzulegen (z. B. auf HQ_{100}) oder das mit dem alle 10 Jahre neu festgelegten „Gleichwertigen Wasserstand“ ausgedrückte Ziel, garantierte Mindestdiefen für die Schifffahrt an 20 eisfreien Tagen pro Jahr vorzuhalten. Von dieser zielorientierten Entscheidungsfindung können Klima(folgen)forscherinnen und Klima(folgen)forscher profitieren. Hilfreich kann es dabei sein, eine „Forschungslinie“, die Neuerungen der Forschungslandschaft aufnimmt, prüft und gegebenenfalls in Richtung neuer/verbesserter Beratungs- und Datenprodukte weiterentwickelt, zu unterscheiden von einer „Produktlinie“, die bestehende, konsolidierte Beratungs- und Datenprodukte pflegt, für den Nutzer komfortabel bereitstellt und gegebenenfalls Entwicklungsperspektiven an die Forschungslinie zurückgibt.

Literatur

- ATV-DVWK, 2002: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. ATV-DVWK - Regelwerk, Merkblatt M 504, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- BARTELS, H., HOFIUS, K., KATZENBERGER, B., KRAHE, P., WEBER, H., 2004: Klima und Wasserwirtschaft. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Numerische Klimamodelle - Was können sie, wo müssen sie verbessert werden?, *promet* **30/4**, 169-180.
- BUTH, M. et al., 2015: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Climate Change* **24**, 690 S.
- CANNON, A. J., 2018: Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics* **50** (1), 31-49, doi:10.1007/s00382-017-3580-6.
- CORTEKAR, J., MÁÑEZ, M., ZÖLCH, T., 2014: Klimadienstleistungen in Deutschland – Eine Analyse der Anbieter und Anwender, Climate Service Center, Germany.
- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A., 2018: A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **57** (3), 477-491.
- DWD, 2019: Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_deutschland_node.html, zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- GELÄSCHUŠ, H., RUDOLPH, E., SEIFFERT, R., WINKEL, N., 2018: BAW-Bildatlas. Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105573>.
- HÄNSEL, S., HERRMANN, C., JOCHUMSEN, K., KLOSE, M., NILSON, E., NORPOTH, M., PATZWAHL, R., SEIFFERT, R., 2020: Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019, online verfügbar unter: https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/TF1_3Auflage.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- HÜBENER, H. et al., 2017: ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Ergebnisbericht, 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.
- JACOB, D. et al., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* **14** (2): 563-578, DOI:10.1007/s10113-013-0499-2.
- KWVA, 2021: Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021: Wie verwundbar ist Deutschland gegenüber dem Klimawandel? In: Umweltbundesamt (Hrsg.), *Climate Change, in Vorbereitung*.
- MEEHL, G.A., BONY, S., 2011: Introduction to CMIP5. *CLIVAR Exchanges* **16** (56).
- NILSON, E., KRAHE, P., 2012: Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **31**, 287-293.
- NILSON, E. et al., 2014: Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, doi:10.5675/Kliwas_43/2014_4.01.
- NILSON, E. et al., 2019: ProWaS - Climate Projection service for Waterways and Navigation in Germany. 21st EGU General Assembly, Wien, Österreich, *Geophysical Research Abstracts* **21**.
- NILSON, E. et al., 2020: Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. doi: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A., 2013: A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* **22** (3), 235-256. doi:10.1127/0941-2948/2013/0436.
- ZEBISCH, M. et al. 2005: Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. In: Umweltbundesamt (Hrsg.), *Climate Change* **8**.

Autor

DR. ENNO NILSON
 Bundesanstalt für Gewässerkunde
 Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen, Prognosen (M2)
 Am Mainzer Tor 1
 56068 Koblenz
 nilson@bafg.de

A. WALTER, C. HAßE, W. MEISTER

10 Klimawandel und Normen

Climate change and standards

Zusammenfassung

Erste Anzeichen der Folgen des Klimawandels sind zunehmend sichtbar, nicht zuletzt bei Schäden durch Extremwetterereignisse wie Hitze, Starkregen und Hagel sowie durch Stürme. Diese Extremwetterereignisse verursachen zum Teil erhebliche Beeinträchtigungen und Schäden an der Infrastruktur. Alleine 2017 sind seitens der Versicherer 2 Milliarden Euro für Schäden durch Stürme und Starkregen in Deutschland bilanziert worden. Das Ausmaß ist vielfältig und noch nicht abschließend absehbar. Die Beeinträchtigungen und Schäden durch Unwetter und Extremereignisse können wirksam begrenzt und minimiert werden, etwa durch eine bessere Berücksichtigung zukünftiger Klimabedingungen bei normativen Festlegungen. Dies setzt allerdings voraus, dass die mit den Folgen des Klimawandels verbundenen Risiken frühzeitig erkannt und eingehend bewertet werden. Dabei ist das Spektrum betroffener Produkte sehr breit. Lokal sind insbesondere Gebäude- und Verkehrsinfrastrukturen vulnerabel gegenüber Extremwetterereignissen, aber durch immer komplexer werdende globale Lieferketten sind darüber hinaus auch eine Vielzahl weiterer Sektoren betroffen. Dieser Beitrag befasst sich mit den gegenwärtigen und zukünftigen Aktivitäten auf dem Gebiet der internationalen und nationalen Normung im Kontext der Anpassung an den Klimawandel. Dabei werden auch Anforderungen an Klimamodelle vor diesem Hintergrund formuliert.

Summary

The first signs of the consequences of climate change are increasingly visible, not at least in the case of losses due to extreme weather events such as heat, heavy rain and hail, and windstorms. These extreme weather events sometimes cause considerable impairment or damage to infrastructure. In 2017 alone, the insurers have reported 2 billion euros for losses caused by storms and heavy rain in Germany. The extent to which they will be affected is varied and cannot yet be conclusively predicted. The adverse effects and damage caused by storms and extreme events can be effectively limited and minimised, for example by taking better account of future climate conditions in normative specifications. This requires, however, that the risks associated with the consequences of climate change are identified at an early stage and assessed in detail. The spectrum of products affected is very broad. Locally, building and transport infrastructures in particular are vulnerable to extreme weather events, but a large number of other sectors are also affected by increasingly complex global supply chains. This contribution deals with current and future activities in the field of international and national standardization in the context of adaptation to climate change. Requirements for climate models are also formulated against this background.

1 Gegenwärtige Situation

Durch die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurde in den letzten Jahren bereits eine Vielzahl konkreter Maßnahmen zur Klimaanpassung umgesetzt.

Als ergänzenden Schritt empfehlen die Fortschrittsberichte zur DAS (BUNDESREGIERUNG 2015, 2020) unter anderem eine verstärkte Nutzung technischer Re-

gelwerke und Normen im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel. Neben Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN) sollen dabei auch die Normen anderer regelsetzender Institutionen in Deutschland in Betracht gezogen werden, etwa VDI-Richtlinien (Verein Deutscher Ingenieure) oder das DWA-Regelwerk (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall), sowie weitere untergesetzliche technische Regelwerke. Die DWA veröffentlichte beispielsweise bereits im Jahr 2016 das Merkblatt „Risikomanagement in der

kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ (DWA 2016).

Es ist davon auszugehen, dass die Normungsaktivitäten im Bereich „Anpassung an den Klimawandel“ in den nächsten Jahren massiv zunehmen werden, da die Thematik zurzeit verstärkt durch internationale und nationale Aktivitäten propagiert wird.

Dabei ist die Klimaforschung und -modellierung insbesondere gefordert, räumlich hochaufgelöste Datensätze (inklusive der realistischen Darstellung seltener Ereignisse) nicht nur für Deutschland und Europa, sondern aufgrund der stetig wachsenden internationalen Verflechtungen und Transportwege, auch global bereitzustellen.

Zurzeit ist die Erkenntnis, dass der Klimawandel insbesondere bei Vorhaben mit einer hohen Lebensdauer berücksichtigt werden sollte, in Normierungskreisen noch nicht stark ausgeprägt. Jedoch müssen langlebige Infrastrukturen (Gebäude, Verkehrsinfrastruktur, ...) in ihrer technischen Auslegung auch die Gegebenheiten berücksichtigen, die Klimamodelle für die kommenden Jahrzehnte erwarten lassen. Das BMVI-Expertenetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur liefert beispielsweise erste Beiträge zu drängenden Verkehrsfragen der Zukunft durch Innovationen in den Bereichen Klimaanpassung, Umweltschutz und Risikomanagement.

Falls in Normierungskreisen derzeit bereits Klimaprojektionen berücksichtigt wurden, ist das zumeist auf die Initiative Einzelner zurückzuführen und nicht koordiniert. Meistens werden hierfür Rohdaten verschiedener Quellen genutzt und individuell für eine entsprechende Verwendung aufbereitet.

Diesen Tatsachen wird seit einigen Jahren verstärkt durch internationale, europäische und nationale Institutionen entgegengewirkt und versucht, in neue und bereits bestehende Normen das Thema „Anpassung an den Klimawandel“ zu integrieren.

2 Nationale Aktivitäten

Die DIN-Koordinierungsstelle Umweltschutz (KU) wurde im Jahr 1992 durch eine Vereinbarung zwischen dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und DIN gegründet und unterstützt seit mehr als 25 Jahren die DIN-Arbeitsausschüsse bei der Einbeziehung von Umweltgesichtspunkten in nationale, europäische und internationale Normen. Die KU wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und vom Umweltbundesamt (UBA), sowie von DIN selbst finanziell gefördert. Die

Aufgaben der KU werden von der KU-Geschäftsstelle und dem KU-Fachbeirat gemeinsam wahrgenommen. Im KU-Fachbeirat sind alle interessierten Kreise wie Wirtschaft, Umweltbehörden, Umweltverbände, Verbraucher, Wissenschaft, Gewerkschaften und die öffentliche Hand vertreten.

Der Arbeitskreis KU-AK 4 „Anpassung an den Klimawandel“ erarbeitet Strategien und Instrumente zur Sensibilisierung der an der Normung beteiligten Kreise. Dadurch soll eine Anpassung der relevanten Normen an sich durch den Klimawandel ändernden Bedingungen erreicht werden. Der KU-AK 4 bietet insbesondere Unterstützung bei der Umsetzung der Anpassung von bestehenden Normen an die sich durch den Klimawandel ändernden Klimabedingungen und bei der Vulnerabilitätsbewertung eines Normungsgegenstandes an. Darüber hinaus kann der KU-AK 4 Hilfe zur Datenakquise, Dateninterpretation und Datenaufbereitung geben. Ebenso bietet der KU-AK 4 Hilfestellung zur Formulierung von nationalen Stellungnahmen für europäische oder internationale Projekte an, die klimawandelrelevante Bereiche adressieren.

Zu den originären Aufgaben des Arbeitskreises zählen insbesondere

- den aktuellen Erkenntnisstand zum Klimawandel und seine wahrscheinlichen Folgen relevanten Normungsgremien zu vermitteln;
- die Aufklärung und Bewusstseinsbildung über die Notwendigkeit der Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu stärken, unter anderem mit regionaler Ausprägung;
- die normative Umsetzung der Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Praxis mit Anleitungen konkret zu unterstützen, sowohl regional und lokal, als auch objektbezogen; und
- eine breite und offene Plattform zum Erfahrungsaustausch über die Identifizierung und Bewertung der Vulnerabilität (Verletzbarkeit) als eine wesentliche Voraussetzung der Anpassung, sowie die Erarbeitung und Umsetzung von Konzepten und Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz anzubieten.

Die deutsche Sprachfassung des CEN-CENELEC¹ Guide 32 wurde im August 2018 als DIN-Spezifikation DIN SPEC 35202 „Leitfaden zur Einbeziehung der Anpassung an den Klimawandel in Normen“ veröffentlicht. Der Leitfaden soll Normenersteller dabei unterstützen, Auswirkungen des Klimawandels auf einen speziellen Normungsgegenstand zu verstehen und Anpassungsaspekte bei der Normerstellung mit zu berücksichtigen. Er ist auf Produkt- (einschließlich Produktgestaltung), Dienstleistungs-, Infrastruktur- und Prüfnormen anwendbar. Der Leitfaden soll es ermöglichen, relevante

¹ Comité Européen de Normalisation *Électrotechnique* (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)

Klimaauswirkungen zu identifizieren und Aspekte der Anpassung an den Klimawandel in neue oder überarbeitete Normungsdokumente aufzunehmen. Hierfür schlägt er einen schrittweisen Ansatz vor, der auf dem Prinzip des „Lebenszyklusdenkens“ beruht.

Mit dem Beiblatt zur DIN SPEC 35220 (DIN 2018) wird beispielhaft ein Normungsgegenstand einer Analyse und Vulnerabilitätsbewertung gegenüber Auswirkungen des Klimawandels unterzogen. Mit der beispielhaften Anwendung der DIN SPEC 35220 „Anpassung an den Klimawandel – Umgang mit Unsicherheiten im Kontext von Projektionen“ (derzeit in Überarbeitung) an dem konkreten Normungsgegenstand „Sommerlicher Wärmeschutz von Gebäuden“ sollen Normer bei der Anpassung von Normen an die Folgen des Klimawandels konkret unterstützt werden. Im gewählten Praxisbeispiel basiert die Analyse der Vulnerabilität auf der Anwendung der DIN 4108-2 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“.

3 Internationale Aktivitäten

Der Unterausschuss ISO²/TC³ 207/SC⁴ 7 „Greenhouse gas management and related activities“ im ISO/TC 207 „Environmental management“ behandelt neben dem bisherigen Themengebiet „Management von Treibhausgasemissionen“ (Minderung des Ausmaßes des Klimawandels), auch das Thema „Anpassung an den Klimawandel“. Zur Spiegelung der damals startenden ISO-Arbeiten wurde im Februar 2016 der Arbeitsausschuss NA⁵ 172-00-13 „Anpassung an die Folgen Klimawandels“ im DIN-Normungsausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) gegründet.

Dieser Arbeitsausschuss war wesentlich mit der Erarbeitung der ISO 14090 „Adaptation to climate change-Principles, requirements and guidelines“ betraut.

Diese Norm legt Grundsätze, Anforderungen und Richtlinien für die Anpassung an den Klimawandel fest. Dazu gehört die Etablierung von Anpassungsmaßnahmen innerhalb eines Unternehmens, die Absprache von Anpassungsmaßnahmen zwischen Unternehmen sowie das Verständnis von Auswirkungen und Unsicherheiten und wie diese genutzt werden können, um Entscheidungen zu treffen.

Die ISO 14090 gilt für jedes Unternehmen, unabhängig von Größe und Art (lokale, regionale, internationale, Geschäftseinheiten, Konglomerate und ganze Industriesektoren), und unterstützt die Entwicklung von sektor-, aspekt- oder elementspezifischen Anpassungsstandards an den Klimawandel. Die Norm wurde inzwischen auch

als europäische (und in Kürze auch als nationale) Norm übernommen, sie liegt somit auch in deutscher Sprache vor und kann entsprechend referenziert werden (DIN EN ISO 14090).

Ein weiterer wesentlicher Schwerpunkt des Arbeitsausschusses ist die federführende Erarbeitung der ISO 14091 „Adaptation to climate change - Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment“. Hier werden Leitlinien für die Bewertung der Risiken im Zusammenhang mit den potenziellen Auswirkungen des Klimawandels gegeben.

Die Norm beschreibt, wie man Schwachstellen versteht und wie eine tragfähige Risikoabschätzung vor dem Hintergrund des Klimawandels entwickelt und implementiert werden kann. Das Dokument kann zur Beurteilung der Risiken des Klimawandels in Gegenwart und Zukunft verwendet werden. Gemäß dieser Norm bildet die Risikobewertung die Grundlage für die Planung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel, sowie deren Implementierung, Überwachung und Bewertung. Die ISO 14091 wird 2020 fertig gestellt und veröffentlicht. Auch hier ist die Übernahme als europäische und nationale Norm vorgesehen.

Neben diesen beiden bereits fertig gestellten beziehungsweise sehr weit fortgeschrittenen Normen begleitet der Arbeitskreis auch die Erarbeitungen der ISO Normen 14082 „Radiative Forcing Management - Guidance for the quantification and reporting of radiative forcing-based climate footprints and mitigation efforts“, ISO 14097 „Framework and principles for assessing and reporting investments and financing activities related to climate change“, ISO/TS 14092 „Adaptation to climate change-Requirements and guidance on adaptation planning for local governments and communities“ sowie weitere ISO-Aktivitäten.

4 Europäische Aktivitäten

Auch auf europäischer Ebene wird die Anpassung an den Klimawandel derzeit intensiv behandelt. So erhielt die europäische Normungsinstitution CEN von der Europäischen Kommission ein Mandat, relevante europäische Standards auf die Notwendigkeit hin zu überprüfen, den Klimawandel explizit zu berücksichtigen. CEN ist verantwortlich für europäische Normen (EN) in allen technischen Bereichen außer der Elektrotechnik und der Telekommunikation.

Aus diesen Bestrebungen erwuchs die *Adaptation to Climate Change – Coordination Group* (ACC-CG). In der gegenwärtigen Projektphase werden europäische Standards unter anderem aus den Bereichen Infrastruktur, thermische Gebäudeisolierung, Elektroinstallationen für Bahn-

² International Organization for Standardization

³ Technical Committee

⁴ Sub Committee

⁵ Normungs-Ausschuss

anwendungen, Bodenversorgung für Flugzeuge, Rechenzentrumseinrichtungen und –infrastrukturen und viele weitere auf die Notwendigkeit der Anpassung an zukünftig zu erwartende klimatische Verhältnisse hin untersucht. Dazu entsteht parallel eine maßgeschneiderte Anleitung (*tailored guidance*), um die Berücksichtigung des Klimawandels in den jeweiligen Normungsaktivitäten zu unterstützen. Ebenfalls beteiligt an dieser Initiative sind der wissenschaftliche Dienst der Europäischen Kommission (engl.: *Joint Research Centre, JRC*) und DG CLIMA. Diese Abteilung der Kommission ist für die EU-Klimapolitik zuständig und leitet die internationalen Klimaverhandlungen für die EU.

5 Benötigte Klimaprojektionsdaten

Im Rahmen der Normierung werden zusehends Klimaprojektionsdaten benötigt. Diese Daten müssen besonderen Ansprüchen genügen. So sollten sie möglichst punktgenaue Aussagen zu den zu erwartenden Veränderungen beinhalten, damit Anpassungsmaßnahmen direkt vor Ort in Angriff genommen werden können. An die Klimamodellierung wird daher die Anforderung gestellt, die räumliche Auflösung möglichst zu verfeinern.

Auf der anderen Seite müssen Daten zum Einsatz in der Normung nicht nur regional beziehungsweise lokal für Deutschland verfügbar sein, sondern im Zuge einer Risiko- und Vulnerabilitätsbetrachtung wollen Organisationen auch das Risiko bezüglich ihrer weltweiten Verflechtungen und Transportwege genau abschätzen. Eine lediglich regional immer verlässlicher werdende Datenbasis ist hier nicht ausreichend.

Des Weiteren werden in der Normierung zum Teil ganz spezielle Variablen benötigt, die insbesondere Infrastruktur beeinflussende Auswirkungen des Klimawandels beschreiben. Die Testreferenzjahre (KRÄHENMANN et al. 2016), die vom Deutschen Wetterdienst auch für zukünftige Verhältnisse berechnet wurden, stellen hierbei einen wichtigen ersten Ansatz dar. Neben der Temperatur – insbesondere Maximaltemperaturen und Hitzeperioden – sind dies Variablen, die in den heutigen Klimamodellen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind beziehungsweise lediglich abgeleitet werden können. Dazu zählen insbesondere die Veränderung von Sturmhäufigkeiten und –intensitäten, Veränderung in regionalen Vorkommen sowie Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Hagelereignissen.

Eine signifikante Bedeutung haben auch Extremereignisse. Zur Anpassung an den Klimawandel werden in der Normung demnach auch verlässliche Informationen über die zukünftigen Veränderungen sehr seltener Ereignisse benötigt. Hier stellt sich an die Klimamodellierung die Herausforderung, diese Ereignisse in ihrer Jährlichkeit, lokalen Ausprägung und Intensität belastbar darzustellen.

Die Klimaforschung wird also in den nächsten Jahren insbesondere auf diesen Gebieten gefordert sein, um belastba-

re und verlässliche Daten zur Anpassung von Normen an den Klimawandel bereitzustellen.

Literatur

- BUNDESREGIERUNG, 2015: Erster Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.
- BUNDESREGIERUNG, 2020: Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN), 2018: Anpassung an den Klimawandel - Umgang mit Unsicherheiten im Kontext von Projektionen; Beiblatt 1: Sommerlicher Wärmeschutz von Gebäuden - Ein Beispiel der Vulnerabilitätsanalyse für den Fall einer Temperaturerhöhung von 2 °C und mögliche Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen dieser Temperaturerhöhung. BEUTH (Hrsg.), 21 S., doi: 10.31030/2852921.
- DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (DWA), 2016: Merkblatt DWA-M 119 - Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA (Hrsg.), 53 S., ISBN 978-3-88721-392-3.
- KRÄHENMANN, S., WALTER, A., BRIENEN, S., IMBERY, F., MATZARAKIS, A., 2016: High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. *Theoretical and Applied Climatology* **131**, 899-926, doi: 10.1007/s00704-016-2003-7.

Weiterführende Links

- BMVI-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“: <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de> (zuletzt geprüft am 28.03.2021).
- DIN-Koordinierungsstelle Umweltschutz: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/din-e-v/organisation/koordinierungsstellen/koordinierungsstelle-umweltschutz> (zuletzt geprüft am 28.03.2021).
- DIN-Normungsausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS): <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagus/> (zuletzt geprüft am 28.03.2021).
- ISO/TC 207/SC7 Greenhouse gas management and related activities: <https://www.iso.org/committee/546318.html> (zuletzt geprüft am 28.03.2021).
- CEN ACC-CG Climate change adaptation: <https://www.cencenelec.eu/standards/Sectorsold/ClimateChange/Pages/default.aspx> (zuletzt geprüft am 28.03.2021).

Autoren

DR. ANDREAS WALTER
Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach
andreas.walter3@dwd.de

CLEMENS HAßE
Umweltbundesamt
KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
clemens.hasse@uba.de

DR. WIEBKE MEISTER
DIN e.V. - Deutsches Institut für Normung
Leben und Umwelt - Nachhaltigkeit und Managementsysteme
Saatwinkler Damm 42-43
13627 Berlin
wiebke.meister@din.de

11 C. LINKE Nutzung von regionalen Klimamodellierungen in Landesumweltämtern

Use of regional climate modelling results in State Environmental Agencies

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird den Fragen nachgegangen, warum und ob Landesbehörden regionale Klimamodelldaten nutzen. Wozu brauchen die Landesumweltämter die Ergebnisse der Modellierung? Am Beispiel des Landesamtes für Umwelt in Brandenburg wird ein Zwischenstand eines sich stetig entwickelnden Prozesses aufgezeigt.

Summary

The main questions addressed in this report are why and if state authorities use the products of regional climate models. Why do they need those results, and what do they use them for? Using the example of the Brandenburg State Office for Environment the current intermediate state of a constant evolving process is shown.

1 Einleitung

Die Aufgabenstellungen der Landesumweltämter oder Landesanstalten sind vielschichtig. Unabhängig von ihrer konkreten Struktur und Zusammensetzung in den einzelnen Bundesländern haben diese Ämter, in der Regel per Gesetz, Schutzgüter überantwortet bekommen. Diese reichen vom Schutzgut Mensch über die Medienklassiker Boden, Luft und Wasser bis hin zu komplexen Systemen, begrifflich zusammengefasst unter Natur, Umwelt oder Klima.

All diese Schutzgüter und Medien sind einer permanenten Belastung und zahlreichen Wechselwirkungen ausgesetzt. Neben extremen Störungen wie Lärm in Ballungsräumen, Nitraten im Grundwasser oder Schadstoffen und Klimagasen in der Luft, entwickelt sich ein „Stressfaktor“ – der Klimawandel – zu einer enormen Zusatzbelastung.

Es geht demnach im Arbeitsalltag der Behörden nicht nur darum, bestehende Gesetze und EU-Richtlinien gewissenhaft und konsequent umzusetzen oder deren Vorga-

ben einzuhalten, sondern auch diesen „Rahmen“ weiter zu entwickeln. Dazu gehört der rechtliche Rahmen ebenso wie die Fortschreibung technischer Standards oder weniger bestimmter Normen wie die „gute fachliche Praxis“ durch die Politik auf Basis der fachlichen Expertise. Diese Entwicklungen sollten sich an den Erfordernissen der Zukunft orientieren.

Im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie mahnte die Nationale Akademie der Wissenschaften an, dass vor allem wegen der mindestens ebenso bedrohlichen Klima- und Biodiversitätskrise, es nicht einfach zu einer Wiederherstellung des vorherigen Status kommen sollte. Politische Maßnahmen sollten sich laut Leopoldina auf internationaler und nationaler Ebene an den Prinzipien von ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit, Zukunftsgewinnung und Resilienzgewinnung orientieren (LEOPOLDINA 2020).

Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen, die bereits vor Covid-19 auf einer breiten wissenschaftlichen Evidenz und einem politisch-gesellschaftlichen Konsens beruhten, müssen weiterhin mit hoher Priorität umgesetzt werden.

2 Welche regionalen Auswirkungen werden im Land Brandenburg erwartet?

Die Bundesländer und ihre Behörden stehen ähnlich wie die Bundeseinrichtungen vor der Aufgabe, den Klimawandel und dessen Folgen in ihre alltägliche Arbeit einzubeziehen. Auch wenn es dazu noch keine genauen rechtlichen oder anderen Vorgaben gibt.

Wie zeigt sich der zusätzliche „Stressfaktor Klimawandel“ in einem gewässerreichen aber regenarmen Bundesland? Den Klimaprojektionen zu Folge werden auch in der Region Berlin-Brandenburg die Durchschnittstemperaturen steigen. Extreme Wetterlagen wie Starkniederschläge, Dürre- und Hitzeperioden werden zunehmen (DWD 2019). Vielleicht wird nicht immer die Anzahl der Ereignisse in einem Referenzzeitraum auffällig sein, dafür aber die Intensitäten oder das Andauerverhalten. Jahreszeiten ändern ihren Charakter. Die Vegetationsperioden werden länger. Mit steigenden Temperaturen nimmt die Verdunstung ganzjährig zu und der Schneefall im Winter ab. Starkniederschläge im Winter werden abflussrelevant. Durch all diese Faktoren geht die Grundwasserneubildung voraussichtlich zurück, wodurch die bereits bestehende Problematik der Wasserverfügbarkeit im Osten Deutschlands weiterhin verschärft wird (UBA 2017). Auf die Frage, wie sich die Anzahl und die Heftigkeit von Stürmen ändern werden, liefern die Modelle der Klimawissenschaftler zurzeit keine eindeutigen Aussagen. Diese Veränderungen erscheinen, verglichen mit den Klimazuständen, auf die sich andere Regionen dieser Erde werden einstellen müssen, zunächst noch harmlos. Doch auch das Binnenland wird vom Meeresspiegelanstieg betroffen sein. Die Salz-Süßwasser-Grenze der Flüsse wird sich verschieben. Die Versalzung ganzer Oberflächengewässer oder des Grundwassers können folgen. Der bisherige Hochwasserschutz hat sich auf die klassischen Gefahrenereignisse nach Starkniederschlägen, nach der Schneeschmelze und ähnlichem eingestellt, aber nicht darauf, dass die Pegel in den Flussmündungen zum Ende des Jahrhunderts circa einen Meter höher liegen werden (BMUB 2018).

3 Was sind die fachlichen Aufgaben des Landesamtes für Umwelt?

3.1 Wasserwirtschaft/Hydrologie

Die Aufgaben eines Landesamtes für Umweltfragen sind vielschichtig. Im Politikfeld „Wasser“ sind dies beispielsweise die Wasserbewirtschaftung, die Hydrologie oder Hochwasserschutz. Die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement- und der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union sind Aufgabenschwerpunkte im Bereich Wasserwirtschaft.

Im Landesamt für Umwelt Brandenburg wurden zur Erfüllung der vielfältigen Aufgaben zwei Fachabteilungen

eingerrichtet. In der ersten Abteilung „Wasserwirtschaft“ sind unter anderem die Obere Wasserbehörde, der Hydrologische Landesdienst, die Hochwassermeldezentrale sowie die Bearbeitung von Genehmigungsverfahren angesiedelt. Der Bodenschutz ist dort ebenfalls zugeordnet. Zuständig ist diese Abteilung auch für die Erarbeitung der Grundlagen des Hochwasserrisikomanagements sowie die Überwachung der Gewässergüte von Grund- und Oberflächenwasser und der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Arbeitsschwerpunkte der für das Flussgebietsmanagement zuständigen zweiten Abteilung Wasserwirtschaft sind die Gewässer- und Anlagenunterhaltung in den Gewässern erster Ordnung, Hochwasserschutz und investiver Wasserbau, sowie das dafür erforderliche Management für Auftragsvergabe und Fördermittel.

Neben dem vorbeugenden Hochwasserschutz und der Schaffung von Retentionsflächen stellt die Verstärkung und Modernisierung von Deichen und Hochwasserschutzanlagen die dritte Säule des Hochwasserschutzes dar. Ende der 1980er Jahre begann die systematische Modernisierung und Verstärkung der Deiche im Land Brandenburg. Sie war zunächst nur für die Deiche an der Elbe im Landkreis Prignitz vorgesehen. Das änderte sich massiv nach dem Oderhochwasser 1997. Im Rahmen eines Investitionsprogrammes bis dahin ungekannten Ausmaßes sollten insgesamt 185 km Oderdeich systematisch auf den aktuellen Stand der allgemein anerkannten Regeln der Technik modernisiert werden. Verstärkt und ausgeweitet wurden die Bemühungen nach erfolgreicher Abwehr des im August 2002 aufgetretenen Hochwasserereignisses an der Elbe. So wurde von Oktober 2007 bis 2009 eine der größten Deichrückverlegung in Europa realisiert. Dabei wurde ein neuer Elbdeich bei Lenzen auf 6,1 km Länge erbaut und der vorgelagerte Altdeich an fünf Stellen geschlitzt und sogenannte Flutmulden ausgehoben. Deichhöhe und Profil sind in Abwägung der möglichen Zukünfte (z. B. aus Klimamodellergebnissen; Wiederkehrintervallen der Ereignisse, Scheitelhöhen) und der finanziellen Möglichkeiten ausgeführt wurden. In Bezug auf das Hochwasserrisikomanagement und die Wasserrahmenrichtlinie müssen Grundlagen zur Hochwasserrisikomanagementplanung geschaffen und fortgeschrieben werden. Die regionale Maßnahmenplanung zum Hochwasserrisikomanagement ist umzusetzen. Zeitgleich müssen diese Maßnahmen mit dem nationalen Hochwasserschutzprogramm koordiniert werden. Das Amt wirkt mit an der Ausweisung von Überschwemmungsgebieten. Gleichzeitig muss die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie koordiniert werden. Für beide EU-Richtlinien besteht eine umfängliche Berichtspflicht. Für die Öffentlichkeit wird die Auskunftsplattform Wasser (<https://apw.brandenburg.de/>) vorgehalten. Die ausgewiesenen Überschwemmungsgebiete und Hochwasserrisikoabschätzungen für extreme Hochwässer sind neuerdings Grundlage der Umweltverträglichkeitsprüfung im Zusammenhang mit Anlageneinigungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Dies ist ein Fortschritt. Gleichzeitig besteht aber die Notwendigkeit, sämtliche Hochwasserschutzplanungen und -maßnahmen mit dem

Anstieg des Meeresspiegels neu zu berechnen und langfristig umzusetzen.

Die Überwachung der Grundwassergüte bedeutet, dass die Grundwasserbeschaffenheit mittels Monitoring kontrolliert wird und dass Messstellendaten erhoben, ausgewertet und Grundwasseranalysen durchgeführt werden müssen. Letztendlich münden diese Arbeiten in die Überwachung der Grundwasserstände und bilden auch die Grundlage für das Genehmigen von Wasserentnahmen. Die Modellierung des Wasserhaushalts und deren mögliche Entwicklung ist eine ganz konkrete klimarelevante Teilaufgabe des Amtes. Die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen (z.B. Schleusen und Sperrwerke) basiert auch auf den Erkenntnissen der Klimamodellierung.

Eine der wesentlichen Aufgabenstellungen der Wasserrahmenrichtlinie ist, dass die ökologische Qualität der Gewässer erhalten bleibt oder verbessert wird. Dazu gehört auch die Wahrung eines Mindestabflusses in den Fließgewässern. Diese ist in Anbetracht von zunehmender Trockenheit und Dürre nicht selbstverständlich. Um kurzfristig ein Niedrigwassermanagement aufzubauen und langfristig zu betreiben, werden fachliche Kapazitäten im Amt ausgebaut. So soll die gezielte Auswertung von Klimamodelldaten und die konzeptionelle Arbeit durch weitere wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen verstärkt werden. Gleichzeitig sollen hausintern die linienübergreifenden Projektstrukturen gestärkt werden. Durch die aktuellen klimatischen Entwicklungen und Ergebnisse der Klimamodellierung für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100), ergeben sich auch neue Aufgabenstellungen und Schwerpunktverlagerungen. So müssen die sich teils widersprechenden Interessen von stabilem Abfluss, Stauhaltung, Niedrigwassermanagement, Wasserrückhaltung, Wasserentnahme und Moorvernässung ausgeglichen werden. Die Notwendigkeit der Bewirtschaftung der Grundwasserkörper erscheint angesichts der Erkenntnisse dringend notwendig.

3.2 Naturschutz/Großschutzgebiete

Eine weitere europäische Richtlinie bestimmt den Arbeitsalltag des Landesamtes für Umwelt: die NATURA-2000-Richtlinie. Die Grundlagenarbeit für diese Richtlinienumsetzung im Land wird in der Abteilung „Naturschutz“ und den Brandenburger Naturlandschaften geleistet. Der nationale und internationale Biotop- und Artenschutz sowie die Landschaftsplanung und -entwicklung sind weitere Aufgabenbereiche. Darüber hinaus werden Maßnahmen zum NATURA-2000-Programm der EU zum Erhalt der biologischen Vielfalt durch den Schutz von Arten und Lebensräumen erarbeitet und umgesetzt sowie naturschutzfachliche Stellungnahmen in Planungs- und Genehmigungsverfahren abgegeben. Wie verändern sich zum Beispiel die geschützten Lebensräume, die Artenzusammensetzung in einzelnen Biotopen oder das

Überwinterungsverhalten von Zugvögeln? Die Antworten geben einzelne wissenschaftliche Arbeiten, die auch auf Basis der Klimamodellergebnisse erstellt wurden.

Arbeitsschwerpunkte der Großschutzgebiete sind darauf aufbauend das Flächenmanagement, die nachhaltige Landnutzung, die Regionalentwicklung und der Naturtourismus. In Brandenburg gibt es einen Nationalpark, drei Biosphärenreservate und elf Naturparke. Können diese Gebiete als Musterregionen für Anpassung an die Folgen des Klimawandels dienen? Wenn ja, wie? Wie kann das Konfliktmanagement gestaltet werden? Wie kann Aufklärung erfolgen, auch über die Folgen des Klimawandels und den Nutzen einzelner Maßnahmen? Wie kann die Steigerung der Anpassungskapazität in den Schutzgebieten erfolgen und was können wir daraus für andere Flächen lernen? Für die einzelnen Schutzgebiete werden aktuell die Personalkapazitäten ausgebaut, um auch diese Fragen zukünftig besser beantworten zu können.

3.3 Technischer Umweltschutz

Die Aufgaben des „Technischen Umweltschutzes“ reichen im Kern von der Bearbeitung der vielfältigsten Genehmigungsverfahren bis zur Überwachung umweltrelevanter Anlagen sowie die Erarbeitung grundsätzlicher wissenschaftlich-technischer Fragen des Umweltschutzes.

Ein Teil dieser „Technischen Verwaltung“ ist für Genehmigungsverfahren von Anlagen zuständig, bearbeitet die Fachgebiete Anlagensicherheit und Technologie, Lärm- und Schwingungsschutz, verkehrs- und gebietsbezogenen Immissionsschutz, Luftgüte, Luftreinhaltung sowie Abfallwirtschaft. Darüber hinaus werden landesweit die nach Immissionsschutzrecht genehmigungsbedürftigen und nicht-genehmigungsbedürftigen Anlagen überwacht. Es wird auch Stellung genommen in immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren, zu Planungen und Verfahren anderer Träger öffentlicher Belange. Spezielle Aufgaben der Abfallwirtschaft sind im Bereich „Technischer Umweltschutz“ angesiedelt. Kreislaufwirtschaftsgesetz, Systematisierung von Wertstoff- und Abfallstoffen, Deponierung von Abfällen sind nur ein Teil der Stichwörter dieses Aufgabengebietes. Der Klimaschutz gehört in den meisten Umweltämtern ebenfalls zum Technischen Umweltschutz. Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien, deren Wechselwirkung in der Umwelt und die auszuschließende Belastung für die Bevölkerung sind aufgabenimmanent. Zu diesem Themenfeld gehören aber auch der Emissionshandel nach Treibhausgasemissionshandelsgesetz und die Bewertung des Instrumentes hinsichtlich der Klimaeffekte. Weit verbreitet ist ebenfalls das Monitoring von Energie- und Klimaschutzstrategien in den Ländern als Aufgabe der Landesumweltämter in Kooperation mit den Statistikämtern. Die Ergebnisse der Klimamodellierung, speziell der Stadtklimatologie, werden unter anderem dafür genutzt, um die Mehrfachbelastung in Städten, die sich durch die Lärm-, Luft- und Klimabelastung ergeben kann, zu untersuchen.

Das Landesamt für Umwelt war das erste Landesamt in der Bundesrepublik, welches ein eigenständiges Klimaschutzreferat eingerichtet hatte (im September 1990, damals noch „Landesumweltamt“ mit dem Referat „CO₂-Minderung“). Über die Zeit wurden Klimaschutz und Anpassung an die Folgen des Klimawandels in einer Struktur gebündelt. Aktuell wird dieser Bereich personell verdoppelt. Gleichzeitig kommt diesem Bereich eine Koordinierungsfunktion im gesamten Amt zu. Entgegen anderen Umweltämtern wird auf eine Klimaleitstelle oder die Einrichtung eines „Kompetenzzentrums Klima“ deshalb verzichtet.

3.4 Weitere Schutzgüter

Andere Landesämter und Landesanstalten arbeiten auf dem Gebiet des Gesundheitsschutzes. Der Klimawandel beeinflusst das Wohlbefinden. Gesundheitsmanagement, Hitzeaktionsplanung, erhöhte Mortalität und hitzebedingte Todesfälle bestimmen schlagwortartig das Aufgabenfeld. Was kann und muss neu organisiert werden? Wie reagiert langfristig die Stadtplanung auf die Erkenntnisse? Die Mehrfachbelastung in städtischen Ballungsräumen nimmt eher zu. Lärm- und Luftbelastung sind eng an unsere Verkehrs- und Energiestrukturen gekoppelt. Grünzonen geraten in den Großstädten unter Druck, da dringend zusätzliche und bezahlbare Wohnungen benötigt werden. Die Probleme der Stadtklimatologie spitzen sich schon heute zu. Die Hitzebelastung in einzelnen Teilräumen steigt somit. Wie verändern sich die Belastungssituationen bei weiter ansteigenden Temperaturen? Neben dem Thema der Raumordnung, der Stadtplanung, des Gesundheitsschutzes oder des Katastrophenschutzes sind andere Themenfelder ebenfalls aufgefordert, sich dem Thema Klimawandel zu stellen. Dazu gehören sämtliche Landnutzungsformen: Landwirtschaft, Weinbau, Gemüseanbau und Forstwirtschaft ebenso wie Tourismus und der Bau von Infrastrukturen.

4 Handlungsebenen beim Thema „Klimawandel“

In erster Linie müssen sich die Fachbehörden der möglichen Auswirkungen des Klimawandels für die unterschiedlichsten Bereiche der Gesellschaft und ihrer Schutzgüter bewusst werden. Neben allgemeinen oder konkreten wissenschaftlichen Folgeabschätzungen müssen die klimatischen Veränderungen für den jeweiligen Betrachtungsraum und -horizont analysiert werden. Dazu dient vor allem die Auswertung von Klimamodellen. Hierfür sind einzelne Kennziffern oder Parameter und Parametergruppen in möglichst hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung hilfreich. Diese Informationen müssen nutzungsgerecht aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden, um entweder direkt daraus Schlussfolgerungen abzuleiten oder „Impact-Modellierungen“ anzutreiben. Die notwendigen Daten müssen in die behördliche Infrastruktur überführt werden. Hier haben die Landesumweltbehörden der Länder einen völlig unterschiedlichen Arbeitsstand. Strukturen, Finanzen, Personal und Zuständigkeiten sind dafür ursächlich.

Die „klimatische Informationsflut“ muss den Realitäten der Impact-Modellierung angepasst werden. Die verschiedenen fachpolitischen Fragestellungen verlangen nach differenzierten Aussagen. Letztendlich können nur im Dialog und in Kooperation mit den diversen Nutzergruppen die für sie ausschlaggebenden Kennziffern, Fragestellungen und Antworten gefunden werden. Neben der Generierung von wissenschaftlichen Erkenntnissen geht es in der fachwissenschaftlichen Begleitung der von Klimawandel betroffenen Bereiche insbesondere um die nutzerorientierte Aufbereitung der Modellergebnisse und Erkenntnisse. Dies ist die Basis für tragfähige Entscheidungen.

Für die Fachbehörden ergeben sich zwei Handlungsstränge und zwei Handlungsebenen:

- Strang 1: Einbindung in tägliche Arbeit, Problembewusstsein entwickeln
- Strang 2: Die Weiterentwicklung von Rechtssetzung, Normen, Standards
- Ebene 1: das Amt selbst mit all seinen Fachaufgaben
- Ebene 2: die Politik als Entscheidungsträger, Rahmengerber

Es geht in den Fachbehörden, vereinfacht ausgedrückt, um (klima-)angepasste Aufgabenwahrnehmung und Politikberatung.

Die Politikberatung erfolgt vielfach mittels stark aggregierter Texte und mit Schaubildern, welche auf Modellauswertungen mit Bandbreiten und Hinweisen auf die Folgen des Nichthandelns und den Nutzen zeitnahen Handelns basieren. Es geht vordringlich um das Initiieren von politischem Handeln auf staatlicher oder regionaler Ebene.

Die Fachberatung innerhalb der Entscheidungsstrukturen kann ähnlich erfolgen, muss aber wesentlich detaillierter sein. Die zeitliche und räumliche Auflösung und die ausgewählten Klimaparameter müssen der Aufgabenstellung des Fachbereiches angepasst sein oder werden. Die Zusammenhänge zwischen Klimamodell, Impact-Modell und fachlicher Aufgabenstellung müssen aufeinander abgestimmt sein und eine belastbare, teils auch rechtssichere Handlungsgrundlage ergeben. Sie ersetzen jedoch nicht die eigene Verantwortlichkeit oder Entscheidung in Kontext von Spannbreiten, Handlungsspielräumen und Entscheidungshorizonten.

In der Öffentlichkeitsarbeit muss viel stärker zielgruppenorientiert agiert werden. Wissenschaftliche Modellergebnisse müssen „übersetzt“ werden in die jeweilige Sprache und Kultur der Zielgruppe. Die Öffentlichkeitsarbeit muss die Lebenswirklichkeit derer widerspiegeln, die angesprochen werden sollen. Hierbei stehen Ämter mit ihrer traditionell geprägten eigenen Sprache und ihrem bürokratischen Habitus vor einer neuen Aufgabe. Die Öffentlichkeitsarbeit ist kein Neuland, aber eine neue Qualität und Zielgruppenorientierung stellen eine neue Herausforderung dar.

5 Was folgt daraus?

Es gibt nahezu keine der eingangs beschriebenen Aufgaben der Umweltämter, die nicht vom Klimawandel direkt oder indirekt betroffen sind. Somit müssen für alle Aufgaben spezifische Klimawandelinformationen aufbereitet und bereitgestellt werden. Es müssen viel stärker als bisher, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Probleme und Lösungsansätze aufgezeigt und diskutiert werden. Am Anfang dieses Prozesses stehen Klimainformationen beziehungsweise Klimamodelle und deren Ergebnisse. Sie sind aber nur ein Teil des Lösungsansatzes. Die Klimainformationen müssen immer stärker zielgruppenorientiert erarbeitet und bundesweit nutzbar sein, nicht nur regional oder landesspezifisch.

Das Projekt ReKliEs-De (**r**egionale **K**limaprojektionen **E**nsemble für **D**eutschland) war ein erster Schritt in die richtige Richtung. Das Forschungsprojekt wurde von den Landesämtern initiiert und intensiv begleitet. Das Projekt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert wurde, war zielgenau auf die Bedürfnisse der Nutzergruppen in der Klimafolgenforschung und der Politikberatung ausgerichtet. Die starke Nutzerorientierung wurde zum einen durch die schon während der Antragstellung existierende Projektbegleitung durch zwei Bundesländer-Arbeitskreise gewährleistet. Zum anderen leistete auch die Beteiligung von Behörden an der Projektdurchführung einen starken Beitrag. Im Ergebnis wurden für verschiedene Zeithorizonte und mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung 24 Klimakennzahlen berechnet, die von den Nutzer/-innen priorisiert wurden. Diese Ergebnisse liegen für ganz Deutschland und differenziert nach acht Flusseinzugsgebieten vor. Darüber hinaus lieferte das Forschungsvorhaben neue Erkenntnisse über den Einfluss von Global- und Regionalmodellen auf die Ergebnisse und über die Qualität der Modellierungen.

Klimamodellierung ist ein sehr dynamisches Arbeitsfeld. Die Modellierung entwickelt sich weiter und wird bezüglich der eingehenden Informationen stetig komplexer. Somit entstehen im Rhythmus von wenigen Jahren immer neue regionale Klimamodellergebnisse. Wenn sich der Meeresspiegel in Nord- und Ostsee und das Niederschlagsdargebot in naher oder ferner Zukunft für die Region Berlin-Brandenburg so stark ändert, wie in den Klimamodellen für das Weiter-wie-bisher-Szenario ausgewiesen wird, dann müssen wir zeitgleich Hoch- und Niedrigwassermanagement entwickeln und auch umsetzen. Gegebenenfalls ist die Trinkwasserversorgung zu überdenken und zu organisieren. Wir müssen Wasserentnahmen im Ernstfall eventuell stärker regulieren. Das hat Auswirkungen auf wasserrechtliche Erlaubnisse, auf Genehmigungsverfahren und auf die Gesetzgebung. Dafür müssen fachliche Grundlagen erarbeitet werden. Es sollten Impact-Modellierungen zeitlich und räumlich verfeinert und gleichzeitig insgesamt komplexer werden. Als Beispiel können die diversen Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasserkörpern

genannt werden, die zukünftig besser abgebildet werden müssen. Das Monitoring zur Grundwasserentwicklung und –beschaffenheit muss viel stärker und schneller als Entscheidungsgrundlage zur Genehmigung von wasserrechtlichen Genehmigungen, z. B. wie die der Wasserentnahme, herangezogen werden.

In den Landesämtern müssen nicht nur diese fachlichen Einzelfragen beantwortet werden, sondern auch die Komplexität der Lösungsansätze bedacht werden. Wie wirkt sich beispielsweise der Klimawandel auf die Naturräume aus und wie wirken die jeweils erarbeiteten Anpassungsmaßnahmen im Wasserbereich darauf? Sind diese Maßnahmen naturverträglich oder schaden sie der Anpassungskapazität von Flora und Fauna in der jeweiligen Region? Wie ist die Wechselwirkung mit anderen Landnutzungsinteressen und wie passt die hydrologische Einzellösung zu den Anpassungsstrategien anderer Fachbereiche? All diese Fragen gilt es anzugehen.

6 Fazit

Die Aufgabe der Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist nicht nur eine spezifisch fachliche, sondern eine sehr komplexe und zu koordinierende Aufgabe in den Umwelt- und Landesverwaltungen. Nur Klimamodelle auswerten und die zahlreich notwendigen Impact-Modellierung zu forcieren, reicht als Fachbehörde nicht. Sie sind zwar ein ganz wichtiger Baustein im Arbeitsprozess, aber nur der Anfang einer Handlungskette. Langfristig muss viel mehr kommunikativ und interdisziplinär in den Entscheidungsstrukturen gearbeitet werden.

Es sollte demnach primär auf der Handlungsebene 1 – dem Amt selbst – agiert werden, um den Handlungsstrang 1 – die tägliche Arbeit – zu bedienen, beziehungsweise neu zu definieren. Das Thema Klimawandel und die Folgenabschätzung müssen dort integriert und zur Selbstverständlichkeit gemacht werden. Nur dann kann der zweite Handlungsstrang neue Lösungsansätze und neue Normen und Standards entwickeln. Dies wiederum kann nur in Interaktion mit der Politik, der zweiten Handlungsebene erfolgen. Der Klimawandel ist nicht nur eine globale Herausforderung für die gesamte Gesellschaft, sondern auch für die Administration. Es müssen quer zu herkömmlichen Fachpolitiken und Verwaltungssträngen Lösungen entwickelt werden und diese auch noch in mehreren Iterationsstufen aufeinander abgestimmt und permanent weiterentwickelt werden. Es ist eine Koordinierungs-, Kooperations- und Managementaufgabe, bei der Daten – auch Klimamodell-daten – eine sehr wichtige Grundlage darstellen.

Literatur

BMUB, 2018: Ergebnisprotokolle IMAA-Sondersitzung Meeresspiegelanstieg und 28. Sitzung der Interministeriellen Arbeitsgruppe „Anpassung“ (IMAA) 13. / 14.

Dezember 2017. UBA/BMUB WR I 1 vom 03.01.2018, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit Bonn (BMUB), Bonn, 187 Seiten.

DWD, 2019: Klimareport Brandenburg. 1. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 40 Seiten, ISBN: 978-3-88148-518-0 (online).

LEOPOLDINA, 2020: Dritte Ad-hoc-Stellungnahme zur Coronavirus-Pandemie – Die Krise nachhaltig überwinden. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Hrsg.), Berlin, 19 Seiten, online verfügbar unter https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2020_04_13_Coronavirus-Pandemie-Die_Krise_nachhaltig_%C3%BCberwinden_final.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

UBA, 2017: Wasserwirtschaft in Deutschland - Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 234 Seiten, online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaft-in-deutschland-grundlagen>, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Autor

CARSTEN LINKE

Landesamt für Umwelt Brandenburg
Referat Luftqualität, Klima, Nachhaltigkeit
Seeburger Chaussee 2
14476 Potsdam
Carsten.Linke@LfU.Brandenburg.de

I. SCHAUSER, K. SANDER

12 Regionale Klimamodellierung – Bedeutung für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Regional climate modelling - significance for the German Strategy for Adaptation to Climate Change

Zusammenfassung

Klimaprojektionen, in Kombination mit sozioökonomischen Szenarien, werden meist verwendet, um die zukünftigen Wirkungen des Klimas auf die betroffenen Systeme einschätzen zu können. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung sind im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) zentrale Eingangsgrößen von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Regionale Klimamodellierungen können auch die Basis von anderen Werkzeugen sein, wie beispielsweise einem Leitfaden zur klimaanangepassten Stadtplanung. Das deutsche Klimavorsorgeportal (www.klivoportal.de) stellt Klimainformationsdienste und Klimaanpassungsdienste von Bundes- und Länderbehörden strukturiert zusammen.

Summary

Climate projections, in combination with socio-economic scenarios, are usually used to assess the future effects of climate on the systems concerned. The results of regional climate modelling are central input variables for climate impact and vulnerability assessments within the German Adaptation Strategy. Regional climate modelling can also be the basis for other tools, such as a guide to climate-adapted urban planning. The German Climate Change Prevention Portal (www.klivoportal.de) provides a structured compilation of climate information and adaptation services of federal and state authorities.

1 Ziele und Prozesse der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Übergreifendes Ziel der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ ist es, die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber den Wirkungen des Klimawandels zu vermindern und die Anpassungskapazität Deutschlands an den Klimawandel zu erhöhen. Um dies zu erreichen, sollen die im Aktionsplan Anpassung (APA) genannten Anpassungsmaßnahmen des Bundes umgesetzt werden. Die Rahmensetzung durch den Bund unterstützt Anpassungsaktivitäten anderer Akteure unter anderem durch rechtliche, ökonomische oder Kommunikationsinstrumente. Die Umsetzung fachpolitischer Handlungsziele soll auch unter den Bedingungen des weiter fortschreitenden Klimawandels sichergestellt sein. Die DAS wurde 2008 vom Bundeskabinett verabschiedet, gefolgt von dem ersten Aktionsplan Anpassung (APA 2011). 2015 wurde der erste Fortschrittsbericht zur DAS verabschiedet. Teil des Fortschrittsberichts war der zweite APA, die erste sek-

torenübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse und der erste Monitoringbericht.

Die Bundesregierung beschloss mit dem Fortschrittsbericht im Jahre 2015, Aktionspläne und Monitoringberichte alle vier Jahre und aktualisierte Vulnerabilitätsanalysen etwa alle sechs Jahre zu erstellen und zu veröffentlichen, um den Prozess der Anpassung an den Klimawandel fachlich zu unterstützen und voran zu treiben. Zudem wurde die Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (IMAA) beauftragt, eine Evaluierungsmethodik des Strategieprozesses zur DAS zu entwickeln und auf dieser Basis bis 2019 eine Evaluierung durchzuführen. Aufbauend auf den oben genannten Berichten hat die Bundesregierung im Herbst 2020 die DAS in einem weiteren Fortschrittsbericht fortgeschrieben und den dritten Aktionsplan als Kabinettsbeschluss verabschiedet (BUNDESREGIERUNG 2015, 2020).

Die genannten Kernprodukte für den Fortschrittsbericht sowie weitere Forschungsarbeiten zu den im APA ge-

nannten Maßnahmen werden durch Arbeiten in den Bundesbehörden methodisch vorbereitet und wissenschaftlich erarbeitet. Ein Teil dieser Arbeiten, insbesondere die Vulnerabilitätsanalysen, die zukünftig „Klimawirkungs- und Risikoanalysen“ heißen und die zukünftige Auswirkungen des Klimawandels einschätzen, benötigen als zentralen Input die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung.

2 Kernprodukte der DAS

2.1 Monitoringbericht

Der thematisch breit angelegte Monitoringbericht informiert die interessierte Öffentlichkeit und Entscheidungsträger regelmäßig über bereits beobachtete und gemessene Folgen des Klimawandels und begonnener Anpassungsmaßnahmen. Dabei wird die thematische Breite der DAS widergespiegelt und die als relevant eingeschätzte Themen abgebildet. Grundlage sind Indikatoren, die auf gemessenen Datenreihen beruhen. Es werden keine räumlich differenzierten Ergebnisse gezeigt. Der letzte Monitoringbericht wurde 2019 (UBA 2019) veröffentlicht.

2.2 Klimawirkungs- und Risikoanalysen

Das Ziel der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) ist die Identifikation der bedeutsamsten handlungsfeldbezogenen und –übergreifenden Schwerpunkte der Folgen des Klimawandels in Deutschland sowie die aus der Bewertung der Klimarisiken und Anpassungskapazitäten abzuleitenden Handlungserfordernisse als wissenschaftliche Grundlage für Aktionspläne zur Klimawandelanpassung der Bundesregierung. Die nächste Klimawirkungs- und Risikoanalyse wird 2021 veröffentlicht.

2.3 Aktionsplan Anpassung

Als ein wesentlicher Bestandteil des Fortschrittsberichts zur DAS wird ermittelt, welche Politikinstrumente und Maßnahmen im Bereich Klimaanpassung erforderlich sind. Der Aktionsplan Anpassung basiert dabei auf den in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse identifizierten Schwerpunkten der Betroffenheit durch den Klimawandel und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf. Für diese thematischen und räumlichen Schwerpunkte werden Anpassungsmaßnahmen zusammengestellt, vorrangig auf Bundesebene. Der aktuelle APA wurde mit dem zweiten Fortschrittsbericht zur DAS im Herbst 2020 vom Bundeskabinett verabschiedet.

3 Bedeutung der regionalen Klimamodellierung für die DAS-Kernprodukte

Die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung gehen aktuell in die Klimawirkungs- und Risikoanaly-

se 2021 ein. Hierbei werden räumlich explizite Werte für Deutschland (Bundesländer, Regionen, evtl. Landkreise) für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts (2031-2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071-2100) betrachtet. Für die zukünftigen Zeiträume werden mit Modellen berechnete oder durch Experten geschätzte Werte basierend auf sozioökonomischen Szenarien und einem (möglichst aktuell erweiterten) Ensemble von aufbereiteten Klimaprojektionen verwendet. Es wird zwischen diesen fachlichen Ergebnissen und einem normativen Bewertungsschritt unterschieden. Bei der Bewertung werden die Ergebnisse der einzelnen Klimawirkungen hinsichtlich ihrer Bedeutung für Deutschland durch Behördenvertreter eingeschätzt.

Methodischer Ausgangspunkt für die neue Studie ist der Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (BUTH et al. 2017), der gemeinsam mit Bundes- und Ländervertretern entwickelt wurde. In diesem wird dargelegt, wie Klimaprojektionen, in Kombination mit sozioökonomischen Szenarien, verwendet werden, um die gegenwärtigen und zukünftigen Wirkungen des Klimas auf die betroffenen Systeme einschätzen zu können. Die Klimarisiken ohne und mit Anpassung werden abgebildet als Funktion des klimatischen Einflusses und der Sensitivität, der räumlichen Exposition sowie der Anpassungskapazität des klimatisch beeinflussten Systems.

Der klimatische Einfluss wird über klimatische Angaben eingeschätzt, die räumliche Exposition und Sensitivität werden hingegen über sozioökonomische Angaben für die Untersuchungszeiträume und -orte ermittelt. Für die Vergangenheit und Gegenwart stehen häufig Messdaten zur Verfügung. Für die Zukunft hingegen werden Szenarien beziehungsweise Projektionen, also Modellergebnisse, benötigt, sofern diese verfügbar oder ermittelbar sind. Alternativ werden Experteneinschätzungen verwendet.

3.1 Klimaprojektionen

Das Klima der Zukunft wird in der Regel mithilfe einer Modellkette abgebildet, die erstens aus einem Emissions- bzw. Konzentrationsszenario, zweitens einem globalen Klimamodell sowie drittens mindestens einem regionalen Klimamodell besteht. Um die Bandbreite der Unsicherheiten in den zu erwartenden Klimaänderungen zu beschreiben, ist es gegenwärtig allgemein anerkannter Stand der Technik, mit einem sogenannten Ensemble von Klimaprojektionen zu arbeiten, die auf verschiedenen Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen basieren.

Vor einer Entscheidung sollte überprüft werden, welche Anforderungen die ausgewählten klimatischen Größen und Klimawirkungsmodelle an die Klimaprojektionen stellen. Aufgrund der oftmals notwendigen Bias-Adjustierung der Klimaprojektionen und des Ensembleansatzes ist es nicht einfach, Zeitreihen etwa für die hydrologische Modellierung bereitzustellen, die konsistente Parameter wie

Tageswerte für Temperatur und Niederschlag beinhalten. In jedem Fall sollte das Modell-Ensemble den gesamten Untersuchungsraum flächendeckend abbilden, aus ausreichend vielen Modellläufen bestehen, um die Klimavariabilität beurteilen zu können, und auf einem zuvor festgelegten Emissions- oder Konzentrationsszenario basieren.

Wenn für den Untersuchungsgegenstand keine ausreichenden Ensembleansätze vorliegen, sollten dennoch mindestens zwei unterschiedliche Klimaprojektionen verwendet werden, um eine Bandbreite an potenziellen Zukünften darstellen zu können. Wenn für einzelne Klimawirkungen Daten aus anderen Klimaprojektionen vorliegen, sollten diese zur besseren Vergleichbarkeit in das vorhandene Ensemble eingeordnet werden.

Beispiel: Für die Vulnerabilitätsanalyse 2015 verwendete Klimaprojektionen

Für die Vulnerabilitätsanalyse 2015 (ADELPHI et al. 2015) wurde ein Klimaprojektionsensemble mit 17 Ensemblemitgliedern verwendet, das auf dem Emissionsszenario A1B des *Special Report on Emissions Scenarios* basiert (SRES, IPCC 2000, weitere Erläuterungen siehe www.dwd.de/klimaatlas). Die zeitliche Auflösung der Klimaprojektionen sind in der Regel Tageswerte. Mit Ausnahme der Winddaten wurden die Klimaprojektionen durch den Deutschen Wetterdienst auf ein einheitliches räumliches Gitter mit einer Auflösung von 5x5 km regionalisiert und eine Bias-Minimierung durchgeführt. Welche Verfahren dabei verwendet wurden, beschreiben IMBERY et al. (2013). Die Auswertungen der extremen Windgeschwindigkeiten liegen in einer räumlichen Auflösung von 25x25 Kilometern vor.

Um die Bandbreite der Modellergebnisse zu verdeutlichen, wurden Perzentilwerte angegeben. Die Perzentile können grundsätzlich wie folgt interpretiert werden (BUNDESREGIERUNG 2015):

- 15. Perzentil: 85 Prozent der Projektionen projizieren höhere Änderungsraten und 15 Prozent die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten (im Projektkontext in der Regel als schwacher Wandel bezeichnet)
- 85. Perzentil: 85 Prozent des Ensembles projizieren die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten und 15 Prozent projizieren höhere Änderungsraten (im Projektkontext in der Regel als starker Wandel bezeichnet)

Der Bereich zwischen den gewählten unteren und oberen Schranken umfasst somit eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 70 Prozent bezüglich des betrachteten Ensembles. (Hinweis: Die hier benutzten Begriffe Wahrscheinlichkeit und Quantil basieren lediglich auf dem verwendeten Klimaprojektionsensemble. Dieses Ensemble repräsentiert nur

einen Ausschnitt möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen, sodass es sich bei den präsentierten Ergebnissen nicht um statistische Eintrittswahrscheinlichkeiten im engeren Sinn handelt.) Stellenweise wurden Klimadaten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) verwendet. Hier wurde für den starken Wandel das 95. Perzentil und für den schwachen Wandel das 5. Perzentil verwendet. Wo bestehende Modellergebnisse verwendet wurden, sind ebenfalls abweichende Klimaprojektionen eingeflossen. Hier wurde darauf geachtet, dass die Annahmen der Modellberechnungen denen des Vorhabens ähnlich sind. Für niederschlagsgetriebene Modelle wurden in der Regel ein feuchtes und ein trockenes Szenario berechnet.

3.2 Sensitivitätsszenarien und Szenarien für räumliche Exposition

Auch für die Sensitivität und die räumliche Exposition sollte, wo möglich, auf Szenarien zurückgegriffen werden, die mit den Klimaprojektionen zeitlich konsistent sind. Vor allem für die nahe Zukunft (bis 2045) können einige der sozioökonomischen oder biophysikalischen Parameter, wie Bevölkerung oder Baumartenzusammensetzung quantitativ projiziert werden. Da die räumliche Exposition eng mit der Entwicklung der (sozioökonomischen) Sensitivität verbunden ist, sollten gemeinsame (sozioökonomische) Szenarien entwickelt werden. Den bestehenden Unsicherheiten kann Rechnung getragen werden, indem mindestens zwei sozioökonomische Szenarien verwendet werden.

3.3 Szenariokombinationen

Für die Analyse der Klimawirkungen müssen Klimaprojektionen und Szenarien der Sensitivität sowie der räumlichen Exposition miteinander kombiniert werden. Um die Bandbreite möglicher Entwicklungen der Klimawirkungen aufzuzeigen, sollten Szenariokombinationen verwendet werden. Diese sollten das Spektrum der Verschneidung eines starken Klimawandels mit einer starken sozioökonomischen Entwicklung sowie eines schwachen Klimawandels mit einer schwachen sozioökonomischen Entwicklung abdecken. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass ein starker (lokaler) sozioökonomischer Wandel nicht ursächlich mit einem starken (globalen) Klimawandel verknüpft sein muss. Daher ist zu erwägen, die sozioökonomischen und klimatischen Szenarien auch über Kreuz (stark-schwach und umgekehrt) zu kombinieren, um beispielsweise zu identifizieren, ob die Klimawirkungen mehr durch den klimatischen oder den sozioökonomischen Wandel angetrieben werden.

4 Nutzerbedarfe an Informationen und den Diensten zur Klimaanpassung

Im Zuge der Fortschreibung der Deutschen Anpassungsstrategie wurde das Deutsche Klimavorsorgeportal entwickelt (www.klivoportal.de), in dem Klimainformationsdienste und Klimaanpassungsdienste von Bundes- und

Länderbehörden strukturiert gesammelt und in Kurzfassung aufbereitet sind. Regionale Klimamodellierungen können die Basis eines Anpassungsdienstes wie beispielsweise eines Leitfadens zur klimaangepassten Stadtplanung sein.

Während der Konzeptionsphase des Portals wurden in einer qualitativen und quantitativen Analyse die Bedarfe potentieller Nutzer aus Bundes-, Landes- und Kommunalverwaltung, Wirtschaft, Forschung und organisierter Zivilgesellschaft (z. B. Stadtplanungsämter, Gesundheitsämter, Umweltverbände, Kleine und mittlere Unternehmen (KMU)) erfasst. Ein zentrales Ergebnis war, dass über die Hälfte der 454 Befragten die Dienste nicht nutzen, da sie sie nicht kennen oder schwer finden. Außerdem wurde zu einem Drittel angegeben, dass die Dienste nicht spezifisch genug sind und auch für 14 % der Befragten unklar ist. Die analysierten Hemmnisse zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen liegen weniger in den mangelnden Daten oder Informationen, sondern vielmehr in der fehlenden Anerkennung der Relevanz des Themas, einer fehlenden direkten Betroffenheit, mangelnden Ressourcen oder kurzfristigen Planungshorizonten.

Auf der Basis dieser Umfrage sowie Literaturanalyse wurden für das KLiVO-Portal Qualitätskriterien entwickelt, die unter anderem eine regelmäßige Aktualisierung, Pflege und Weiterentwicklung des Dienstes vorsehen. Zusätzlich werden Dienste auf dem Portal hervorgehoben, die besonders nutzerfreundliche Aspekte beinhalten, wie eine Einbindung von Praxisakteuren in die Entwicklung, integrierte Praxisbeispiele und Kontaktmöglichkeiten zum Herausgeber und eine Feedbackmöglichkeit. Mit dieser vorstrukturierten Auswahl von Diensten werden Kommunen, Bundesländer, Unternehmen oder Verbände übersichtliche, und geprüfte Informationen von verschiedenen Institutionen an einer zentralen Stelle präsentiert.

Im Rahmen der begleitenden Netzwerkaktivitäten zum KLiVO-Portal, dem KlimAdapt Anbieter-Nutzer-Netzwerk, wird die Bedeutung von regionalen und lokalen Klimainformationen für die Anpassungsplanung in verschiedenen Bereichen hervorgehoben. Genauso wichtig wie eine solide Datenbasis sind die Ableitung von Handlungserfordernissen und eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zur Umsetzung von Maßnahmen. Mit dem KlimAdapt-Netzwerk und KLiVO-Portal werden qualitätsgesicherte Klimainformations- und -anpassungsdienste stärker bei verschiedenen Akteuren bekannt gemacht, deren Anwendung gefördert und schließlich auch Forschungslücken identifiziert.

Literatur

ADELPHI, PRC, EURAC, 2015: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt (Hrsg.), *Climate Change* 24, online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/>

medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_kurz_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_6.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

BUNDESREGIERUNG, 2015: Erster Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett beschlossen am 16.11.2015. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

BUNDESREGIERUNG, 2020: Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett beschlossen am 21.10.2020. Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

BUTH, M., KAHLNBORN, W., GREIVING, S., FLEISCHHAUER, M., ZEBISCH, M., SCHNEIDERBAUER, S., SCHAUSER, I., 2017: Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung. Umweltbundesamt (Hrsg.), online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

IMBERY, F., PLAGEMANN, S., NAMYSLO, J., 2013: Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. *Advanced in Science and Research* 10, 91-98.

IPCC, 2020: Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

UMWELTBUNDESAMT (UBA), 2019: Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt, 276 Seiten. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2019>, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

Autorinnen

DR. INKE SCHAUSER
Umweltbundesamt
Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
inke.schauser@uba.de

KIRSTEN SANDER
Umweltbundesamt
Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
kirsten.sander@uba.de

T. GEIGER

13 Regionale Klimamodellierung zur Abschätzung sozio-ökonomischer Klimafolgen

Regional climate modelling for assessing socio-economic climate impacts

Zusammenfassung

Eine umfassende Bestandsaufnahme von sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels ist Grundlage für Entscheidungsprozesse in Politik, Verwaltung und Wirtschaft. Hochauflösende Daten basierend auf regionaler Klimamodellierung bilden vermehrt die Basis solcher Analysen. Dieser Beitrag liefert eine Einführung in die sozioökonomische Klimafolgenforschung und einen Überblick über aktuelle Studien, für deren Resultate regionale Klimadaten herangezogen wurden. Hürden und Vorschläge zu einer umfassenderen Nutzung regionaler Klimadaten werden kritisch diskutiert.

Summary

A comprehensive assessment of the socio-economic impacts of climate change is the basis for decision-making in politics, administration and the economy. High-resolution data based on regional climate modelling increasingly form the basis of such analyzes. This article provides an introduction to socio-economic climate impact research and an overview of recent studies applying regional climate data in this context. Obstacles and suggestions for a wider use of regional climate data are critically discussed.

1 Einleitung

Das Voranschreiten des Klimawandels hat zunehmend auch gesellschaftliche Auswirkungen. Da von einer Verstärkung des Klimawandels auch in den nächsten Jahrzehnten auszugehen ist, liefert eine Abschätzung der damit verbundenen Folgen wichtige Grundlagen für Entscheidungsprozesse in Politik, Verwaltung und Wirtschaft. Hierzu ist zusätzlich zur Abschätzung der physikalischen Klimafolgen auch eine sozioökonomische Abschätzung unerlässlich, da diese direkt in die Entscheidungsprozesse integriert werden kann.

Wie man zu einer fundierten sozioökonomischen Abschätzung gelangt und was in diesem Zusammenhang das Stichwort „Sozioökonomie“ alles bedeuten kann, soll im folgenden Beitrag behandelt werden. Wichtig ist zu verstehen, dass wir es mit einer langen und interdisziplinären Prozess- und Verständniskette zu tun haben, deren Grundlage die von globalen Klimamodellen (*Global Circulation Models, GCMs*) simulierten Klimadaten bilden. Um relevante Prozesse des Klimasystems (z. B. Konvek-

tion) besser abzubilden und die Klimadaten mit feinerer Gitterauflösung bereitzustellen, wird anschließend häufig noch ein zusätzliches Downscaling mit numerischen regionalen Klimamodellen (*Regional Climate Models, RCMs*) oder mit einem empirisch-statistischen Downscaling-Verfahren (*Empirical Statistical Downscaling, ESD*) durchgeführt. So gibt es z. B. für verschiedene Weltregionen CORDEX-Experimente (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), welche im Rahmen von EURO-CORDEX¹ Klimadaten unterschiedlicher GCM-RCM-Kombinationen mit einer Gitterauflösung von etwa 12,5 km für Europa bereitstellen. Darauf aufbauend können dann noch spezifischere nationale Auswertungen erfolgen, wie z. B. im Projekt ReKliEs-De² (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland), in dem EURO-CORDEX-Simulationen systematisch für Deutschland ausgewertet und durch ausgewählte weitere Simulationen komplettiert wurden.

Im nächsten Schritt der Prozesskette werden die Klimadaten entweder zu aussagekräftigen Klimaindikatoren

¹ <https://euro-cordex.net/>

² <http://reklies.hlnug.de/home/>

zusammengefasst oder fließen direkt in Klimafolgemodellen ein, deren Aufgabe es ist, hochaufgelöste Daten über die physikalischen Klimafolgen bereitzustellen. Beispielhaft kann mit hydrologischen Modellen der Wasserabfluss eines ausgewählten Flusseinzugsgebiets, der Pegelstand des Flusses oder sogar die Überflutungstiefe für ein Hochwasser mit spezifischem Wiederkehrintervall simuliert werden.

Diese Information kann dann in der Kombination mit sozioökonomischen Daten genutzt werden, um gesellschaftlich relevante Klimafolgeabschätzungen zu tätigen. Dem Hochwasserbeispiel folgend, können die Überflutungskarten mit Karten von Kapital- und Infrastrukturverteilungen überlagert werden, um mithilfe von empirisch kalibrierten Schadensfunktionen Hochwasserschäden abzuschätzen. Diese Schäden können dann ihrerseits noch weitere sozioökonomische Folgen nach sich ziehen, die eventuell sogar jenseits der räumlichen und zeitlichen Grenzen des betrachteten Ereignisses relevant sein können.

Da diese lange Prozesskette immer nur so gut wie ihre Bausteine sein kann, liefern realistische, hochaufgelöste Kli-

madaten einen wichtigen Beitrag. In diesem Text soll daher ein Einblick in den aktuellen Stand der sozioökonomischen Klimafolgenforschung basierend auf der regionalen Klimamodellierung vermittelt werden. Schwerpunktmäßig wird dabei der europäische Raum betrachtet. Dieser Überblick hat das Ziel, möglichst die Breite der sozioökonomischen Anwendungen abzudecken, ohne die Möglichkeit zu haben, eine umfassende Betrachtung in der Tiefe für alle Bereiche liefern zu können.

2 Übersicht der sozioökonomischen Klimafolgen

Die in der Einleitung schon kurz angerissene Prozesskette zur Bestimmung von sozioökonomischen Klimafolgen lässt sich anschaulich durch eine Überlagerung von drei Bestandteilen, nämlich von klimatischer Gefährdung³, Exposition⁴ und Verwundbarkeit⁵ illustrieren (Abb. 13-1, IPCC 2014). Dabei bezeichnet die klimatische Gefährdung den Einfluss von relevanten Klimagrößen wie Temperatur, Niederschlag oder Wind auf ein potenziell beeinträchtigt System wie die Bevölkerung in einer Untersuchungsregion (Exposition). Die Verwundbarkeit beschreibt dann, wie

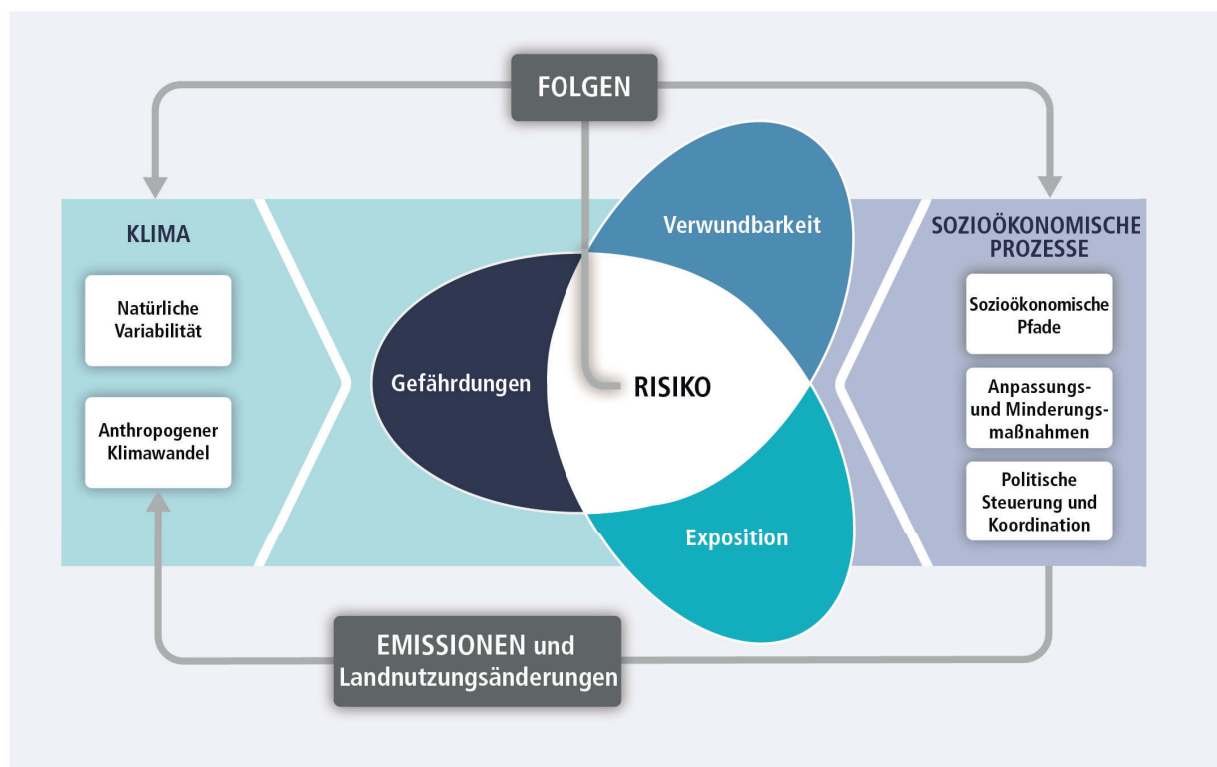


Abb. 13-1: Das Risiko von sozioökonomischen Klimafolgen resultiert aus der Exposition menschlicher Systeme durch klimabedingte Gefährdungen je nach Verwundbarkeit. Änderungen sowohl im Klimasystem (links), als auch in den sozioökonomischen Prozessen (rechts) sind Treiber für Gefährdungen, Exposition und Verwundbarkeit. Übersetzte Abbildung nach Fig. WGII_AR5_FigSPM-1 (IPCC 2014) von der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle (Quelle: www.de-ipcc.de/273.php, letzter Abruf am 10.02.2021).

³ Analog zu klimatischer Einfluss in der deutschen Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse

⁴ Analog zu räumlichen Vorkommen in der deutschen Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse

⁵ Analog zu Sensitivität in der deutschen Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse

das exponierte System aufgrund seiner Eigenschaft auf die klimatische Gefährdung reagiert. Die sozioökonomische Klimafolge (oder auch Klimawirkung) und deren zeitliche Entwicklung hängt also stark davon ab, wie sich die Exposition menschlicher Systeme und deren Verwundbarkeit unter zukünftigen politischen und sozioökonomischen Prozessen (z. B. wirtschaftliche und demographische Entwicklung) und durch Anpassungsmaßnahmen entwickelt. Insbesondere bedeutet das auch, dass zu allen drei Bestandteilen Daten vorliegen müssen, um eine sozioökonomische Klimafolgenabschätzung zu liefern. Historisch greift man hierzu häufig auf Beobachtungsdaten zurück. Allerdings ist es in der Praxis meistens so, dass Informationen zur Verwundbarkeit nicht direkt vorliegen und aus Beobachtungsdaten zu Gefährdung, Exposition und Klimafolgen abgeleitet werden müssen. Für die Zukunft werden die benötigten Daten zur Gefährdung und Exposition aus Klima- und sozioökonomischen Entwicklungsmodellen extrahiert, während die empirisch gefundenen Zusammenhänge zur Verwundbarkeit (eventuell unter zusätzlichen Annahmen zur Anpassung) extrapoliert oder modelliert werden.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Kanäle von Klimawirkungen im Rahmen der Sozioökonomie. Die einzelnen Kanäle sind aber nicht unabhängig voneinander, sodass direkte Effekte in einem Kanal indirekt auch andere Kanäle betreffen können. Als direkte Folgen bezeichnet man alle Folgen, die in einem gewissen räumlichen und zeitlichen Fenster um das Ereignis herum direkt aus der klimatischen Gefährdung resultieren. Indirekte Folgen treten dementsprechend zeitlich verzögert oder an einem unterschiedlichen Ort auf und betreffen meistens auch einen anderen Kanal. So können z. B. aufgrund einer überfluteten Produktionsstätte Produktionsausfälle entstehen, die über Handelsketten indirekt die Produktion an einem anderen Ort betreffen.

Ökonomisch betrachtet lassen sich die Folgen im jeweiligen Kanal grundsätzlich in einen *stock*- oder *flow*-Effekt trennen. Hierbei ist ein *stock* eine Größe, die an einem festen Zeitpunkt gemessen werden kann (beispielsweise der Kapitalstock), während der *flow* immer über ein Zeitintervall definiert ist (z. B. das Bruttoinlandsprodukt in einem Jahr). Während die Zerstörung der Produktionsstätte im obigen Beispiel den Kapitalstock reduziert, ist der Produktionsausfall ein *flow*-Effekt. Klimatische Gefährdungen betreffen häufig den *stock* direkt (z. B. durch Schäden oder Zerstörung), während der *flow* indirekt und auch längerfristig betroffen sein kann. Ein wichtiges Beispiel, bei dem der *flow* direkt betroffen sein kann, ist die Arbeitsproduktivität (also die Arbeitsleistung pro Zeit), die z. B. durch extreme Hitzebelastung herabgesetzt werden kann.

Stock- und *flow*-Effekte treten in verschiedenen Sektoren oder Wirtschaftsbereichen auf. Wichtige Sektoren sind unter anderem die industrielle Produktion, der Energie-, Bau- oder Finanzsektor, die Forst- und Landwirtschaft, der

Transportsektor, aber auch Bereiche wie Gesundheit und Tourismus. Häufig ist nicht nur ein Sektor von sozioökonomischen Klimafolgen betroffen, sondern die Folgen sind sektorübergreifend.

Jenseits der rein ökonomischen Betrachtung treten noch weitere Folgen auf, die sich nicht dem *stock* und *flow* Muster zuordnen lassen beziehungsweise auch monetär nicht umfassend bewertbar sind. Dazu gehören sowohl sozialgesellschaftliche Effekte im Bildungs- und Gesundheitssektor, vor allem psychische Gesundheit, als auch indirekte sozio-politische Folgen. Hierzu zählen kriegerische Konflikte, temporäre und dauerhafte Migration, Handelseinschränkungen (z. B. durch Zölle), Verschuldungsproblematiken öffentlicher Haushalte aber auch aktive klimapolitische Entscheidungen zur Investition in Mitigations- oder Anpassungskonzepte.

In den meisten Fällen sind die sozioökonomischen Klimafolgen negativ. Zugleich gibt es aber auch vereinzelte positive Folgen (wie Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft oder im Tourismus), wobei generell die räumliche und zeitliche Skala bei der Abschätzung mitbeachtet werden muss. Die Zunahme von Touristen durch wärmeres Wetter am Meer geht eventuell mit abnehmendem Tourismus im Wintersport einher. Die Beschädigung von Häusern durch Hochwasser fördert die regionale wirtschaftliche Tätigkeit insbesondere im Bausektor, gleichzeitig werden andere Investitionen aufgeschoben oder mit neuen Schulden finanziert. Ein wichtiger Zulieferbetrieb in einem Land profitiert von der Misere eines Konkurrenten in einem anderen Land, dessen Produktion durch einen tropischen Wirbelsturm monatelang unterbrochen wurde. Der betroffene Zulieferbetrieb wird durch globale Marktverschiebungen nie mehr die Rolle einnehmen, die er vor dem Wirbelsturm hatte, mit allen damit verbundenen Folgen für die regionale Wirtschaft.

Eine zuverlässige sozioökonomische Abschätzung möglicher Klimafolgen ist die Basis einer jeden Anpassungsstrategie und liefert eine Entscheidungsgrundlage für Entscheider von der kommunalen bis zur internationalen Ebene, wie die UN oder Weltbank. Auch für die Wirtschaft spielt das transformative Risiko, zum Beispiel durch weitreichende klimapolitische Entscheidungen, und das physikalische Risiko durch klimatische Gefährdungen eine immer wichtigere Rolle. Vorreiter ist momentan die internationale Finanzindustrie, die sich im Rahmen der *Taskforce on Climate-related Financial Disclosures*⁶ (TCFD, deutsch: Arbeitsgruppe zur Offenlegung klimabezogener finanzieller Risiken) verpflichtet, ihre finanziellen Risiken durch den Klimawandel zu quantifizieren und zu veröffentlichen. Das Desiderat zur besseren Abschätzung der wirtschaftlichen Risiken durch den Klimawandel haben viele Beratungsunternehmen aufgegriffen und bieten mittlerweile schon diverse Produkte an (z. B. KMPG, PriceWaterhouseCoopers, Bloomberg).

⁶ <https://www.fsb-tcfd.org>

2.1 Übersicht methodischer Ansätze

Das in den vorherigen Abschnitten veranschaulichte Spektrum der sozioökonomischen Klimafolgen wird mit unterschiedlichsten methodischen Ansätzen erforscht und quantifiziert. Das methodische Spektrum reicht von der Abschätzung möglicher Folgen durch Impaktindikatoren über empirisch-statistische Ansätze bis zur ökonomischen Modellierung. Dementsprechend divers ist auch das Spektrum der Anbieter, als auch der Nutzergruppen dieser Analysen.

Im einfachsten Fall lassen sich simple sozioökonomische Impaktindikatoren aus einer Aggregation von klimatischer Gefährdung, Exposition und Verwundbarkeit ableiten. Diese Indikatoren verwenden meistens generelle Zusammenhänge, sind einfach berechenbar und dienen daher einer schnellen Einschätzung der Lage. Im Energiesektor werden zum Beispiel solche Indikatoren verwendet, um die zu erwartenden zukünftigen Erträge aus erneuerbaren Energien abzuschätzen. Private als auch öffentliche *Climate Services Provider* generieren diese Daten und liefern damit eine Planungs- und Investitionsgrundlage für die Wirtschaft von Monaten bis Jahrzehnten.

Mithilfe von empirisch-statistischen Analysen historischer Zeitreihen, sogenannten ökonometrischen Analysen, kann die Wirkung von Wetter- und Klimavariablen auf ökonomische Zeitreihen untersucht werden. In den meisten Fällen sind klimatische Gefährdung, Exposition und Klimafolge bekannt (oder werden als bekannt angenommen), während die Vulnerabilität abgeschätzt werden soll. Dieses häufig von interdisziplinär forschenden Ökonomen oder Naturwissenschaftlern eingesetzte Verfahren benötigt vorab eine Aufbereitung relevanter Klimadaten als auch eine Aggregation dieser Daten auf dieselbe räumliche und zeitliche Auflösung, auf der die sozioökonomischen Daten vorliegen. Bei ausreichend guter Datenlage können signifikante Zusammenhänge im Hinblick auf die Vulnerabilität gewonnen werden. Diese Zusammenhänge können dann (evtl. unter zusätzlichen Annahmen zur Anpassung) in die Zukunft extrapoliert werden, um mit Projektion von klimatischen und sozioökonomischen Daten zukünftige Klimafolgen abzuschätzen. Häufig wird dieses Verfahren verwendet, um sogenannte Schadensfunktionen für Klimaextreme abzuleiten, aber auch zur Kalibrierung und zum Tuning von ökonomischen Modellen (siehe unten).

Sozioökonomische Modellierung ist eine Herangehensweise, um die komplexe Rückkopplung zwischen sozioökonomischer Entwicklung, dem Klimawandel und klimapolitischer Entscheidungen zu simulieren. Meistens werden die Klimadaten nicht direkt in die ökonomischen Modelle integriert, sondern es werden Klimafolgenmodelle vorgeschaltet, mit deren Output eine spezifischere Ansteuerung der Modelle möglich wird. Je nach Modelltyp beziehungsweise Modellkombination stehen deshalb auch unterschiedliche Fragestellungen im Vordergrund. Aufwendige gesamtwirtschaftliche *Integrated Assessment Models* (IAMs, deutsch:

Integrierte Bewertungsmodelle) simulieren kostenoptimale makroökonomische Entwicklungspfade unter Berücksichtigung von klimapolitischen Zielen und Klimafolgenkosten, allerdings mit dem Defizit einer niedrigen räumlich-zeitlichen Auflösung. IAMs werden häufig von großen Forschungseinrichtungen entwickelt. Ihr Output bildet die Grundlage für politische Entscheidungsprozesse oder definiert Rahmenbedingungen für die gesamte Forschungsgemeinschaft, zum Beispiel durch die Erzeugung von globalen, sozioökonomischen Referenzentwicklungspfaden (sogenannten *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs)). Analysen dieser Modelle finden daher häufig Eingang in die fortlaufenden *Assessment Reports* (AR) des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) und sind Verhandlungsgrundlage bei den Klimakonferenzen. Darüber hinaus werden häufig sogenannte *Computable General Equilibrium Models* (CGEs, deutsch: berechenbare allgemeine Gleichgewichtsmodelle) verwendet, die mit hohem Detail die Wirtschaftsstruktur eines Landes oder einer Region wiedergeben und so zur Abschätzung wirtschaftlicher Auswirkungen aufgrund eines Treibers (wie dem Klimawandel) herangezogen werden. Aufgrund der CGE-Modellstruktur können meistens nur Änderungen zwischen zwei Szenarien (z. B. Realisierung mit und ohne Klimawandel) betrachtet werden. Weiterhin können einige Wirtschaftssektoren oder Rückkopplungsprozesse in CGEs nur unzureichend abgebildet werden, sodass die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen meistens nur eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Effekte liefern können.

3 Beiträge regionaler Klimamodellierung zur Abschätzung sozioökonomischer Klimafolgen

Zur Abschätzung sozioökonomischer Klimafolgen spielen zuverlässige, hochauflösende regionale Klimamodelle eine wichtige Rolle. Inwieweit die regionalen Klimamodelle diese Aufgabe schon erfüllen beziehungsweise wie diese Rolle noch effektiver ausgestaltet werden kann, soll im Folgenden erörtert werden. Der folgende Überblick gliedert die bestehenden Aktivitäten sowohl nach Nutzbarkeit, als auch nach ausgewählten wirtschaftlichen Sektoren. Die betrachteten Sektoren sind: Energiesektor, Wassersektor, Forst- und Landwirtschaft, Infrastruktur/Verkehr, Tourismus, Gesundheitssektor, Meeres-, Küsten- und Fischereisektor und weitere Sektoren/sectorübergreifende Studien. Die betrachtete Nutzbarkeit gliedert sich lose in den Bereich *Climate Services/Operationeller Dienst*, anwendungsnahe oder politikrelevante Forschung und generelle Forschung. Nicht alle Bereiche aus den beiden Kategorien werden in der Übersicht erfasst.

Im Bereich *Climate Services/Operationeller Dienst* gibt es eine Vielzahl von Aktivitäten auf europäischer und nationaler Ebene mit dem Ziel, aktuelle, nutzerrelevante Klimafolgeabschätzungen für die Öffentlichkeit verfügbar zu machen. Eine wichtige Rolle spielt hier der europäische *Copernicus Climate Change Service* (C3S). Als anwendungsnahe oder politikrelevante Forschung betrachten wir

hier die Forschungsaktivitäten, die direkt von der Wirtschaft oder Politik in Auftrag gegeben wurden, beziehungsweise Grundlage sind für nationale Anpassungsstrategien etc. Dadurch unterscheidet sich dieser Bereich hauptsächlich von der generellen Forschung.

Die hier verwendete Unterteilung in Sektoren erfolgt aus Gründen der Übersichtlichkeit. Es ist zu beachten, dass ein Großteil der Klimafolgen gleichzeitig mehrere Sektoren direkt betrifft oder sich indirekt über unterschiedliche Kanäle in vielen Sektoren (negativ als auch positiv) bemerkbar macht. Viele der hier vorgestellten Studien wurden auch deshalb sektorübergreifend durchgeführt und nur zum Zweck der Darstellung hier sektorscharf getrennt.

3.1 Energiesektor

3.1.1 Climate Services / Operationeller Dienst

Der im Aufbau befindliche C3S operationelle Service für Energie⁷ basiert auf einer Zusammenführung zweier vorgelagerter Demonstrator-Projekte ECEM⁸ und CLIM4ENERGY,⁹ Ziel dieses Service ist es, Klima- und Energieindikatoren bereitzustellen, die zur Abschätzung der Energienachfrage und -produktion aus erneuerbaren Quellen im Wind-, Solar- und Hydrossektor genutzt werden können. Diese Indikatoren basieren direkt und indirekt auf RCM-Daten aus dem EURO-CORDEX-Projekt. Im Rahmen von CLIM4ENERGY wurden zahlreiche Fallstudien durchgeführt, die für die Energieproduktion relevante Indikatoren bereitstellen sollten. Unter anderem wurden Indikatoren zur Energieproduktion und Kapazität für den Solar- und Windsektor und für die Energienachfrage bereitgestellt.

3.1.2 Generelle Forschung

Zusätzlich zu den von C3S geförderten Projekten im Energiesektor gibt es auf europäischer Ebene noch weitere Projekte mit ähnlicher Ausrichtung. Darunter fallen zum Beispiel das JPI Climate Projekt CLIM2POWER¹⁰ und das bereits abgeschlossene Projekt IMPACT2C mit dem dafür entwickelten Webatlas¹¹. Innerhalb von IMPACT2C wurde eine Studie zum zukünftigen Stromverbrauch in Europa unter einer Erwärmung von 2 °C durchgeführt. In allen Ländern bis auf Italien übersteigt demnach die Abnahme an Heizkosten die Zunahme durch Kühlkosten, wobei interessanterweise nicht das Klima, sondern die jeweilige Energiepolitik eines Landes als wichtigster Treiber des Verbrauchs identifiziert wurde (DAMM et al. 2017).

3.2 Wassersektor

Neben dem Energiesektor ist der Wassersektor¹² einer der aktivsten im Bereich der sozioökonomischen Klimafolgenforschung. Hier gibt es eine Vielzahl von praxisnahen Forschungsprojekten und die generelle Tendenz der hydrologischen Modelle auf hochaufgelöste Klimadaten aus RCMs zurückzugreifen.

3.2.1 Climate Services / Operationeller Dienst

Im Rahmen von C3S entsteht zur Zeit ein operationeller Service für den Wassersektor. Dieser soll für Wasser-Manager relevante Informationen zu Wasserverfügbarkeit, Hochwassermanagement, zum ökologischen Status und zur industriellen Wassernutzung bereitstellen, um Handlungsoptionen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln. Dieser Service verschmilzt die Aktivitäten zweier Demonstrator Projekte (EDgE¹³ und SWICCA¹⁴), wobei im Rahmen von SWICCA zahlreiche Fallstudien¹⁵ basierend auf RCMs mit sozioökonomischer Klimafolgenanalyse durchgeführt wurden. Hier liefern die RCMs basierend auf EURO-CORDEX Eingangsdaten für die hydrologischen Modelle. Passend dazu wurden nationale sozioökonomische Entwicklungspfade für Bevölkerung und BIP auf Gitterebene erstellt.

Im Fokus einiger Fallstudien stand die Wasserverfügbarkeit für Industrie und Landwirtschaft. In der Emilia-Romagna Region in Italien wurden Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt, um klimabeständige Bewässerungsstrategien zu entwickeln. Ebenso wurde untersucht, wie die langfristige Vergabe von Wassernutzungsrechten in der Zukunft angepasst werden muss. In Andalusien (Spanien) wurden Abschätzungen zur Schmelzwasserverfügbarkeit als Potential zur Wasserkraftnutzung durchgeführt. Das Potential der Stromerzeugung aus Wasserkraft stand auch für das Unternehmen Vattenfall in Schweden im Fokus. Zukünftige Brauwasserverfügbarkeit und -qualität wurde vom Unternehmen Heineken in den Niederlanden untersucht. Des Weiteren stand die Klimabeständigkeit regulatorischer Maßnahmen im Hinblick auf Wasserverschmutzung durch ansässige Industrieunternehmen am Asopos Fluss in Griechenland, als auch die Sicherheit von Giftmüllstandorten in Flussnähe in Schweden im Fokus. Die Schiffbarkeit des Rheins und die damit verbundenen Kosten im Transportsektor wurden für den Rhein in Deutschland untersucht.

⁷ <https://climate.copernicus.eu/index.php/operational-service-energy-sector>

⁸ European Climatic Energy Mixes (ECEM) <https://www.wemcouncil.org/wp/european-climatic-energy-mixes/>

⁹ CLIM4ENERGY (C4E) <http://clim4energy.climate.copernicus.eu/>

¹⁰ CLIM2POWER <http://www.jpi-climate.eu/nl/25223439-CLIM2POWER.html> Die

¹¹ Quantifying projected impacts under 2°C warming (IMPACT2C) <https://www.atlas.impact2c.eu/en/>

¹² <https://climate.copernicus.eu/operational-service-water-sector>

¹³ End-to-end Demonstrator for improved decision-making in the water sector in Europe (EDgE) <http://edge.climate.copernicus.eu/>

¹⁴ Service for Water Indicators in Climate Change Adaptation (SWICCA) <http://swicca.eu/>

¹⁵ <http://swicca.eu/start/implemented-cases-of-local-change-adaptation/>

3.2.2 Anwendungsnahe, politikrelevante Forschung

Beispielhaft soll hier eine Studie im Auftrag des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) zur Abschätzung von zukünftigen Hochwasserschäden in Deutschland (PIK 2011) erwähnt werden. Dazu wurden Klimadaten der regionalen Klimamodelle REMO (Erwärmungsszenarien A2, A1B, B1) und CCLM¹⁶ (Erwärmungsszenarien A1B, B1) verwendet, um mit einem hydrologischen Modell Hochwasserabflüsse zu berechnen, die dann mit Schadensfunktionen der GDV in Hochwasserschäden übersetzt wurden. Untersucht wurden mittlere langjährige Schadensniveaus für unterschiedliche Zeiträume und Erwärmungsszenarien, jedoch ohne Änderung der zugrundeliegenden sozioökonomischen Exposition.

3.2.3 Generelle Forschung

Aufgrund von zahlreichen Datenquellen, die für eine umfassende Folgeabschätzung durch Flusshochwasser benötigt werden, beschränken sich viele Studien auf ausgewählte Flusseinzugsgebiete oder einzelnen Regionen. Auf gesamteuropäischer Ebene soll hier eine Studie hervorgehoben werden, die als eine der ersten basierend auf EURO-CORDEX-Simulationen durchgeführt wurde (ALFIERI et al. 2015). Für alle europäischen Länder liefert diese bis 2100 eine Abschätzung des Flutrisikos mithilfe des hydrologischen Modells LISFLOOD unter dem Erwärmungsszenario RCP8.5 (*representative concentration pathway, RCP*), als auch die Quantifizierung der betroffenen Bevölkerung und der Hochwasserschäden unter allen verfügbaren zukünftigen sozioökonomischen Szenarien im Rahmen der SSPs.

3.3 Forst- und Landwirtschaft

Aufgrund der langfristigen Planungshorizonte und der langsamen natürlichen Anpassung spielen sozioökonomische Folgeabschätzungen für die Forstwirtschaft eine wichtige Rolle. In der Landwirtschaft gibt es eine komplizierte Verknüpfung von im Mittel steigenden Ernteerträgen im mitteleuropäischen Raum durch bessere Wachstumsbedingungen und CO₂-Düngeeffekte, die aber zum Beispiel durch Schadorganismen, Extremwetterlagen und Waldbrände lokal und zeitlich sehr unterschiedlich ausfallen können. Nur ein kleiner Teil aller Studien untersucht die Klimafolgen im Forst- und Landwirtschaftssektor mit einer ökonomischen Perspektive. Eine ökonomische Betrachtung klimabedingter Folgen für die Nutztierhaltung findet bisher so gut wie gar nicht statt.

3.3.1 Generelle Forschung

Im Rahmen des österreichischen COIN¹⁷-Projekts (*Cost of Inaction: Assessing the costs of climate change for Aust-*

ria) wurde eine umfassende sozioökonomische Betrachtung des Landwirtschaftssektors durchgeführt. Dabei wurde das biophysikalische, prozessbasierte Model EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*) mit regionalen Klimadaten als auch sich verändernden Landnutzungsmustern angetrieben, um Ertragsänderungen für die fünf wichtigsten Nutzpflanzen (inklusive Weideland) für unterschiedliche Zeitfenster und Erwärmungslevel abzuschätzen. Anhand von inflationsbereinigten Marktpreisen wurden daraufhin die zukünftigen ökonomischen Erträge des Landwirtschaftssektors abgeschätzt. Der gesamtwirtschaftliche Effekt wurde anschließend mit einem CGE-Modell quantifiziert, in dem neben Ernteerträgen auch Produktivitätsänderungen durch technologischen Fortschritt und Rückkopplungen mit anderen Wirtschaftssektoren berücksichtigt werden. Im Mittel konnte so ein gesamtwirtschaftlicher Nutzen durch den Klimawandel für Österreich vorhergesagt werden, wobei die lokale Variabilität der Ernteerträge sehr hoch und lokal auch negativ sein kann.

Eine vergleichbare Abschätzung im selben Projekt für die Forstwirtschaft ergab eine Reduktion von Erträgen (sektorspezifisch als auch gesamtwirtschaftlich), getrieben durch projizierten erhöhten Dürrestress, Borkenkäferbefall und schädigende Wetterextreme. Eine gesamteuropäische Studie basierend auf regionalen Klimadaten des ENSEMBLES¹⁸-Projekts prognostiziert ebenfalls ökonomische Verluste im Forstsektor, hier vor allem begründet durch eine Abnahme ökonomisch wertvoller Baumarten unter Klimawandel (HANEWINKEL et al. 2012).

Neben den erwähnten umfassenden, gekoppelten Analysen gibt es eine Vielzahl von weiterführenden Analysen, beispielsweise den prognostizierten Einfluss von Dürren auf zukünftige Einkommensungleichheit in Spanien (QUIROGA et al. 2016) oder zur Abschätzung ökonomischer Folgen durch Ernteeinbußen für Äpfel, Oliven oder Trüffel auf regionalem Niveau. Im Großen und Ganzen wird dabei deutlich, dass lokale Ertragssteigerungen (z.B. durch den CO₂-Düngeeffekt) zu erwarten sind, diese aber durch den Einfluss zunehmender Wetterextreme (Dürren, Wildbrände) (über)kompensiert werden können.

3.4 Infrastruktur / Verkehr

Ausfälle im Infrastruktur- und Verkehrssystem können neben direkten Verlusten, zum Beispiel durch die Zerstörung von Straßen durch Wetterextreme, ein Vielfaches an indirekten Kosten auf makroökonomischer Ebene verursachen. Daher ist hier eine sozioökonomische Bewertung von Klimawirkungs- und Anpassungsoptionen von besonderer Bedeutung. Gleichzeitig ist der Verkehrssektor aufgrund seiner Emission selbst ein Treiber des Klimawandels. Eine klimaschonende Verkehrstransformation hat somit direkten Einfluss auf die sozioökonomischen Folgen in allen Wirtschaftszweigen.

¹⁶ COSMO Modell im Klimamodus (C) und als lokales Modell (LM) (version 3.1)

¹⁷ <https://coin.ccca.ac.at/>

¹⁸ <http://ensembles-eu.metoffice.com/>

3.4.1 Anwendungsnahe, politikrelevante Forschung

Ein in Deutschland vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördertes Experten-Netzwerk¹⁹ verfolgt das Ziel, die durch Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse bedingten Verwundbarkeiten für Verkehr und Infrastruktur zu bestimmen und darauf aufbauend entsprechende Anpassungsoptionen zu entwickeln. Dabei wird die Betroffenheit der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durch Hochwasser, Sturm, Hangrutschungen und wasserstraßenspezifische Gefährdungen untersucht. Ein vom Deutschen Wetterdienst bereitgestelltes Referenz-Ensemble²⁰ von RCM-Simulationen bietet die Ausgangsdaten für nachgelagerte Modelle und Analysen. Im Überlapp mit einer Studie des Wassersektors zur Schiffbarkeit des Rheins wurden hier auch die mit einer Einstellung/Reduktion des Schiffsverkehrs durch Niedrig- oder Hochwasser verbundenen Kosten für den Transportsektor abgeschätzt. In der Zukunft sind vermehrt Einschränkungen der Schiffbarkeit des Rheins zu erwarten, wobei ein Teil der Fracht auf Schiene und Straße umgelagert werden könnte, allerdings zu deutlich höheren Kosten.

3.5 Tourismus

Wetter und Klima sind eine wichtige Säule des Tourismus – sowohl für das Angebot unterschiedlicher Urlaubsmöglichkeiten, als auch für die nachfragenden Touristen. Darüber hinaus haben Touristen durch ihre Reisetätigkeit und die damit verbundenen Emissionen auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Klimawandel an sich (SIMPSON et al. 2008). Da es sich bei den Touristen um eine sehr heterogene Gruppe handelt, die mit einer breiten Auswahlmöglichkeit hinsichtlich touristischer Aktivität konfrontiert ist, sind generelle Aussagen zur Einwirkung des Klimawandels auf den Tourismus schwierig. Vielmehr lassen sich regional unterschiedliche Effekte je nach Zielgebiet festmachen (z.B. Küsten- oder Bergregionen). Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Entwicklung können soziale Komponenten spielen; etwa ein sich veränderndes Bewusstsein hinsichtlich des Klimawandels und seiner Folgen kann eine generelle Änderung des touristischen Verhaltens nach sich ziehen.

3.5.1 Generelle Forschung

Innerhalb des österreichischen COIN-Projekts wurde auch der Einfluss des Klimawandels sowohl auf den Tourismussektor, als auch gesamtwirtschaftlich untersucht. Dazu wurden ökonomische Regressionsmodelle auf Kreisebene anhand historischer Beobachtungsdaten trainiert, um signifikante Zusammenhänge zwischen Wetterdaten und Tourismusaktivitäten aufzudecken. Als Grundlage für Wetter- und Klimadaten wurden Temperatur, Nieder-

schlag, Anzahl an nassen Tagen und Schneemengen in Abhängigkeit der Höhe verwendet. Diese Modelle konnten dann mit zukünftigen Wetter- und Klimadaten basierend auf RCM-Simulationen (teilweise basierend auf dem ENSEMBLES-Projekt) angetrieben werden, um ökonomische Abschätzungen für den Tourismussektor zu liefern. Demnach kann eine prognostizierte Zunahme der Umsätze im Sommertourismus die stärkere Abnahme im Wintertourismus nicht ausgleichen. Gesamtwirtschaftlich verstärkt sich dieser negative Effekt noch. Die Simulationen mithilfe eines CGE-Modells zeigten, dass zusätzlich zu den fehlenden Einnahmen im Tourismussektor eine erhöhte Arbeitslosigkeit der österreichischen Wirtschaft zu schaffen machen könnte.

3.6 Gesundheitssektor

3.6.1 Anwendungsnahe, politikrelevante Forschung

Im Jahre 2018 veröffentlichte das *Austrian Panel on Climate Change* (APCC) einen Sonderbericht zum Thema Gesundheit für Österreich. Die Analysen basieren dabei auf den Österreichischen Klimaszenarien ÖKS 15 (CHIMANI et al. 2016), eine bias-korrigierte, runterskalierte Auswahl der EURO-CORDEX Simulationen. Als wichtigste Erkenntnisse wurden dabei die gesundheitlichen Folgen durch Hitze, vor allem in Kopplung mit der demographischen Entwicklung, und eine Zunahme von Allergien und Infektionskrankheiten, die durch Vektoren wie Mücken oder Zecken übertragen werden. Hitzefolgen sind unter anderem Beeinträchtigungen des Herz-Kreislauf-Systems, erhöhte Mortalität aber auch eine Reduktion der Arbeitsproduktivität. Im Hinblick auf Allergien ist besonders die Verbreitung von Ambrosia hervorzuheben, welche extrem starke allergische Reaktionen auslösen kann. Eine großflächige Beseitigung der Pflanze vor der Blüte ist demnach gesamtwirtschaftlich um ein Vielfaches günstiger als die zu erwartenden Kosten durch ärztliche Behandlung.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie fördert Projekte, die sich mit der Folge von Hitzeextremen auf Gesundheit, insbesondere auf Übersterblichkeit, befassen²¹. Hierfür wurden beispielsweise RCM-Daten zusätzlich mit dem DWD-Stadtklimamodell MUKLIMO_3 verfeinert und für besonders hitzelastige zukünftige Sommertage ohne Niederschlag berechnet und mit Karten für betroffene Bevölkerungsgruppen überlagert.

3.7 Meeres-, Küsten- und Fischereisektor

Meeresspiegelanstieg, veränderte Sturmaktivität, sowie eine Veränderung des gesamten Ökosystems Meer werden mit dem Klimawandel eine Kette von sozioökonomischen Auswirkungen haben, die teilweise schon basierend auf RCM-Daten untersucht werden. So wird beispielsweise erwartet, dass eine Verdichtung der küstennahen Bevöl-

¹⁹ <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de>

²⁰ https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rep_datensatz_node.html

²¹ Ca. 5% der weltweiten Emissionen lassen sich auf Tourismus zurückführen (Simpson et al 2008)

kerung und eine Zunahme von Küstenhochwassern einen starken Anstieg damit verbundener Schäden nach sich ziehen werden.

3.7.1 Climate Services / Operationeller Dienst

Im Rahmen der Copernicus-Förderung soll in einem laufenden Projekt die Grundlage geschaffen werden, um in diesem Sektor betroffene Akteure mit Informationen über relevante Klimafolgen und geeignete Anpassungs- und Vermeidungsstrategien zu informieren. Basierend auf GCM- und RCM-(EURO-CORDEX) Daten soll unter anderem für die britische Wirtschaft eine monetäre Bewertung des Ökosystems und der Fischbestände unter heutigen und zukünftigen Bedingungen entwickelt werden²².

3.7.2 Generelle Forschung

Das RUINS (*Risk, Uncertainty and Insurance under Climate Change*)-Projekt, welches vom BMBF im Rahmen der aktuellen Förderlinie „Ökonomie des Klimawandels“²³ gefördert wird, untersucht die Landnutzung an der deutschen Nordseeküste mit einem speziellen Fokus auf Landnutzungsmanagement unter Unsicherheit. Dazu wird auch die Unsicherheit der Klimamodellierung also Kopplung von vier globalen und drei regionalen Klimamodellen (dynamisch und statistisch) untersucht. Ziel ist es, kostenoptimale Anpassungsstrategien für Ereignisse zu entwickeln, deren Auftrittswahrscheinlichkeit sehr ungenau bis gar nicht bekannt ist.

3.8 Weitere Sektoren / sektorübergreifende Forschung

Neben den oben betrachteten Sektoren sind sozioökonomische Klimafolgen für weitere Sektoren beziehungsweise auch sektorübergreifend zu erwarten. Wetterextreme wie Stürme, Extremniederschläge oder Hagel können mehrere Sektoren gleichzeitig betreffen. Darüber hinaus können nicht direkt betroffene Sektoren indirekt betroffen sein, wenn zum Beispiel Lieferketten unterbrochen werden. Ein Teil der oben erwähnten Studien haben den gesamtwirtschaftlichen Effekt der gesammelten Klimafolgen unter Berücksichtigung möglicher Rückkopplungseffekte innerhalb der Sektoren abgeschätzt. Gleichzeitig muss erwähnt werden, dass alle gesamtwirtschaftlichen Abschätzungen natürlich nur ein sehr vereinfachtes Abbild der Realität schaffen können. Nicht alle Klimafolgen lassen sich adäquat innerhalb des Modells monetarisieren, komplexe Rückkopplungseffekte des Wirtschaftssystems werden nicht abgebildet und die Reaktionen des Modells, beispielsweise in Form von Anpassung an die Klimafolgen, werden meistens als wirtschaftlich optimal angenommen, was in den wenigsten Fällen als realistisch anzusehen ist.

3.8.1 Anwendungsnahe, politikrelevante Forschung

In Deutschland werden im Rahmen der nationalen Anpassungsstrategie regelmäßig die neuesten Erkenntnisse zur Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel über eine Vielzahl von Sektoren zusammengetragen. Grundlage für die letzte Vulnerabilitätsanalyse (ADELPHI et al. 2015) bildete ein Ensemble regionaler Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt. Die nächste Aktualisierung der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse basierend auf den aktuellen Klimaprojektionen der EURO-CORDEX-Läufe ist für das Jahr 2021 geplant.

Ähnlich wie für Deutschland liefert die Schweizerische Synthese „Klimabedingte Risiken und Chancen“ (KÖLLNER et al. 2017) eine Abschätzung der sozioökonomischen Risiken und Folgen für die Schweiz. Grundlage für die Synthese bilden acht systematische Fallstudien, deren Resultate auf die Gesamtschweiz übertragen wurden. Die verwendeten Klimadaten basieren auf den Klimaszenarien für die Schweiz von 2011.

Basierend auf den Österreichischen Klimaszenarien (ÖKS 15) werden unterschiedliche Studien zu den sozioökonomischen Folgen des Klimawandels für Österreich durchgeführt. Neben dem schon erwähnten *special report* des APCC zu Gesundheit (APCC 2018) ist ein weiterer Report zu Tourismus jüngst veröffentlicht worden (PRÖBSTL-HAIDER et al. 2020). Das COIN-Folgeprojekt COIN-INT²⁴ (*Costs of Inaction for Austria: Climate change impacts transmitted by international trade*) untersucht zurzeit den sozioökonomischen Effekt der internationalen Folgen des Klimawandels für Österreich.

Über die schon erwähnten sektoralen Analysen des COIN-Projekts hinaus wurde auch eine gesamtwirtschaftliche Analyse über unterschiedliche Sektoren und Klimafolgen durchgeführt. Die folgenden Sektoren konnten dafür im CGE-Modell berücksichtigt werden: Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Gebäudesektor, Elektrizität, Transport, verarbeitendes Gewerbe und Handel, urbane Effekte, Katastrophenmanagement und Tourismus. Gegenüber einem CGE-Lauf ohne Klimawandel waren die makroökonomischen Effekte des Klimawandels leicht negativ mit einer jährlichen Reduktion des BIP um circa -0,2 % im Jahre 2050. Die größten negativen Effekte resultierten aus den Sektoren Elektrizität, Forstwirtschaft, Tourismus und Katastrophenmanagement, während die Sektoren Landwirtschaft und Gebäude die größten positiven Effekte verzeichnen konnten. Gleichzeitig bleibt die durchgeführte Studie unvollständig, da neben schon erwähnten Einschränkungen von CGE-Modellen zusätzlich wichtige Sektoren und Effekte, zum Beispiel aus dem Gesundheitssektor, nicht monetarisiert werden konnten und durch Handel „importierte“ internationale Klimafolgeneffekte

²² <https://www.hlnug.de/?id=10236>

²³ <https://climate.copernicus.eu/marine-coastal-and-fisheries-project>

²⁴ <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/oekonomie-des-klimawandels-phase-2.php>

unberücksichtigt bleiben. Der letzte Schritt wird zurzeit im COIN-INT-Projekt untersucht.

3.8.2 Generelle Forschung

Durch das *Joint Research Center* (JRC) der Europäischen Kommission wurden eine Reihe von Studien zur sozio-ökonomischen Quantifizierung der Klimafolgen für die EU durchgeführt. In der jüngsten Studie PESETA III (CISCAR et al. 2018) wurden EURO-CORDEX-Simulationen zur Abschätzung der Klimafolgen für spezifische Sektoren als auch der Gesamtwirtschaft herangezogen. Ökonomische Abschätzungen erfolgten für Küsten- und Flusshochwasser, Arbeitsproduktivität und Mortalität, Landwirtschaft und Energie. Das gesamtwirtschaftliche CGE-Modell lieferte Abschätzungen für fünf unterschiedliche Regionen: Nordeuropa, UK und Irland, zentrales Nordeuropa (inklusive Deutschland), zentrales Südeuropa (inklusive Österreich) und Südeuropa. Generell lässt sich ein Nord-Süd-Gefälle beobachten. Während die negativen Wohlfahrtseffekte in einer 2 °C wärmeren Welt für Nord- und Zentraleuropa fast vernachlässigbar sind und unter einer Erwärmung nach RCP8.5 etwa 1 % des BIP in der jeweiligen Region ausmachen, sind die Effekte im südlichen Europa ungleich größer (1-2 % bzw. 2.5-4 %). In Südeuropa und Zentraleuropa sind die Kosten verbunden mit hitzebedingter Mortalität am größten, während in Nordeuropa und für UK und Irland die Küstenhochwasser als größte Kostentreiber identifiziert wurden.

4 Hürden und weitere Schritte

Die regionale Klimamodellierung, hier mit Fokus auf Europa, spielt mittlerweile eine nicht mehr zu übersehende Rolle in der sozioökonomischen Klimafolgenforschung. Gleichwohl besteht je nach Anwendungsgebiet, Zielgruppe oder Fragestellung noch die Möglichkeit, die regionale Klimamodellierung tiefer zu verankern. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Veröffentlichung eine nicht-repräsentative E-Mail-Umfrage unter ökonomisch orientierten, anwendungsnahen WissenschaftlerInnen aus dem Bereich der Klimafolgenforschung durchgeführt. Auf einige wiederholt genannte, als auch aus der wissenschaftlichen Literatur extrahierte Punkte soll im Folgenden eingegangen werden.

Es besteht ein grundlegendes Interesse von Ökonomen, Klimaprojektionen für ihre Analysen zu nutzen. Allerdings stellen in den meisten Fällen die bereitgestellten Daten eine zu große Hürde zur eigenständigen Weiterverarbeitung dar. Dabei spielt meistens Unerfahrenheit mit Klimamodellierung, Klimadaten, Klimadatenformaten und Klimadatenanalyse die Hauptrolle. In den allermeisten Fällen wird ein Mediator benötigt, der die Klimadaten für die ökonomische Analyse bereitstellt. Die wichtigste Aufgabe dieses Vermittlers besteht darin, relevante Klimaindizes zu erstellen, die in der räumlich-zeitlichen Auflösung mit den sozioökonomischen Größen übereinstimmen. In den meis-

ten Fällen spielt daher die (möglichst) hohe Gitterauflösung keine entscheidende Rolle, da die Daten im Nachgang auf administrative Grenzen (Kreise, Städte, Länder etc.) aggregiert werden müssen, um sie der ökonomischen Analyse zugänglich zu machen.

Die Rolle der Mediatoren nehmen bisher die WissenschaftlerInnen ein, die schon im Bereich der sozioökonomisch relevanten Klimafolgenforschung tätig sind. In diesem Umfeld wird häufig der Wunsch nach einer besseren Repräsentation von Extremereignissen in den regionalen Klimamodellen genannt. Ein weiteres wichtiges Thema ist die Unsicherheitsabschätzung der Daten aus den RCM-Ensembles. So wird zum Beispiel kritisiert, dass nur ein kleiner Teil der verfügbaren GCMs als Input für die RCMs genutzt und so das Unsicherheitsintervall künstlich verkleinert wird. Ebenfalls wird die Frage nach dem Sinn dynamischer RCMs gestellt, wo doch ESD-Verfahren eine ähnliche Güte aufweisen.

Immer häufiger streben auch globale Klimafolgenmodelle die Einbindung von regionalen Klimadaten an. Hier steht dann die Konsistenz mit globalen Datensätzen im Vordergrund, die dort verwendet werden, wo RCM-Daten nicht zur Verfügung stehen. Diese Konsistenz ist wichtiger als die höhere Auflösung, die bisher für die meisten globalen Klimafolgenmodelle ohnehin oberhalb der RCM-Auflösung liegt. Im selben Zusammenhang hinterfragen andere Nutzer den Nutzen von RCMs in globalen Klimafolgenmodellen, wenn eine Hochskalierung der RCM-Daten erforderlich ist. Zusammenfassend lässt sich über alle erwähnten Nutzergruppen hinweg feststellen, dass es einer besseren Kommunikationsstrategie der RCM-Community bedarf, um einerseits neue Nutzergruppen zu erschließen, als auch Vorbehalten in existierenden Nutzergruppen zu begegnen.

5 Zusammenfassung

Die Abschätzung der sozioökonomischen Folgen des Klimawandels ist ein wichtiger Schritt, um Entscheidungsgrundlagen für Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft bereitzustellen und als Gesellschaft dem Klimawandel zu begegnen. Das Spektrum der Methoden, als auch der Analysen reicht dabei von der Ableitung einfacher sozioökonomisch relevanter Klimaindizes, über die empirisch-statistische Verschneidung von Wetter- und Klimadaten mit sozioökonomischen Größen, bis zur komplexen Modellierung von Ökonomien unter Klimawandel.

Wie der obige Überblick eindeutig zeigt, hat die regionale Klimamodellierung schon eine gewisse Verankerung in der sozioökonomischen Klimafolgenforschung erfahren. Die Verankerung ist dabei am stärksten im Energie- und Wassersektor und in der Forst- und Landwirtschaft ausgeprägt, wobei die größte Praxisnähe im Energie- und Wassersektor gegeben ist. Dort ist dementsprechend die Einrichtung eines operationalisierten Service im Rahmen von C3S am weitesten fortgeschritten. Ebenso wird in anderen

Bereichen, wie in der Land- und Forstwirtschaft und dem Tourismus- und Gesundheitssektor, an einem operationalisierten Service durch C3S gearbeitet, wobei hier der Fokus aber eher auf physikalischen Klima-Indikatoren liegt und eine sozioökonomische Abschätzung (noch) nicht geplant ist. Gleichzeitig basiert ein großer Teil der Forschung zur (über)regionalen Klimafolgenforschung bisher nur auf dem Output von globalen Klimamodellen. Einige Gründe dafür wurden oben schon zusammengefasst, weitere könnten in der zeitlichen und umfassenden Verfügbarkeit von einem Ensemble an relevanten regionalen Klimamodellsimulationen begründet sein. Da die Modellkette für eine sozioökonomische Klimafolgenabschätzung lang und zeitaufwendig ist, und die Zeitspanne zwischen Bereitstellung neuer CMIP-Läufe und der Veröffentlichung der nächsten IPCC-Reporte knapp bemessen ist, könnten nötige Puffer zur Integration der regionalen Klimamodelle in die Modellkette fehlen.

In Zukunft ist von einer zunehmenden Bedeutung hinsichtlich der Abschätzung sozioökonomischer Klimafolgen auszugehen. Zum einen werden bestehende Analysen mit neuen Simulationszyklen verbessert und erweitert, zum anderen werden neue Bereiche zum Beispiel zu indirekten Klimafolgenabschätzungen an Bedeutung gewinnen. Die hochauflösende Klimamodellierung wird hierzu einen grundlegenden und fortwährenden Beitrag leisten können. Dazu muss der Nutzerkreis von regionalen Klimamodell-daten stetig erweitert werden. Als Mittel konnten hier zum einen eine intensivere Kommunikationsstrategie zu potentiellen Nutzern, als auch die direkte Einbindung von Mediatoren identifiziert werden, die eine Brücke zwischen der Klimaforschung und der Sozioökonomie schlagen können.

Literatur

- ADELPHI, PRC, EURAC, 2015: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. *Climate Change* **24/2015**, Dessau-Roßlau.
- ALFIERI, L. et al., 2015: Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change* **35**, 199-212.
- APCC, 2018: Österreichischer Special Report Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 340 Seiten, ISBN 978-3-7001-8427-0.
- CHIMANI, B. et al., 2016: ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien, online verfügbar unter: <https://data.ccca.ac.at/dataset/endbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01>, zuletzt geprüft am 05.02.2021.
- CISCAR, J. C. et al., 2018: Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project. Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2760/93257.
- DAMM, A. et al., 2017: Impacts of + 2 °C global warming on electricity demand in Europe. *Climate Services* **7**, 12-30.
- HANEWINKEL, M. et al., 2012: Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change* **3** (3), 203-207.
- IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y. O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., White L. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–32.
- KÖLLNER, P., GROSS, C., SCHÄPPI, B., FÜSSLER, J., LERCH, J., NAUSER, M., 2017: Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. *Umwelt-Wissen* **1706**, 148 Seiten.
- PIK, FUB, UK, IAWG, 2011: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft; Studie im Auftrag des GDV. Online verfügbar unter: <https://www.gdv.de/resource/blob/22788/9592d3b10a654371f6ae6ba44e9a17be/publikation-auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-schadenssituation-in-der-deutschen-versicherungswirtschaft-data.pdf>, zuletzt geprüft am 05.02.2021.
- PRÖBSTL-HAIDER, U., LUND-DURLACHER, D., OLEFS, M., PRETTENTHALER, F., 2020: Tourismus und Klimawandel; Österreichischer Special Report Tourismus und Klimawandel (SR19), Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 258 Seiten, doi: 10.1007/978-3-662-61522-5.
- QUIROGA, S., SUÁREZ, C., 2016: Climate change and drought effects on rural income distribution in the Mediterranean: a case study for Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **16** (6), 1369-1385.
- SIMPSON, M. C. et al., 2008: Climate change – adaptation and mitigation in the tourism sector: frameworks, tools and practices. UNEP, University of Oxford, UNWTO, WMO, Paris.

Autor

DR. TOBIAS GEIGER
Deutscher Wetterdienst
Reginales Klimabüro Potsdam
Güterfelder Damm 87-91
14532 Stahnsdorf
tobias.geiger@dwd.de

S. KOTLARSKI, A. M. FISCHER, A. M. HAMA, A. BURGSTALL

14 Nationale Klimaszenarien und ihre Anwendung: Die Schweiz

National climate scenarios and their application: The case of Switzerland

Zusammenfassung

Als Alpenland ist die Schweiz in besonderem Maße vom vergangenen und zukünftigen Klimawandel betroffen. Bereits heute sind deutliche Auswirkungen zu spüren und erfordern Anpassungen in einer Vielzahl von Sektoren. Umso wichtiger ist es, die zukünftige Entwicklung des Klimas in der Schweiz abzuschätzen und mögliche Anpassungsoptionen wissenschaftlich fundiert beurteilen und umsetzen zu können. Vor diesem Hintergrund und als zentrale Grundlage der Schweizer Anpassungsstrategie wurde im November 2018 die dritte Generation nationaler Schweizer Klimaszenarien – die „Schweizer Klimaszenarien CH2018“ – veröffentlicht. Die CH2018-Szenarien bieten ein umfassendes Bild der Klimazukunft der Schweiz und dokumentieren zudem detailliert den seit dem Start systematischer Klimamessungen in der Schweiz bereits erfolgten Klimawandel. Sie sind ein nach wissenschaftlichen Kriterien erarbeitetes Gemeinschaftswerk und dadurch in der Schweizer Klimaforschungs- und Klimafolgenlandschaft breit abgestützt. Sie integrieren unter anderem auch die in der Schweiz vorhandene Expertise in der regionalen Klimamodellierung. Auf Nutzerebene bilden die CH2018-Szenarien einen Themenschwerpunkt des *National Centre for Climate Services (NCCS)*, dem Netzwerk des Bundes für Klimadienleistungen. Sie sind die aktuelle Referenz zur Beurteilung von Klimafolgen und zur Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen in der Schweiz. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die CH2018-Szenarien, ihren wissenschaftlichen Hintergrund, ihre Hauptergebnisse sowie ihre derzeitige und zukünftige Anwendung in der Praxis.

Summary

The climate of Switzerland is changing, and major impacts are already apparent across a range of sectors. Against this background and in order to assess possible adaptation options, robust and trustworthy information on future climatic changes at national scale is required. Such information is now provided by the CH2018 Climate Scenarios for Switzerland that have been released in November 2018. The CH2018 scenarios represent the third generation of national Swiss reference scenarios and are the backbone of the Swiss adaptation strategy. They provide a comprehensive picture of the future Swiss climate, and also document past climatic changes at national scale since the start of systematic measurements in the 19th Century. The CH2018 scenarios have been produced as a collaborative project and, as such, are broadly supported by the Swiss climate and climate adaptation community. Among others they integrate the expertise of Swiss research institutions in regional climate modelling. From a user's perspective, the CH2018 scenarios represent a topical focus of the *National Centre for Climate Services (NCCS)*, the Swiss federal network for the provision of climate services. They serve as a national climatic reference for the assessment of climate change impacts and the development of adaptation strategies in Switzerland. This contribution provides an overview on the CH2018 scenarios, their scientific background, their main results as well as their current and future applications in practice.

1 Regionale Klimamodellierung in der Schweiz

Im Gegensatz zu den größeren Nachbarstaaten ist die regionale Klimamodellierung in der Schweiz auf einige wenige Universitäten und Forschungsinstitutionen beschränkt, und umso stärker in einen internationalen und europäischen Kontext eingebunden. Als Entwickler und Anwender des Regionalmodells COSMO-CLM und als aktive Mitglieder

der CLM-Community (*Climate Limited-area Modelling-Community*) nehmen dabei die ETH Zürich und das dort angesiedelte *Center for Climate Systems Modeling (C2SM)* eine Hauptrolle ein. Die zugehörigen Forschungsschwerpunkte liegen auf der Analyse regionaler Wasserkreisläufe im Alpenraum, auf der Beschreibung von Landoberflächen-Atmosphäre-Interaktionen, auf der Abbildung von Extremen und ihrer Veränderungen im Zuge des globalen

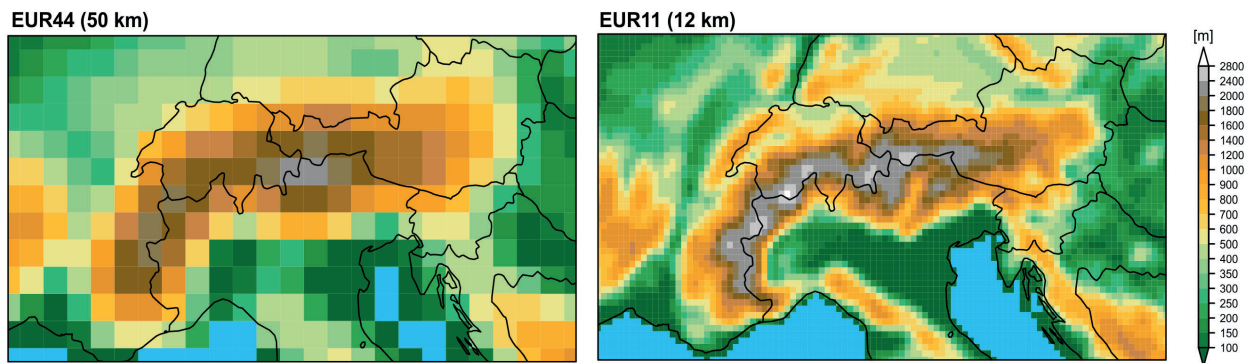


Abb. 14-1: Orographie [m] des regionalen Klimamodells COSMO-CLM im EURO-CORDEX-Setup. Links: EUR44 (circa 50 km Gitterzellauflösung), rechts: EUR11 (circa 12 km Gitterzellauflösung).

Klimawandels, sowie auf der Quantifizierung der internen Klimavariabilität auf regionaler Skala. Regionale Klimamodelle werden außerdem an einer kleinen Zahl weiterer Schweizer Forschungsinstitute betrieben, unter anderem an der Universität Bern (WRF - *Weather Research and Forecasting Model*; Forschungsschwerpunkte Paläoklimatologie, Windextreame, Wetterlagen), an der EPFL Lausanne (WRF; Forschungsschwerpunkte alpine Prozessstudien und Stadtklima) und an der Empa (COSMO-CLM; Forschungsschwerpunkte Luftqualität und Stadtklima). Der nationale Wetter- und Klimadienst – das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz – betreibt kein eigenes regionales Klimamodell, nimmt jedoch über enge Kollaborationen insbesondere mit dem C2SM sowie über Zusammenarbeiten im D-A-CH-Raum an der Entwicklung und Anwendung von COSMO-CLM teil.

Gemeinsamer Nenner der regionalen Klimamodellierungsaktivitäten in der Schweiz ist der Anspruch, die Komplexität regionaler Klimate im Alpenraum zu erfassen. Diese ist vor allem Folge der komplexen Topographie und Oberflächenbeschaffenheit der Alpen, deren klimatische Einflüsse nur durch relativ hohe räumliche Modellauflösungen zu erfassen sind. Selbst die gegenüber globalen Klimamodellen hoch aufgelösten Regionalmodelle stoßen hier an ihre Grenzen. Abbildung 14-1 zeigt beispielhaft die Darstellung der alpinen Topographie in den beiden Standardauflösungen der regionalen Klimasimulationen der EURO-CORDEX-Initiative (<https://www.euro-cordex.net>). Während alpine Strukturen in der gröberen 50 km Auflösung nur ansatzweise erfasst und Höhenlagen über 2000 m kaum abgebildet sind (links), erlaubt die vierfach höhere Auflösung von 12 km eine deutlich bessere Beschreibung der orographischen Variabilität (rechts). Jedoch sind auch in dieser hohen Auflösung viele Strukturen nicht oder nur angenähert abgebildet, so zum Beispiel inneralpine Talzüge oder Höhenlagen über 3000 m. Die Variabilität regionaler Klimate des Alpenraums und die zugrundeliegenden Phänomene und Prozesse (regionale Zirkulationsstrukturen, kleinskalige Konvektion, thermische Windsysteme, Föhnwinde, Inversionen, hochgelegene Schnee- und Eisflächen

usw.) können deshalb in vielen Fällen nur unzureichend beschrieben werden. Noch höhere räumliche Auflösungen im konvektionsauflösenden Kilometer-Bereich sind aus diesen Gründen prinzipiell anzustreben und stellen in der Tat einen weiteren Forschungsschwerpunkt der ETH Zürich und des C2SM dar (z. B. BAN et al. 2014, BAN et al. 2018).

2 Die CH2018-Klimaszenarien und das NCCS

Als Alpenland ist die Schweiz in besonderem Maße vom vergangenen und zukünftigen Klimawandel betroffen. Seit Beginn systematischer Temperaturmessungen im Jahr 1864 ist die Jahresmitteltemperatur in der Schweiz um etwa 2 °C angestiegen (basierend auf einem linearen Trend der Jahresmitteltemperaturen; siehe BEGERT et al. 2018). Dies entspricht in etwa dem Doppelten der globalen Erwärmung im gleichen Zeitraum. Neben der mittleren Lufttemperatur zeigt eine große Zahl weiterer Klimaindikatoren in der Schweiz bereits heute deutliche Trends. So treten Hitzewellen immer häufiger auf und sind intensiver, Kälteperioden gibt es immer seltener. Je nach Landesteil hat sich die Vegetationsperiode um 2 bis 4 Wochen verlängert. Die Nullgradgrenze ist um 300 bis 400 m angestiegen, mit deutlichen Konsequenzen für die Schnee- und Eisbedeckung. Die Anzahl an Schneetagen hat sich insbesondere in tiefergelegenen Gebieten merklich reduziert und Gletscherflächen und –volumina haben markant abgenommen. Die winterlichen Niederschlagssummen sind angestiegen, während Starkregenereignisse häufiger auftreten und intensiver geworden sind (CH2018 2018).

Diese beobachteten klimatischen Veränderungen zeigen bereits heute deutliche Auswirkungen und erfordern Anpassungen in einer Vielzahl von Bereichen. Umso wichtiger ist es, auch die zukünftige Entwicklung des Klimas in der Schweiz abschätzen und mögliche Anpassungsoptionen wissenschaftlich fundiert beurteilen und umsetzen zu können. Vor diesem Hintergrund hat der Bundesrat in der Schweiz im Jahr 2012 den ersten Teil seiner Strategie zur Anpassung an den Klimawandel verabschiedet

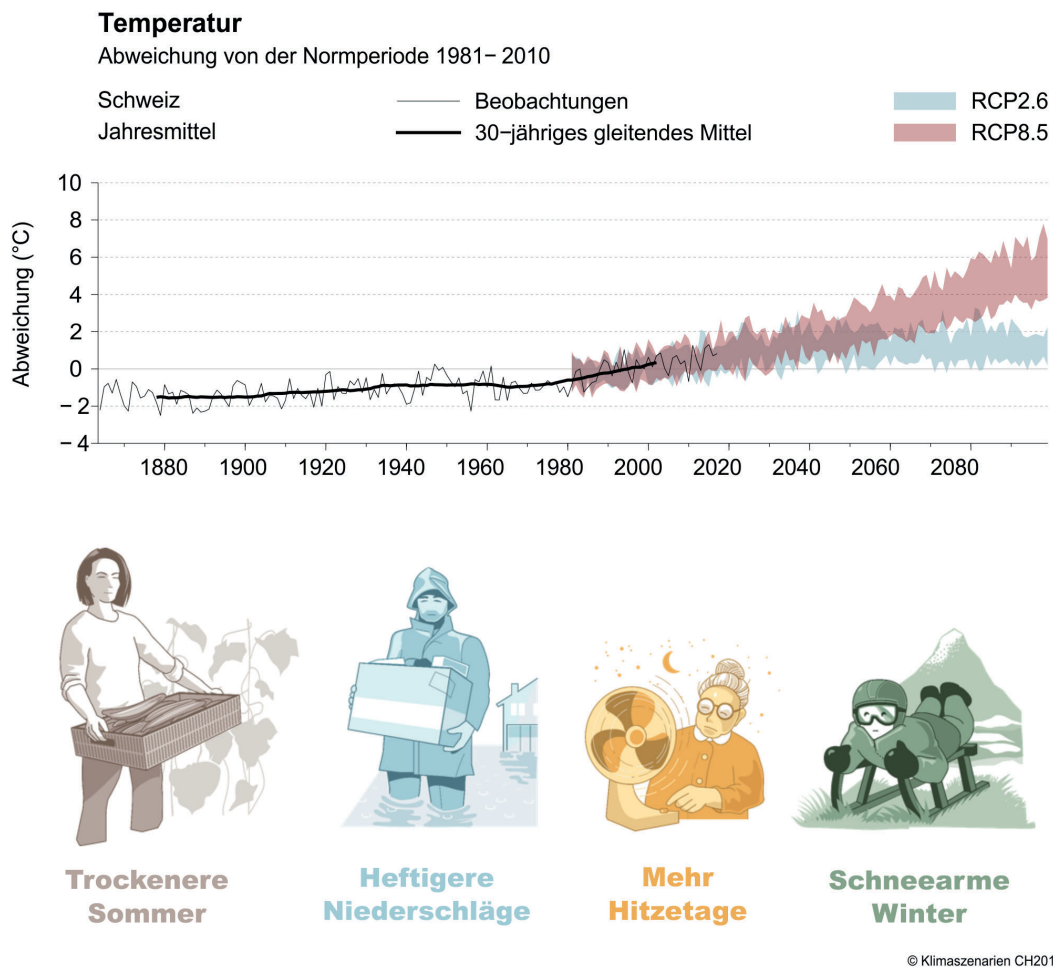


Abb. 14-2: Hauptergebnisse der CH2018-Klimaszenarien. Oben: Vergangene und zukünftige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in der Schweiz; zukünftige Entwicklung als Multimodell-Unsicherheitsbereich für die Emissionsszenarien RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot). Unten: Weitere Kernbotschaften aus den Klimaszenarien CH2018 dargestellt in Kombination mit den in der CH2018 Kommunikation verwendeten Beispielcharakteren (NCCS 2018).

(BAFU 2012). Er formuliert darin Ziele und Grundsätze für die Klimaanpassung und beschreibt die größten sektorübergreifenden Herausforderungen bei der Anpassung auf Bundesebene. Der darauffolgende zweite Teil der Strategie zeigt im Rahmen zweier Aktionspläne auf, wie die Schweiz ihre Anpassungsziele erreichen und die Herausforderungen bewältigen will (BAFU 2014, BAFU 2020). Mit konkreten Maßnahmen sollen die Chancen des Klimawandels genutzt, die Risiken minimiert und die Anpassungsfähigkeit von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt gesteigert werden.

Zentraler Teil der Schweizer Klimaanpassungsstrategie ist die regelmäßige Berechnung und Bereitstellung nationaler Klimaszenarien, basierend auf dem jeweils aktuellsten Stand der Klimaforschung. MeteoSchweiz koordiniert diese Aufgabe in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft. In jüngerer Vergangenheit gab es in den Jahren 2007 (CH2007; OcCC, PROCLIM 2007) und 2011 (CH2011; CH2011 2011) bereits zwei Generationen solcher Referenzszenarien, wobei insbesondere die CH2011-Szenarien auch konkrete Datensätze zum zukünftigen Klimawandel in der Schweiz umfassten und eine weite Verbreitung in

Forschung und Praxis fanden. Im November 2018 wurde die dritte und damit neueste Generation Schweizer Klimaszenarien – die „Schweizer Klimaszenarien CH2018“ – veröffentlicht (CH2018 2018). Diese sind die zentrale Grundlage des dritten Teils der Schweizer Anpassungsstrategie, der im August 2020 erschienen ist (BAFU 2020).

Die Klimaszenarien CH2018 zeigen ein umfassendes Bild der Klimazukunft der Schweiz und dokumentieren zudem detailliert den seit dem Start systematischer Klimamessungen bereits erfolgten Klimawandel. Sie wurden als gemeinsames Projekt der MeteoSchweiz, der ETH Zürich, des C2SM, der Universität Bern und von ProClim durchgeführt und sind damit in der Schweizer Klimaforschungs- und Klimafolgenlandschaft breit abgestützt. Die Erstellung nationaler Klimaszenarien stellt weiterhin einen Themenschwerpunkt des *National Centre for Climate Services* (NCCS) dar. Das im Jahre 2015 gegründete NCCS ist das Netzwerk des Bundes für Klimadienstleistungen. Mit der Bündelung, Erarbeitung und Verbreitung von nutzerorientierten Klimadienstleistungen und der Förderung des Dialogs zwischen allen relevanten Akteuren unterstützt das

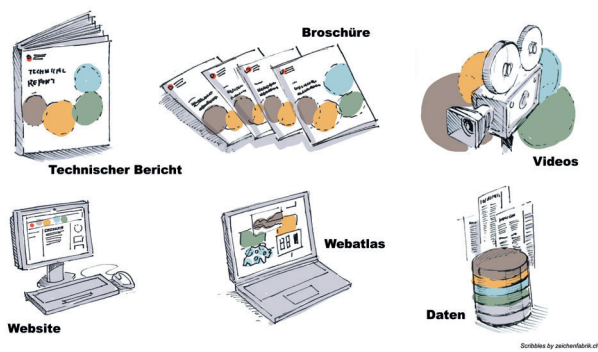


Abb. 14-3: Übersicht der CH2018-Produkte, erhältlich über www.klimaszenarien.ch.

NCCS als nationales Koordinations- und Innovationsorgan sowie als Wissensdrehscheibe klimakompatible Entscheidungsfindungen im Klimaschutz und der Anpassung an den Klimawandel (siehe auch <http://www.nccs.ch>).

Grundlage von CH2018 sind die regionalen Klimasimulationen der EURO-CORDEX Initiative (JACOB et al. 2014). Diese wurden zunächst einer umfassenden Validierung für den Alpenraum unterzogen und anschliessend hinsichtlich einer Vielzahl von Klimaparametern und -indizes unter expliziter Berücksichtigung der Projektionsunsicherheiten ausgewertet. Mit den *representative concentration pathways* (RCPs) 2.6, 4.5 und 8.5 wurden drei alternative Szenarien der zukünftigen globalen Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Wichtige Komponente der CH2018-Szenarien ist die statistische Nachbearbeitung der rohen Simulationsdaten im Sinne einer Fehlerkorrektur und eines zusätzlichen Downscalings auf die lokale Skala (FEIGENWINTER et al. 2018). Einige der Hauptergebnisse von CH2018 sind in Abbildung 14-2 zusammengefasst: Die Schweiz hat sich auf weiterhin steigende Temperaturen einzustellen. Je nach Emissionsszenario wird dieser Temperaturanstieg bis Ende des Jahrhunderts und im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 zwischen 0,6 bis 1,9 °C (RCP2.6) und 3,3 bis 5,5 °C (RCP8.5) betragen. Weitere robuste Klimaänderungssignale sind das häufigere Auftreten sommerlicher Dürreperioden, die Zunahme von Häufigkeit und Intensität von Extremniederschlägen, eine vor allem in tiefer gelegenen Regionen zunehmende Hitzebelastung sowie der Rückgang der Schneefallmengen und der winterlichen Schneebedeckung. Ein Vergleich der Resultate für die einzelnen Emissionsszenarien zeigt zudem das Potential globaler Klimaschutzmaßnahmen: Mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6, d. h. Einhaltung des Pariser 2-Grad-Ziels) ließen sich gegenüber einem Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen (RCP8.5) in der Schweiz bis Mitte des 21. Jahrhunderts circa die Hälfte, bis Ende des Jahrhunderts etwa zwei Drittel der möglichen Klimaveränderungen vermeiden (NCCS 2018).

Abbildung 14-3 gibt einen Überblick der CH2018-Produktlandschaft, die in Umfang und Detailgrad deutlich über diejenige der beiden vorherigen Szenario-Generationen CH2007 und CH2011 hinausgeht. Zu Beginn ihrer Entwicklung wurde eine großangelegte Nutzerbefragung

durchgeführt, die wertvolle Informationen zu Nutzergruppen und ihren spezifischen Bedürfnissen (qualitative oder quantitative Information, abzudeckende Klimaparameter, zeitlicher und räumlicher Detailgrad, Datenformate etc.) lieferte (METEOSCHWEIZ 2016). Die resultierende CH2018-Produktlandschaft berücksichtigt diese Bedürfnisse soweit wie möglich und umfasst neben dem ausführlichen Technischen Bericht (CH2018 2018) unter anderem eine mehrsprachige Broschüre, die die wesentlichen Erkenntnisse in illustrativer Form für Anwender aus der Praxis zusammenfasst. Auch die Informationen der Webseite sind vorwiegend für Anwender aus der Praxis aufbereitet. Auf www.klimaszenarien.ch finden Nutzende Zugang zu regionalisierten und lokalen Klimainformationen sowie eine Reihe von Hintergrundinformationen und Erklär-Videos. Über die CH2018-Webseite, einem Teilbereich der Webplattform des NCCS, gelangt man zudem zum Webatlas mit seinen mehreren Tausend Grafiken, die den zukünftigen Klimawandel in der Schweiz mittels einer Vielzahl von Abbildungsformaten illustrativ beschreiben und mit jeweils direkt verlinkten Datensätzen quantifizieren. Weiteres Kernelement der CH2018-Produktlandschaft sind Datensätze für sogenannte Intensivnutzer aus Forschung und Praxis. Bei diesen Daten handelt es sich um transiente tägliche Zeitreihen (1981-2099) mehrerer Klimaparameter für insgesamt 68 Klimamodellsimulationen, herunterskaliert auf Stationsebene sowie auf ein regelmäßiges schweizweites Gitter mit 2 km Maschenweite. Die Anwendung dieser komplexen Datensätze erfordert ein gewisses Know-How und eine engere Begleitung der Nutzer. Sie sind aus diesem Grunde nicht direkt als Download verfügbar, sondern können über einen einfachen Bestell-Prozess angefordert werden, was einen direkten Kontakt von Klimaszenario-Produzenten und Klimaszenario-Anwendern sicherstellt. Alle CH2018-Datensätze werden unter der CC-BY-4.0 Lizenz abgegeben. Diese beinhaltet unter anderem die Berechtigung, die Daten weiter zu verteilen, sie weiterzuentwickeln und sie frei zu verwenden (auch für kommerzielle Anwendungen).

3 Anwendung der CH2018-Szenarien

Als wichtiges Element der Schweizer Strategie zur Anpassung an den Klimawandel stellen die CH2018-Szenarien die aktuelle Referenz zur Beurteilung von Klimafolgen und zur Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen in der Schweiz auf verschiedenen Ebenen (Bund, Kantone, Gemeinden) dar. Dies betrifft eine Vielzahl von Sektoren und potentiellen Szenario-Nutzern, von der Klima- und Klimawirkungs-Forschung über private Klimadienstleister bis hin zur öffentlichen Verwaltung. Einige Nutzergruppen wurden über einen beratenden Ausschuss als Teil der CH2018-Organisation bereits direkt in die Erarbeitung der CH2018-Szenarien eingebunden. Die Bedürfnisse weiterer Nutzergruppen wurden im Rahmen der vorge-schalteten Nutzerbefragung abgeklärt und sind in die Erarbeitung eingeflossen. Zudem hatten einzelne Nutzer bereits vor der offiziellen Veröffentlichung der Szenarien

die Möglichkeit, Prototyp-Datensätze zu testen, Feedback dazu zu geben und dadurch ihre internen Prozessierungsketten auf die endgültigen Szenarien vorzubereiten und zu optimieren.

Zwei Jahre nach der Veröffentlichung von CH2018 zeigt sich bereits eine breite Anwendung der Klimaszenarien in einer Vielzahl von Sektoren und auf verschiedenen Ebenen, sowie ein unvermindert starkes Interesse an Informationsveranstaltungen zur Klimazukunft der Schweiz. Derzeit (Stand Dezember 2020) haben mehr als 100 Nutzer einen Zugang zu den Szenarien für Intensivnutzer erhalten, darunter auch mehrere Multiplikatoren, die einzelne Datensätze innerhalb ihrer jeweiligen Organisation weiterverteilen. Erste wissenschaftliche Publikationen unter Verwendung der CH2018-Szenarien sind bereits in Fachzeitschriften veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung eingereicht (z. B. JOUVET und HUSS 2019).

Neben einer Vielzahl von Nutzern, die CH2018 weitgehend unabhängig voneinander verwenden (z. B. Downloads von Grafiken und Daten über den Webatlas), sind inzwischen auch eine Reihe von größer angelegten Programmen entstanden, die Klimafolgen und das Potential möglicher Anpassungsmaßnahmen in der Schweiz auf koordinierte Art und Weise abschätzen. So bilden die Klimaszenarien CH2018 auch die Grundlage für die zweite Phase des Pilotprogramms zur Anpassung an den Klimawandel (<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak.html>), welches Anfang 2019 startete. Das Pilotprogramm unterstützt innovative Vorhaben der Kantone, Regionen, Städte und Gemeinden. Es zeigt, wie die Schweiz sich konkret an das veränderte Klima anpassen kann. Die beispielhaften Projekte dienen dazu, Klimarisiken vor Ort zu minimieren, die Anpassungsfähigkeit zu steigern und Chancen zu nutzen. Die zweite Programmphase umfasst 50 Projekte zu sechs Themen in verschiedensten Regionen der Schweiz. An der Umsetzung der Projekte sind über 500 Personen aus staatlichen und privaten Organisationen beteiligt. Ergebnisse sollen bis Ende 2022 vorliegen.

Ebenfalls dienen die Klimaszenarien CH2018 als Grundlage für eine Reihe von weiteren Themenschwerpunkten des NCCS. So werden beispielsweise momentan die Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft der Schweiz erarbeitet (Themenschwerpunkt „Hydro-CH2018“). Ziel ist es, die notwendigen hydrologischen Grundlagen zur Anpassung zur Verfügung zu stellen. Dieses Projekt läuft unter der Leitung der Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und in Zusammenarbeit mit den führenden Forschungsinstitutionen und wird im Herbst 2020 veröffentlicht werden. Daraus leiten sich wichtige Klimadienleistungen im Bereich Wasser ab, welche wissenschaftlich korrekt und verständlich aufbereitet die nötige Grundlage für Entscheidungsträger im Bereich Wasserwirtschaft bieten.

Unter dem Dach des NCCS befinden sich derzeit zudem mehrere sektorübergreifende Projekte zu Klimafolgen in der Schweiz in Planung. Basierend auf den Klimaszenarien CH2018 sollen

diese Projekte anwenderorientierte Herausforderungen zum Thema Klimafolgen behandeln. Neben einer klimatologischen Betrachtungsweise sollen auch verstärkt sozio-ökonomische Fragestellungen bearbeitet und miteinander gekoppelt werden.

4 Perspektiven

Die CH2018-Klimaszenarien stellen eine Vielzahl an Produkten zur Verfügung und finden eine breite Anwendung in Forschung und Praxis. Im laufenden Dialog mit den Nutzern wird jedoch auch klar, dass noch nicht alle Bedürfnisse abgedeckt sind. Zudem erfordern einige prinzipiell mögliche Anwendungen zunächst eine dedizierte Validierung der verwendeten Szenario-Produkte. Dies gilt insbesondere für die fehlerkorrigierten Zeitreihen auf lokaler Skala, die mit einer Reihe von Limitierungen verbunden sind. Eine möglichst enge fachliche Begleitung der Intensivnutzer ist daher von zentraler Bedeutung. Hinsichtlich noch nicht abgedeckter Bedürfnisse sind derzeit mehrere Erweiterungen der CH2018-Szenarien geplant bzw. bereits in Arbeit. Unter anderem handelt es sich hierbei um folgende Aspekte:

- Stündliche Szenarien: Einige Szenario-Anwendungen erfordern transiente zukünftige Klimazeitreihen in stündlicher Auflösung, die für verschiedene Klimagrößen zudem konsistent untereinander sein sollten. Das derzeitige Set an CH2018-Szenario-Produkten stellt allerdings nur Informationen in maximal täglicher Auflösung bereit und garantiert keine absolute Konsistenz zwischen einzelnen Klimagrößen. Betroffene Sektoren sind zum Beispiel die Hydrologie oder die Ableitung zukünftiger Normen für den Schweizer Gebäudepark. In einem laufenden Projekt wird untersucht, in welchem Umfang die derzeitigen CH2018-Produkte um stündliche Informationen erweitert werden können.
- Änderungssignale von Klimaextremen: Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Szenario-Generationen CH2007 und CH2011 bieten die CH2018-Szenarien quantitative Informationen zur zukünftigen Änderung von Klimaextremen. Diese Informationen sind allerdings in der Regel mit großen Unsicherheiten verbunden und ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse soll helfen, diese Unsicherheiten zu reduzieren. Konkret wird derzeit auf verschiedenen Ebenen an einer prozessbasierten Evaluierung der Darstellung von Klimaextremen in den zugrundeliegenden EURO-CORDEX-Simulationen, sowie in den fehlerkorrigierten und herunterskalierten lokalen CH2018-Szenarien gearbeitet. Mittelfristig wird die Aufnahme neuer Klimasimulationen auf konvektionsauflösender Skala (d. h. in Kilometerauflösung) angestrebt. Diese Simulationen zeigen insbesondere bei der Beschreibung subtäglicher Niederschlagsextreme einen deutlichen Mehrwert (z. B. BAN et al. 2018).
- Wetterlagen und atmosphärische Zirkulation: Die CH2018-Szenarien bieten derzeit keine Informationen zur zukünftigen Änderung der großräumigen atmosphärischen Zirkulation. Ein besseres Verständnis hierzu

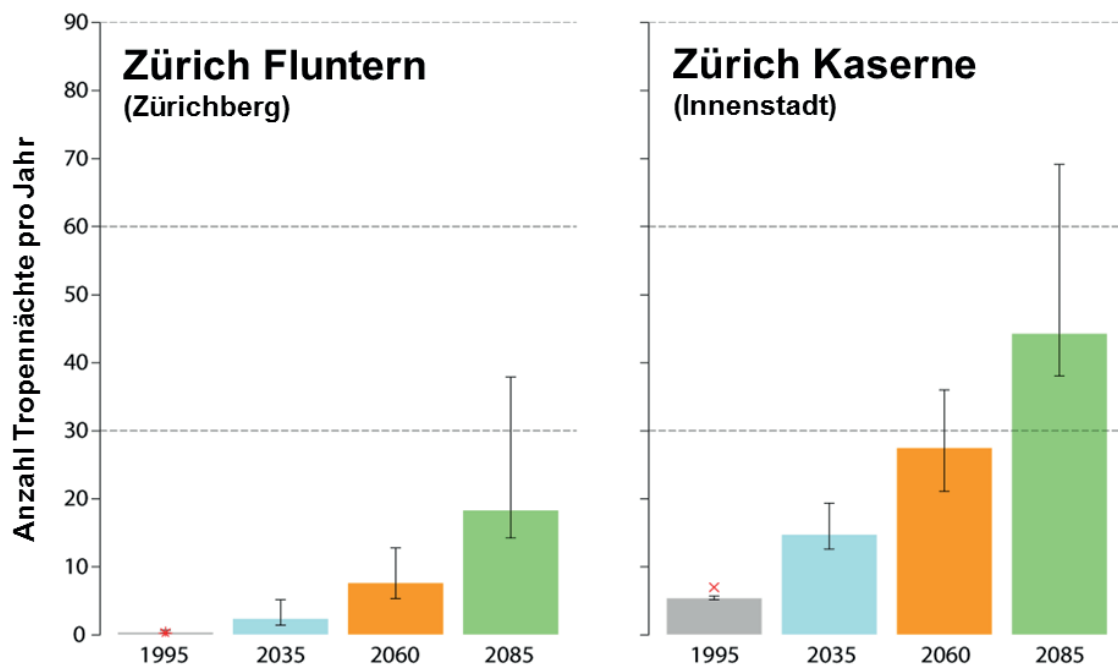


Abb. 14-4: Anzahl von Tropennächten (Tage mit einer Minimaltemperatur über 20 °C) an der Station Zürich Fluntern außerhalb des Stadtzentrums (links) und an der Station Zürich Kaserne im Stadtzentrum (rechts). Die Balken zeigen den Multimodell-Median der CH2018-Szenarien für das Treibhausgasszenario RCP8.5 mit aufgesetzten Unsicherheitsbereichen. Die Jahreszahlen kennzeichnen das zentrale Jahr der jeweiligen 30-Jahres-Periode, die roten Markierungen geben die aus Beobachtungsdaten abgeleiteten Häufigkeiten an. Quelle: BURGSTALL (2019).

würde eine verstärkt prozessbasierte Interpretation der CH2018-Resultate ermöglichen und wird von vielen Nutzern nachgefragt. Während die Abbildung von Wetterlagen in den antreibenden globalen Klimasimulationen der EURO-CORDEX-Szenarien bereits in mehreren Studien untersucht wurde, fehlen solche Studien derzeit noch auf der Skala der regionalen Klimasimulationen.

- **Klimaanaloge:** Ein potentiell wichtiges und illustratives Kommunikationsinstrument sind sogenannte Klimaanaloge, das heißt Orte, die bereits heute ein ähnliches Klima aufweisen, wie wir es in Zukunft für die Schweiz erwarten. Erste Analysen, die bereits Teil des CH2018 Technischen Berichtes (CH2018 2018) sind, deuten sowohl eine zukünftige Verlagerung des Schweizer Klimas in den Mittelmeerraum an, als auch eine Verlagerung des Klimas von Gebirgsstationen in tiefere Lagen. Die Kommunikation des Klimawandels mittels Klimaanalogen soll in Zukunft verstärkt werden.
- **Szenarien für Städte:** Die vorliegenden CH2018-Szenarien berücksichtigen stadtklimatologische Effekte bisher nicht explizit, insbesondere nicht die städtische Wärmeinsel. Es sind aber vor allem die Stadtgebiete, in denen zunehmender Hitzestress ein wesentliches Klima- und Gesundheitsrisiko darstellt. Erste Arbeiten zur Ableitung von Klimaszenarien in Stadtgebieten auf Grundlage der CH2018-Szenarien und auf Basis empirischer Modelle wurden durch BURGSTALL (2019) durchgeführt und sollen in Zukunft vertieft werden. Abbildung 14-4 zeigt hieraus einen Vergleich der heutigen und der zukünftig erwarteten Häufigkeit von Tropennächten am Züricher Stadtrand (Zürich Fluntern) und im Innenstadtdistrikt (Zürich Kaserne). Die innerstädtische Lage zeichnet sich

sowohl im heutigen als auch im zukünftigen Klima durch eine weitaus größere Hitzebelastung aus, die vor allem durch die verminderte nächtliche Abkühlung ein erhebliches Gesundheitsrisiko für die städtische Bevölkerung birgt.

- **Ensemblereduktion:** Nutzern der lokalen CH2018-Szenarien werden derzeit alle 68 verfügbaren Klimamodellketten angeboten und nur qualitative Hilfestellungen zur sinnvollen Auswahl eines reduzierten aber dennoch repräsentativen Teil-Ensembles. Methoden zur Ensemblereduktion, wie vom Deutschen Wetterdienst (DWD) beispielsweise bereits zur Ableitung seines Klimaszenarien-Kern-Ensembles angewandt, sollen hier in Zukunft Abhilfe schaffen und den Nutzern konkrete repräsentative Teil-Ensembles zur Verfügung stellen.

Sämtliche Erweiterungen der CH2018-Szenarien werden dabei im Hinblick auf ihre Anwendung in zukünftigen Szenario-Generationen entwickelt. Ein wichtiger Punkt hierbei ist der regelmäßige Austausch mit Klimadienstleistern im benachbarten Ausland, insbesondere der Austausch unter den drei D-A-CH Wetterdiensten DWD, ZAMG und MeteoSchweiz. Konkret werden derzeit Ansätze zur Erstellung gemeinsamer Klimaszenarien für den D-A-CH-Raum evaluiert, die in vielen Fällen einen Mehrwert gegenüber rein nationalen Szenarien versprechen.

Literatur

- BAFU, 2012: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz - Ziele, Herausforderungen und Handlungs-

- felder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Schweizerische Eidgenossenschaft, 64 S., online verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-2012.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2021.
- BAFU, 2014: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz - Aktionsplan 2014-2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 100 S., online verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-2014.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2021.
- BAFU, 2020: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz - Aktionsplan 2020-2025. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 164 S., online verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-aktionsplan-2020-2025.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2021.
- BAN, N., SCHMIDLI, J., SCHÄR, C., 2014: Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **119**, doi: 10.1002/2014JD021478.
- BAN, N., RAJCZAK, J., SCHMIDLI, J., SCHÄR, C., 2018: Analysis of Alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations. *Climate Dynamics* **55**, doi: 10.1007/s00382-018-4339-4.
- BEGERT, M., STÖCKLI, R., CROCI-MASPOLI, M., 2018: Klimaentwicklung in der Schweiz - Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. *Fachbericht MeteoSchweiz* **274**, 1-31.
- BURGSTALL, A., 2019: Representing the Urban Heat Island Effect in Future Climates. Master Thesis. Institute of Geography, University of Augsburg and Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich.
- CH2011, 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC, Zürich, Schweiz, online verfügbar unter: <https://www.ch2011.ch/>, zuletzt geprüft am 08.02.2021.
- CH2018, 2018: CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zürich, Schweiz, online verfügbar unter <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/technical-report.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2021.
- FEIGENWINTER, I., KOTLARSKI, S., CASANUEVA, A., FISCHER, A. M., SCHWIERZ, C., LINIGER, M. A., 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland. Technical Report MeteoSwiss 270, 1-44.
- JACOB, D., PETERSEN J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADEMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B., YIOU, P., 2014: EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* **14**, 563-578.
- JOUVET, G., HUSS, M., 2019: Future retreat of Great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology* **65**, doi: 10.1017/jog.2019.52.
- METEOSCHWEIZ, 2016: Analyse der Nutzerbedürfnisse zu nationalen Klimaszenarien. *Fachbericht MeteoSchweiz* **258**, 1-92.
- NCCS, 2018: CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich, 24 Seiten, ISBN 978-3-9525031-0-2.
- OcCC, PROCLIM, 2007: Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC / ProClim, Bern, Schweiz, online verfügbar unter: http://www.occ.ch/products/ch2050/ch2050-bericht_d.html, zuletzt geprüft am 08.02.2021.

Autoren

DR. SVEN KOTLARSKI

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Operation Center 1
8058 Zürich-Flughafen
SCHWEIZ
sven.kotlarski@meteoswiss.ch

DR. ANDREAS M. FISCHER

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Operation Center 1
8058 Zürich-Flughafen
SCHWEIZ
andreas.fischer@meteoswiss.ch

DR. ANGELA MICHIKO HAMA

Geschäftsstelle National Centre for Climate Services NCSS
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Operation Center 1
8058 Zürich-Flughafen
SCHWEIZ
michiko.hama@meteoswiss.ch

ANNKATRIN BURGSTALL

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Operation Center 1
8058 Zürich-Flughafen
SCHWEIZ
annkatrin.burgstall@meteoswiss.ch

CH. MATULLA, K. ENIGL, S. LEHNER

15 Regionale Klima- und Impactmodellierung – Beispiele mit Fokus auf dem Alpenraum

Regional climate and impact modelling – examples focusing on the Alps

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt einerseits die Anwendung der regionalen Klimamodellierung mit Fokus auf dem Europäischen Alpenraum und andererseits, wie erzielte Ergebnisse zur Unterstützung von Entscheidungsträgern bei der Planung nachhaltiger Adaptionsmaßnahmen genutzt werden können.

Summary

This contribution deals on one hand with regional climate modelling applications focusing on the European Alps and on the other hand presents how findings may be used in decision making for designing sustainable adaptation measures.

1 Einleitung

Mit der Herausgabe des *promet*-Heftes 99, das sich den Grundlagen und Methoden der regionalen Klimamodellierung widmet, wurde dem Bedarf der wissenschaftlichen Gemeinschaft Rechnung getragen, das Thema „regionale Klimamodellierung“ in gebührender Breite wie Tiefe darzustellen.

Tatsächlich ist mittlerweile offensichtlich, dass die Herausforderungen nicht nur mit (von der Klimaforschung lange ins Zentrum gerückten) Mitigationsmaßnahmen zu bewältigen sind, sondern auch der Umsetzung nachhaltiger Adaptionsstrategien bedürfen. Die Entwicklung letzterer gelingt nur auf Basis wissenschaftlich fundierter, regional detaillierter Aussagen über künftige Klimaänderungen, die in Entscheidungsprozesse (wie dem Design von Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung oder der Planung von Infrastrukturprojekten in anderen Sektoren) Eingang finden müssen, um Fehlinvestitionen und ein weiteres Anwachsen der Generationsschuld (*generation debt*) zu vermeiden.

In diesem Beitrag sollen Beispiele, deren Fokus auf dem Europäischen Alpenraum liegt, vorgestellt werden. Dabei gliedert sich der Beitrag in zwei Abschnitte. Im ersten stehen dynamische und statistische Downscalingmethoden (siehe etwa VON STORCH et al. 1993) im Zentrum. Der

zweite, knappere Teil zeigt ein Fallbeispiel, wie gewonnene Ergebnisse weiterverarbeitet werden können, um Entscheidungsprozesse zu unterstützen.

2 Anwendung und Entwicklung regionaler Klimaprojektionen: Dynamisches Downscaling und Scaled Distribution Mapping – ÖKS15

Zentrale Ziele des Projekts „ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich“ bestehen in der Aufbereitung meteorologischer Beobachtungsdatensätze und der Erzeugung von Ensembles regional-skaliger Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für verschiedene Entwicklungspfade der Menschheit (*Representative Concentration Pathways, RCPs*). Der ÖKS15-Datensatz wurde 2015/16 im Auftrag von Bund und Ländern von einem Projektkonsortium, bestehend aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), dem Wegener Center der Universität Graz für Klima und Globalen Wandel (WEGC) sowie dem interfakultären Fachbereich für Geoinformatik der Paris Lodron Universität Salzburg (ZGIS) erzeugt. In 2019 wurde der Datensatz durch Projektionen erweitert, die im Projekt „StarImpact“ generiert wurden. Die Bereitstellung des ÖKS15-Datensatzes für die Klimafolgenforschung dient dem Zweck, deren Ergebnisse besser als bisher (als bei der Verwendung verschiedener Basisdatensätze) mitei-

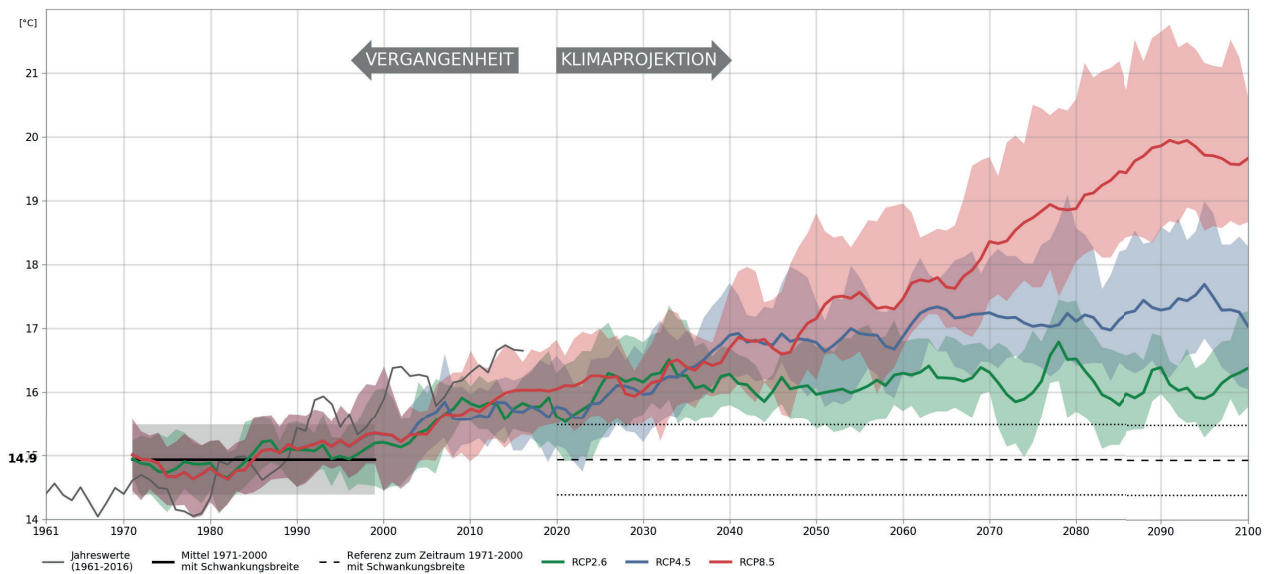


Abb. 15-1: ÖKS15-Ensemble für die mittlere Sommertemperatur (JJA) in Österreich. Beobachtungsreferenz: SPARTACUS.

einander vergleichen zu können. Die Daten liegen in täglicher Auflösung auf einem 1 x 1 km Gitter für das österreichische Terrain vor und sind über das Datenzentrum des *Climate Change Centers Austria* (CCCA¹) downloadbar. Eine detaillierte Darstellung der Methodik findet sich bei CHIMANI et al. (2016), während sich das Folgeprojekt StarImpact einer umfassenden Diskussion der Datenqualität widmet (CHIMANI et al. 2020). Die Datensätze für die Vergangenheit (ab 1971) basieren zentral auf gegitterten Beobachtungen der Temperatur, des Niederschlags, sowie der Globalstrahlung (SPARTACUS (HIEBL und FREI 2016; 2018), GPARD1 (HOFSTÄTTER et al. 2015) und STRAHLGRID (OLEFS und SCHOENER 2012)). Die Ensembles regional-skaliger Klimaprojektionen beruhen auf EUROCORDEX-Läufen, die via Interpolation und *Scaled Distribution Mapping* (SDM) von 12 km auf das 1 km Gitter übertragen werden. Projektionen für die Änderung der österreichweit gemittelten Sommertemperatur im Laufe des 21. Jahrhunderts sind in Abbildung 15-1 dargestellt.

In Abschnitt 6 dieses Beitrags werden ÖKS15-Projektionen in der Bodenseeregion mit Projektionen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Schweizer Wetterdienstes (MeteoSchweiz) verglichen.

3 Empirisch-Statistisches Downscaling

3.1 Klassifikationsverfahren – Analog-Methode

Die folgende Darstellung einer Anwendung im österreichischen Gebiet der Alpen ist Teil der als *Perfect-Prognosis* (PP) bekannten Herangehensweise und basiert auf der Ana-

log-Methode (AM). Wie für alle Empirisch-Statistischen Downscaling (ESD)-Methoden wird auch hier die fundamentale Eigenschaft vorausgesetzt, dass ermittelte Zusammenhänge zwischen großer und lokaler Skala erhalten bleiben. Der Klimawandel induziert per se Instationarität. Das bedeutet aber nicht zwingend die Verletzung des statistischen Zusammenhangs von Prozessen auf verschiedenen hochaufgelösten Skalen. Diese Annahme wurde bereits vielfach getestet und ist immer noch Gegenstand der aktuellen Forschung.

3.2 Rahmenbedingungen der Anwendung im österreichischen Raum

Die hier angewandte Variante der AM erlaubt die Berücksichtigung atmosphärischer Entwicklungen über einen definierbaren Zeitraum, sowie unterschiedliche Gewichtungen entlang dieser Sequenzen. Bei der Beschreibung der Persistenz atmosphärischer Phänomene hat sich die euklidische Norm als Ähnlichkeitsmaß gegenüber anderen Distanzmaßen als zielführend erwiesen (MATULLA et al. 2008).

Durchschnittliche Tagesniederschläge (bereitgestellt von SPARTACUS) stellen in diesem Beispiel die Prädiktanden dar. Zur Repräsentation thermodynamischer und dynamischer Eigenschaften der Atmosphäre werden die Feuchte in 700 hPa sowie der Bodendruck auf Meeressniveau verwendet. Die Zielregion Österreich wird nach MATULLA et al. (2003) (über rotierte *Empirical Orthogonal Functions* - EOFs) in drei Regionen unterteilt (Nördliches Alpenvorland, Südöstliche Beckenkette, Alpines Terrain, siehe Abb. 15-2a oder ENIGL et al. 2019). Um *Overfitting* zu verhindern und die physikalische Konsistenz der detektierten

¹ <https://data.ccca.ac.at/dataset/endbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01>

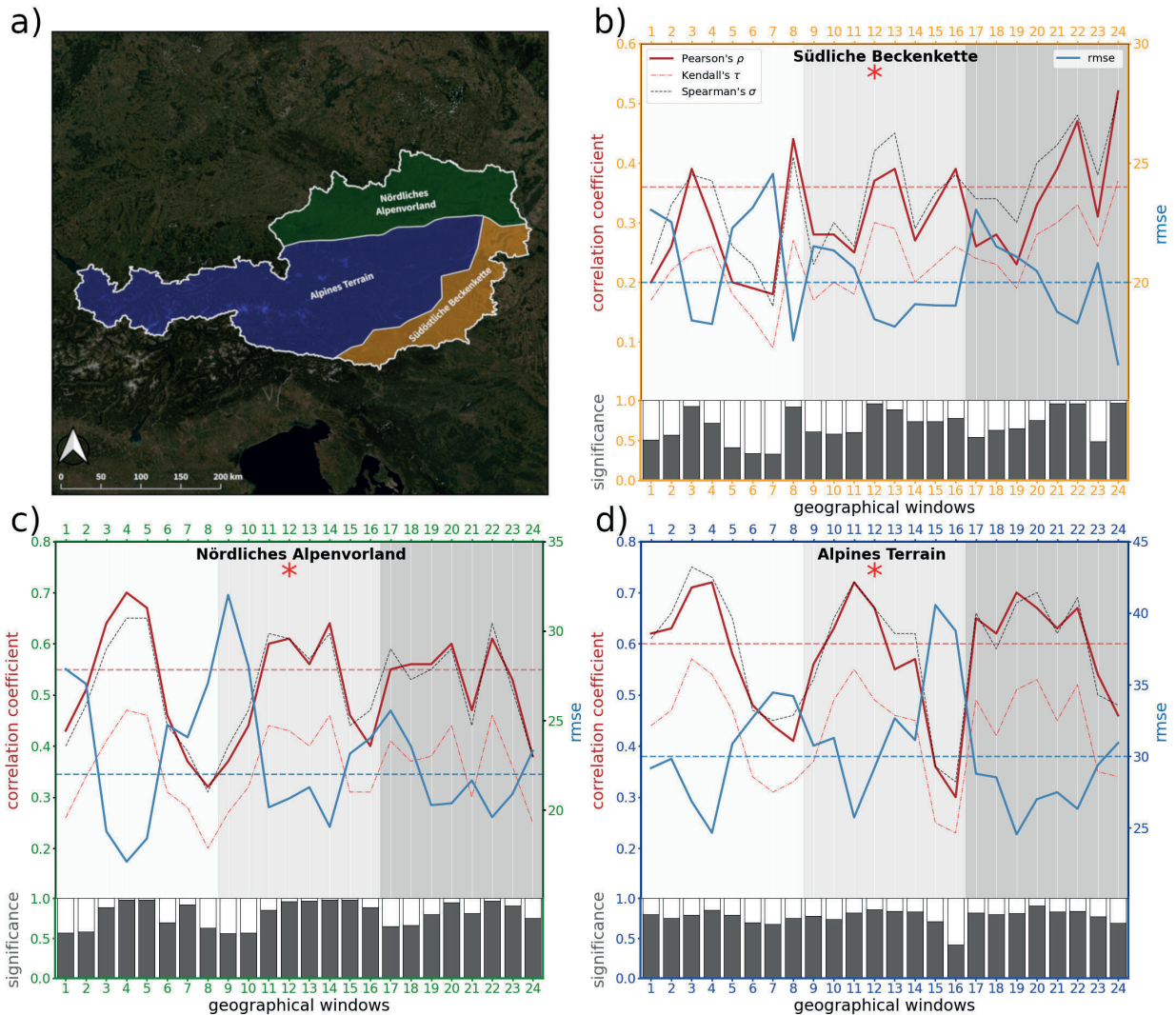


Abb. 15-2: Die von der Analog-Methode in temporären Kreuzvalidierungsexperimenten gezeigte Leistung – bei der Simulation von Januar-Niederschlagssummen (1950-2017) – in Abhängigkeit von der Position des atmosphärischen Fensters. Die 24 getesteten Positionen (x-Achsen in Abbildungen b, c und d) ergeben sich durch schrittweises Verschieben des Fenster-Mittelpunktes entlang dreier Breitengrade (42.5° N: 1-8, 50° N: 9-16, 57.5° N: 17-24; Details siehe Text). Abbildung a zeigt die drei betrachteten Regionen. Abbildungen b (für die Südliche Beckenkette), c (für das Nördliche Alpenvorland) und d (für das Alpine Terrain) geben die erzielten Leistungen wieder. Diese werden durch den RMSE (rechte y-Achse), die Korrelationskoeffizienten von Pearson, Spearman und Kendall-tau (linke y-Achse) sowie dem Prozentsatz an Gitterpunkten, an denen statistisch signifikante Simulationen der Niederschlagsverläufe vorliegen (Balken am Fuße der Abbildungen), charakterisiert. Die geographische Position, welche der Analog-Methode gleichzeitig zufriedenstellende Simulationen in allen Regionen erlaubt, ist mit einem Stern gekennzeichnet und entspricht 45° N / 12.5° O.

Niederschlagsfelder über die Regionsgrenzen hinweg zu gewährleisten, wird als Kohärenzbedingung gefordert, dass detektierte Analoga für die drei Regionen stets ident sind. Das führt auf ein Optimierungsproblem zur Bestimmung der optimalen Kombination aus Größe und geographischer Lage des atmosphärischen Fensters, in dem die synoptischen Felder betrachtet werden.

3.3 Lösung des Optimierungsproblems

Die Wahl des optimalen Fensters erfolgt durch Variation seiner Größe und Lage. Dabei kommen temporäre Kreuzvalidierungsexperimente und statistische Gütemaße zum Einsatz. Derart gelingt die Bewertung der vom jeweiligen Setting gezeigten Leistung bei der Simulation der Niederschlagsfelder in den drei Regionen. Als Testgröße finden

dabei die auf Januar-Niederschlagssummen (1950 - 2017) aggregierten Tagesniederschläge Anwendung. Es zeigt sich, dass eine 15 mal 15 Gitterpunkte umfassende Fenstergröße gleichzeitig in den betrachteten Regionen die zufriedenstellendsten Ergebnisse erzielt.

Abbildung 15-2 zeigt die Ergebnisse. Insgesamt liefern diese ein 15 mal 15 Gitterpunkte umspannendes Fenster mit Zentrum 45° N / 12.5° O.

4 EPISODES

Ende 2018 konnten die Ziele einer Kooperation zwischen den nationalen Wetterdiensten Deutschlands (DWD) und Österreichs (ZAMG), welche sowohl Nutzung und Ent-

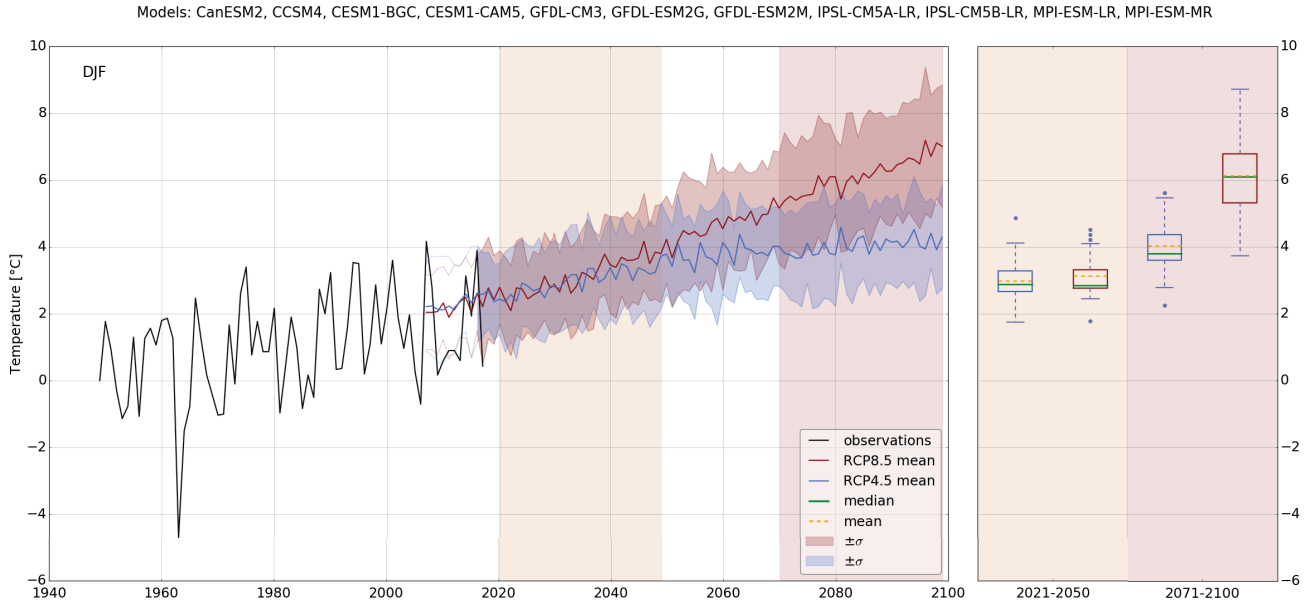


Abb. 15-3: Beobachtete und künftig mögliche Wintertemperaturentwicklungen für die Station Bregenz (basierend auf 30 Projektionen; RCP4.5 und 8.5).

wicklung von EPISODES (KREIENKAMP et al. 2019) betreffen, in engem Austausch definiert werden. So wurden alle am DWD entwickelten Software-Module an der ZAMG implementiert und aufeinander abgestimmt. Es gelang – durch Anpassung der I/O Routinen und Verwendung des E-OBS Datensatzes – die Ausdehnung der bisher auf

Deutschland beschränkten Domäne auf ganz Europa. Mit dem Nachweis der Äquivalenz von Ergebnissen, welche in Berlin/Potsdam und Wien mit EPISODES bei Testläufen erzeugt wurden, waren die Voraussetzungen für den operationellen Betrieb in Wien erfüllt. Auf dieser Basis können nun die geplanten methodisch-technischen Weiterentwick-

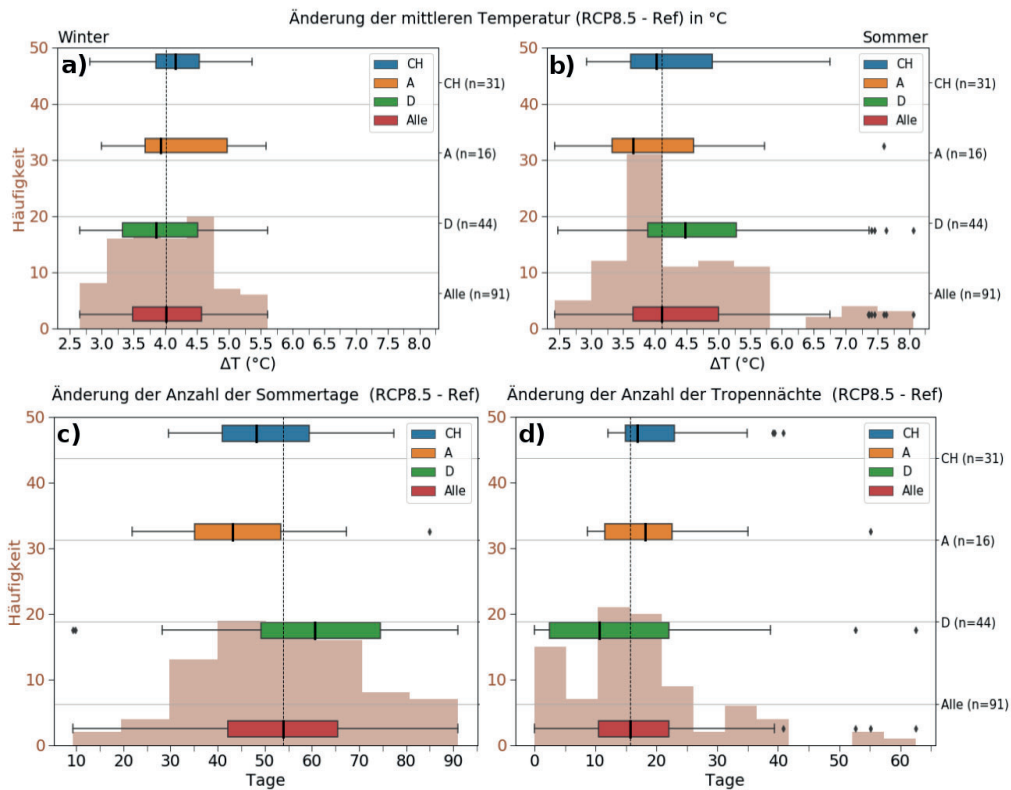


Abb. 15-4: Oben a), b): Mittlere Temperaturänderung (RCP8.5) in der Bodenseeregion (für Winter (a) und Sommer (b), 2071-2100 verglichen mit 1971-2000). Unten: Änderung der Anzahl der Sommertage (c) und Tropennächte (d). n bezeichnet die Umfänge der betrachteten Ensembles; das Histogramm im Hintergrund zeigt die Verteilung aller betrachteten Ensembles zusammengenommen. Aus KOGLER (2020).

lungen, zu denen der österreichische Wetterdienst ab Anfang 2020 wieder beiträgt, gemeinsam erfolgen. Meilensteine sind z.B. die Verkürzung der Projektionszeiträume auf dekadische Zeithorizonte, sowie die Gewährleistung der für Deutschland gezeigten Robustheit von Ensembles an Projektionen im stark gegliederten Gelände der Europäischen Alpen (siehe auch untenstehender Vergleich regionaler Klimaprojektionen).

5 Transferfunktionen

Transferfunktionen stellen die meist verwendeten Downscaling-Verfahren dar und können in lineare sowie nicht-lineare Verfahren untergliedert werden. Die Motivation hinter der im Folgenden skizzierten Anwendung ist in erster Linie die Bereitstellung von umfangreichen Ensembles regional-skaliger Klimaprojektionen, welche Aussagen von höherer statistischer Robustheit zulassen, als bisher gezeigte Beispiele. Beobachtungsdatensätze auf Monatsbasis stehen auf der HISTALP-Website zum Download bereit. Dieser Datensatz umfasst homogenisierte Stationsreihen für den Europäischen Alpenraum. Aus NCAR/NCEP-Reanalysen und HISTALP-Temperatur- bzw. Niederschlagsreihen wird mit Multipler Linearer Regression für jede Station und Saison im Jahreszyklus eine eigene Transferfunktion abgeleitet. Dabei kommen Zeitkoeffizienten der Hauptkomponenten (VON STORCH und ZWIERS 1999) atmosphärischer Felder als Prädiktoren zur Anwendung (z.B. HEWITSON und CRANE 1992; LANDGRAF et al. 2015). Bei Temperaturreihen als Prädiktanden sind die atmosphärischen Felder Luftdruck auf Meeresniveau und Temperatur in 850 hPa zugehörige Prädiktoren. Handelt es sich um die Entwicklung von Niederschlagsmengen, wird neben dem Luftdruck auf Meeresniveau die spezifische Feuchte in 700 hPa betrachtet. Da das Klima des Alpenraumes stark von atmosphärischen Prozessen über dem Nordatlantik geprägt ist, erstreckt sich der geographische

Ausschnitt, über dem die Reanalyse-Felder analysiert werden, von 50° W / 65° N bis 30° O / 35° N.

Mit diesen stations- und saison-spezifischen Transferfunktionen können nun aus mit globalen Klimamodellen erstellten Projektionen, die für verschiedene RCP-Pfade verhältnismäßig zahlreich verfügbar sind, umfangreiche Ensembles regional-skaliger Temperatur- und Niederschlags-Entwicklungen abgeleitet werden (Abbildung 15-3 stellt ein Beispiel für die Station Bregenz dar).

6 Trilateraler (DACH) Vergleich regionaler Klimaprojektionen

Um im Rahmen der DACH-Kooperation (Zusammenarbeit der Wetterdienste Deutschlands, Österreichs und der Schweiz) die Notwendigkeit eines verstärkten Austauschs in Hinblick auf die von den Wetterdiensten in ihren Ländern angebotenen Klimaprojektionen zu motivieren, wurde 2019 eine, an der ZAMG betreute, Masterarbeit durchgeführt. Ziel der Arbeit ist, die von den Wetterdiensten zur Verfügung gestellten Klimaprojektionen in der Bodensee-Region zu untersuchen, miteinander zu vergleichen und Inkonsistenzen aufzuzeigen. Damit soll die Basis für ein künftig gemeinsames Vorgehen bei der Bereitstellung von Klimaprojektionen geschaffen werden.

In der Bodenseeregion werden modellierte Temperatur- und Niederschlagsänderungen sowie solche einiger Klimaindizes für die RCP-Pfade 2.6, 4.5 und 8.5 in der nahen (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) miteinander verglichen. Die im Folgenden gezeigten Resultate beziehen sich auf RCP8.5 und die Periode 2071-2100.

Die Verteilungen der über die Periode 2071-2100 gemittelten Zunahmen der Wintertemperatur in Bregenz zeigen relativ zu 1971-2000 bei allen drei Wetterdiensten ähnliche

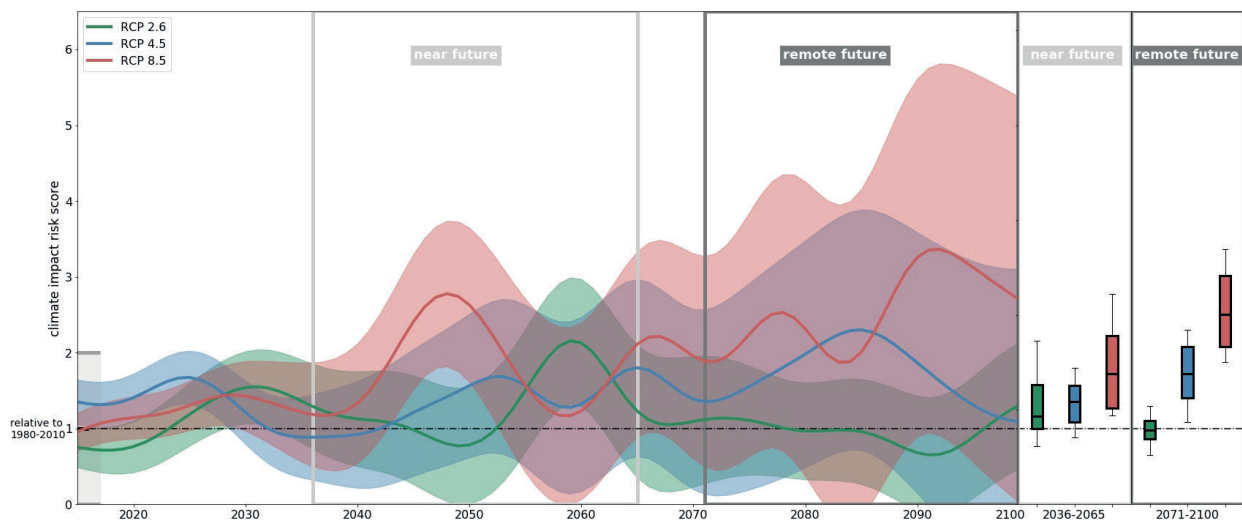


Abb. 15-5: Gefahrenentwicklungskorridore (*hazard-development corridors*) für Hochwasserereignisse im Nördlichen Alpenvorland. Maßgeblich ist die Veränderung über eine Klimanormalperiode verglichen mit dem aktuellen Klima (Boxplot).

Werte, die um 4 °C liegen (siehe Abbildung 15-4a). Obwohl die Resultate von erheblichen Schwankungsbreiten begleitet sind, liegt ein sichtbarer Unterschied zwischen den jeweiligen Verteilungen von Sommer und Winter vor (siehe Abbildung 15-4b; KOGLER 2020).

Die Zunahmen der Winter-Niederschlagssummen streuen annähernd symmetrisch um etwa 50 mm (das entspricht rund 18 % der mittleren Niederschlagsmenge der Referenzperiode). Drei Member des DWD-Ensembles zeigen außerordentlich große Abweichungen. Werden diese außer Acht gelassen, sind die länderspezifischen Verteilungen der Winter-Niederschlagssummen relativ ähnlich. Die mit ESD erzeugten Ergebnisse für den Median zeigen geringere Zunahmen (etwa 30 mm) und sind von kleineren Schwankungsbreiten begleitet (nicht gezeigt).

Die berechneten Klimaindizes (wie Sommertage und Tropennächte) zeigen stärker ausgeprägte Unterschiede zwischen den Ländern als die bisher diskutierten Temperaturänderungen. Wie in Abbildung 15-4c, d zu sehen ist, sind nicht nur die Mediane deutlich unterschiedlicher, sondern auch die, die Veränderungen darstellenden Werte, von erheblich extremeren Abweichungen geprägt. Bei den Tropennächten beispielsweise reichen modellierte Veränderungen von Null bis zu 60 zusätzlichen Tropennächten pro Jahr (siehe Abbildung 15-4d).

7 Anwendungen im Klimaimpaktbereich

In der Meteorologie werden Extremereignisse oft als Überschreitungen hoher Perzentile atmosphärischer Parametern aufgefasst. Spricht man jedoch von Gefahren, Schäden, Opfern oder allgemein über Bevölkerungsschutz, werden Extremereignisse mit atmosphärischen Entwicklungen in Zusammenhang gebracht, die unter anderem Bevölkerung, Ökosysteme und Infrastruktur gefährden. Diese werden in der Regel als *Climate Indices* (CIs) bezeichnet (ENIGL et al. 2019).

Über Europas topographisch komplex strukturiertem Terrain sind Überflutungen, Hangrutschungen, Hitze und Dürre für einen Großteil an Schäden verantwortlich. In Österreich alleine sind diese für SchADVolumina von bis zu einer Milliarde Euro pro Jahr verantwortlich. Informationen in Bezug auf künftige Veränderungen in Intensität und Frequenz solcher Schadereignisse stellen daher ein Thema von wachsender Bedeutung dar. Die objektive Ableitung von CIs beruht auf der Verschneidung von Schadereignis-Daten mit zu diesen korrespondierenden meteorologischen Daten.

Um Veränderungen der mittleren Größen von Schadereignissen klimatologisch greifbar zu machen, ist eine Datenbasis, die sich über mindestens zwei unabhängige Klimanormalperioden (je 30 Jahre) erstreckt, erforderlich. Für die Betrachtung von selten auftretenden Extremereignissen ist die nötige Zeitperiode dementsprechend länger. Bisher konnten objektive Analysen, die diesen strengen

Rahmenbedingung genügen, nicht realisiert werden. Unter dem Dach des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) wurde im Zuge der Kooperation zwischen diesem, der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien (IMGW) erstmals die Zusammenführung der drei umfangreichsten Schadereignisdatensätze Österreichs ermöglicht. Diese umfassen einerseits den Ereigniskataster der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und den Prozesskataster der Geologischen Bundesanstalt (GBA), sowie andererseits die VIOLA-Datenbank der ZAMG, in welcher seit dem Jahr 1948 Extremereignisse basierend auf Medienberichten erfasst werden. Miteinander verschnitten und harmonisiert ergeben diese Datenquellen den *event space*, der über 20.000 räumlich und zeitlich verortete Extremereignisse umfasst und sich über sieben Dekaden erstreckt. Gemeinsam mit dem gegitterten Beobachtungsdatensatz SPARTACUS, welcher tägliche Niederschlagsmengen und Temperaturen auf einem räumlichen Gitter mit 1 km Auflösung angibt, bildet er die notwendige Basis für die objektive Ableitung von CIs in drei klimatologisch und geomorphologisch distinkten Regionen Österreichs (Alpines Terrain (AT), Nördliches Alpenvorland (NA), Südöstlichen Beckenkette (SB); siehe Abbildung 15-2a).

Der methodisch erforderliche Zugang für die Ableitung von CIs – betrachtet werden hier sechs Prozesskategorien (hydrologisch: Hochwasser, Flash Floods; geologisch: Gleiten, Fließen, Fallen/Stürzen, andere) in den oben eingeführten Regionen (AT, NA, SB) – umfasst folgende Schritte: (i) Abgreifen der Niederschlagsinformation an dem zum Schadereignis nächstgelegenen SPARTACUS-Gitterpunkt (ii) Mittelung der Niederschlagssummen an diesem Gitterpunkt und seinen 4 Nachbarn (iii) Abspeichern dieser Information für den Tag des Prozesseintritts (Target Day: TD-0) sowie für die 7 vorhergehenden Tage (TD-1 bis TD-7) (iv) Bestimmung der Eigenvektoren und Eigenrichtungen mittels Eigenwertanalyse (EOFs; VON STORCH und ZWIERS 1999), welche die gesuchten CIs repräsentieren. Die Durchführung dieses Programms liefert charakteristische, eindeutig voneinander zu unterscheidende Niederschlagsverläufe vor den Schadereignissen. Für einen detaillierten Überblick sei hier aus Platzgründen auf (ENIGL et al. 2019) verwiesen.

Diese auf den CIs beruhende Resultate können von Verantwortlichen im Bevölkerungsschutz zur nachhaltigen Entscheidungsfindung unter den Bedingungen des sich weiter beschleunigenden Klimawandels verwendet werden, um das aktuelle Schutzniveau auch in Zukunft gewährleisten zu können.

Für die Bereitstellung unterstützender Verfahren zur Bestimmung von vorausschauenden Strategien für einen jahrzehntelangen, nachhaltigen Schutz ist die Ableitung von sogenannten Gefahrenentwicklungskorridoren (*hazard-development corridors*), welche zukünftige Verän-

derungen in Risikolandschaften beschreiben, maßgeblich. Für deren Beschreibung wird das Auftreten entsprechender CIs in den ÖKS15-Ensembles (CHIMANI et al. 2016) detektiert. Die *hazard-development corridors* für Hochwasserereignisse im Nördlichen Alpenvorland bis zum Jahr 2100 getrieben von den Szenarienpfaden RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) sind in Abbildung 15-5 dargestellt. Verfolgt man das Auftreten des CIs für Hochwasser im Nördlichen Alpenvorland unter RCP2.6, erkennt man, dass dieses bis zum Jahr 2100 konstant bei dem Wert relativ zum Zeitraum 1980 bis 2010 bleibt. Für den Bevölkerungsschutz bedeutet dieses Resultat, dass lediglich Erhaltungsmaßnahmen der bereits implementierten Infrastruktur ausreichen, um für acht Dekaden Schutz bieten zu können. Das RCP8.5-Szenario deutet jedoch auf eine Verdreifachung (Median) des Risikos hin. Daher ist davon auszugehen, dass in diesem Fall heutige Schutzbauwerke nicht bis zum Ende des Jahrhunderts genügend Schutz für die Bevölkerung leisten können. Somit stellen sie für die gegenwärtige und folgende Generationen eine Fehlinvestition dar.

Ergebnisse aus den *hazard-development corridors* werden in Folge in den Prozess der nachhaltigen und effizienten Entscheidungsfindung miteinbezogen und zusammen mit Experten im Bevölkerungsschutz – unter der Bedingung das gegenwärtige Schutzniveau in Zukunft zu halten – verarbeitet. Die Bestimmung optimaler, nachhaltiger Schutzstrategien basiert auf entscheidungstheoretischen Techniken und der Anwendung der Erwartungsnutzentheorie (Bernoulli-Prinzip). Der sich ergebende Mehrwert besteht in der Anwendung des Nutzens von Adaptionsmaßnahmen für die Bevölkerung, anstelle monetärer Werte für deren Errichtung (BERNOULLI 1954).

Die Machbarkeit der Integration von *hazard-development corridors* in Entscheidungsprozesse, sowie die zufriedenstellende Durchführung etablierter Verfahren werden an dem bisher umfassendsten Bevölkerungsschutzprojekt in Österreich, dem „Machland Nord Projekt“, gezeigt. Die Region Machland erstreckt sich 35 km zwischen den Gemeinden Mauthausen und St. Nikolai und ist aufgrund ihrer Lage entlang der Donau für Überflutungen anfällig. Das gleichnamige Projekt, welches nach dem Jahrhunderthochwasser 2002 umgesetzt wurde, umfasst drei Anpassungsstrategien, um die Bevölkerung vor weiteren Flutkatastrophen zu schützen: (i) Retention (z. B. Rückhaltebecken und Flutmulden), (ii) Linearmaßnahmen (z. B. mobiler Hochwasserschutz) und (iii) Absiedelung. Diese Strategien wurden in dem oben erwähnten entscheidungstheoretischen Ansatz des Bernoulli-Prinzips für die nahe und ferne Zukunft und die drei verwendeten RCPs auf ihre Nachhaltigkeit und Effizienz bewertet. Die Resultate sind konsistent und zeigen erhebliche Unterschiede zwischen der nahen (2036-2065) und fernen Zukunft (2071-2100), sowie den Risiken die mit dem RCP 2.6 bzw 8.5 verbunden sind. Abgesehen davon stehen die Ergebnisse in Einklang mit der Europäischen Hochwasserrichtlinie, welche lineare Maßnahmen hinter Absiedelung und Retentionsmaßnahmen reiht.

8 Zusammenfassung

Dynamisch und empirisch-statistisch erzeugte Klimawandelszenarien erlauben (bezogen auf ihre jeweiligen Vor- und Nachteile) ein Setting an statistisch umfangreichen Ensembles, welche robuste Aussagen ermöglichen. Der dadurch geschaffene Umfang der Ensembles gestattet differenzierte Aussagen hinsichtlich der zur Anwendung gebrachten Methoden, sowie die objektive Quantifizierung der Resultate in Betracht auf ihre raumzeitliche Konsistenz.

Die Erstellung des ÖKS15-Datensatzes für die Klimafolgenforschung ist ein typisches Beispiel für das Ineinandergreifen dynamischer und empirisch-statistischer Verfahren. Dieses Design erlaubt die Ableitung von (zum Teil) signifikanten Aussagen über mögliche regional- bis lokal-skalige Auswirkungen des Klimawandels.

Mit empirisch-statistischen Verfahren beispielsweise gelingt die relativ computerressourcensparende Produktion umfangreicher Ensembles an Klimaprojektionen. Besteht das Ziel darin – bei Verwendung etwa der Analog-Methode – räumlich kohärente Projektionen zu erzeugen, müssen diese zwischen potentiell als verschieden betrachtete Klimaregionen aufeinander abgestimmt sein. Der Vergleich von den drei DACH-Wetterdiensten potentiellen Stakeholdern zur Verfügung gestellten Klimaprojektionen zeigt einerseits deren Abhängigkeit von den verwendeten Modellen, sowie andererseits auch systematische Unterschiede zwischen den Ländern. Diese Fakten zeigen die Notwendigkeit einer Harmonisierung der Resultate zwischen den Wetterdiensten auf, besonders in grenznahen Gebieten.

Die in Österreich einzigartige Datenbasis von sowohl Schadereignissen, wie auch räumlich und zeitlich hochaufgelösten meteorologischen Parametern, erlaubte erstmals die objektive Ableitung von regions- und prozessspezifischen, schadauslösenden Wettersequenzen. Deren zukünftige Frequenzen (je nach Entwicklungspfad der Menschheit) werden als Gefahrentwicklungskorridore bezeichnet. Die in diesem Beitrag vorgestellten Korridore repräsentieren die sich verändernden Risikolandschaften für Hochwasserereignisse in der Region Machland, auf deren Basis die Nachhaltigkeit verschiedener Anpassungsmaßnahmen bewertet werden kann.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT), bei der Wildbach- und Lawinverbauung (WLV) und der Geologischen Bundesanstalt (GBA), sowie beim DWD und der MeteoSCHWEIZ für die enge Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt Andreas Mansberger, János Tordai und Theresa Schellander-Gorgas für deren wertvolle Unterstützung.

Literatur

- BERNOULLI, D., 1954: Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk. *Econometrica* **22** (1), doi:10.2307/1909829.
- CHIMANI, B., HEINRICH, G., HOFSTÄTTER, M., KERSCHBAUMER, M., KIENBERGER, S., LEUPRECHT, A., LEXER, A., et al., 2016: ÖKS15-Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimanalyse. Projektendbericht Wien.
- CHIMANI, B., MATULLA, C., HIEBL, J., SCHELLANDER-GORGAS, T., MARAUN, D., MENDLIK, T., EITZINGER, J., KUBU, G., THALER, S., 2020: Compilation of a Guideline Providing Comprehensive Information on Freely Available Climate Change Data and Facilitating Their Efficient Retrieval. *Climate Services* **19**.
- ENIGL, K., MATULLA, C., SCHLÖGL, M., SCHMID, F., 2019: Derivation of Canonical Total-Sequences Triggering Landslides and Floodings in Complex Terrain. *Advances in Water Resources* **129**, 178-88.
- HEWITSON, B. C., CRANE, R. G., 1992: Large-Scale Atmospheric Controls on Local Precipitation in Tropical Mexico. *Geophysical Research Letters* **19** (18), 1835-1838.
- HIEBL, J., FREI, C., 2016: Daily Temperature Grids for Austria Since 1961: Concept, Creation and Applicability. *Theoretical and Applied Climatology* **124** (1-2), 161-178.
- HIEBL, J., FREI, C., 2018: Daily Precipitation Grids for Austria Since 1961: Development and Evaluation of a Spatial Dataset for Hydroclimatic Monitoring and Modelling. *Theoretical and Applied Climatology* **132** (1-2), 327-345.
- HOFSTÄTTER, M., BECK, C., CHIMANI, B., GAN-EKIND, M., HOMAN, M., JACOBEIT, J., PHILLIP, A., 2015: WETRAX: WEather Patterns, Cyclone TRACKS and related precipitation EXtremes. In Projektendbericht, *Geographica Augustana* **19**.
- KOGLER, M., 2020: Unstetigkeiten in grenznahen Klimaszenarien: Eine Fallstudie in der Region Bodensee, Masterarbeit an der Universität Wien.
- KREIENKAMP, F., PAXIAN, A., FRÜH, B., LORENZ, P., MATULLA, C., 2019: Evaluation of the Empirical-Statistical Downscaling Method EPISODES. *Climate Dynamics* **52** (1-2). Springer: 991-1026.
- LANDGRAF, M., MATULLA, C., HAIMBERGER, L., 2015: Statistically Downscaled Projections of Local Scale Temperature in the Topographically Complex Terrain of Austria up to the End of the 21st Century. *Meteorologische Zeitschrift* **24** (4), 425-440.
- MATULLA, C., ZHANG, X., WANG, X.L., WANG, J., ZORITA, E., WAGNER, S., VON STORCH, H., 2008: Influence of Similarity Measures on the Performance of the Analog Method for Downscaling Daily Precipitation. *Climate Dynamics* **30** (2-3), 133-44.
- MATULLA, C., PENLAP, E. K., HAAS, P., FORMAYER, H., 2003: Comparative Analysis of Spatial and Seasonal Variability: Austrian Precipitation During the 20th Century. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* **23** (13). Wiley Online Library (13), 1577-1588.
- OLEFS, M., SCHOENER, W., 2012: A New Solar Radiation Model for Research and Applications in Austria. EGU General Assembly 2012, Wien, *Geophysical Research Abstracts* **14**, 9705.
- VON STORCH, H., ZWIERS, F. W., 1999: Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511612336.
- VON STORCH, H., ZORITA, E., CUBASCH, U., 1993: Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime. *Journal of Climate* **6** (6), 1161-71.

Autoren

PRIV.-DOZ. DR. CHRISTOPH MATULLA
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Climate Impact Team (CIT) – Abteilung Klimaforschung (KLFOR)
Hohe Warte 38
1190 Wien
ÖSTERREICH
christoph.matulla@zamg.ac.at

KATHARINA ENIGL
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Climate Impact Team (CIT) – Abteilung Klimaforschung (KLFOR)
Hohe Warte 38
1190 Wien
ÖSTERREICH
katharina.enigl@zamg.ac.at

SEBASTIAN LEHNER
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Climate Impact Team (CIT) – Abteilung Klimaforschung (KLFOR)
Hohe Warte 38
1190 Wien
ÖSTERREICH
sebastian.lehner@zamg.ac.at

Abkürzungen

ACC-CG	<i>Adaption to Climate Change - Coordination Group</i> (von CEN und CENELEC gegründete Koordinierungsgruppe, um die europäischen Normungsaktivitäten im Bereich der Anpassung an den Klimawandel zu koordinieren)
ALADIN	<i>Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational</i> (regionales Klimamodell des <i>Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)</i> , einer Forschungseinrichtung der <i>Météo-France</i>)
AM	Analog-Methode
AMBAV	Agrarmeteorologische Berechnung der aktuellen Verdunstung (DWD-Wasserhaushaltsmodell)
APA	Aktionsplan Anpassung (Anpassungsmaßnahmen des Bundes im Rahmen der DAS)
APCC	<i>Austrian Panel on Climate Change</i> (dauerhaftes Gremium des <i>Climate Change Centre Austria</i> , in Anlehnung an das IPCC)
AR	<i>Assessment Report</i> (verfasst durch das IPCC)
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
C2SM	<i>Center for Climate Systems Modeling</i>
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
CDC	<i>Climate Data Center</i> (Portal des Deutschen Wetterdienstes, auf dem umfangreiche Klimadaten zur freien Nutzung bereitgestellt werden)
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i> (Europäisches Komitee für Normung)
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Électrotechnique</i> (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CGE	<i>Computable General Equilibrium Model</i> (berechenbares allgemeines Gleichgewichtsmodell zur quantitativen Bewertung der ökonomischen Auswirkungen von klimapolitischen Maßnahmen)
CI	<i>Climate Indices</i> (Klima-Indizes)
Clim4Energy	<i>Climate for Energy</i> (Projekt des <i>Copernicus Climate Change Service</i>)
CLM	<i>Climate Limited-area Modelling</i>
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i> (internationaler, kollaborativer Rahmen zur Untersuchung, Verbesserung und Vergleich von Klimaprojektionen durch gekoppelte (Ozean-Atmosphäre-Kryosphäre) globale Zirkulationsmodelle)
COIN	<i>Cost of Inaction</i> (Projekt zur Abschätzung der Kosten in Österreich bei keiner Anpassung an den Klimawandel)
COIN-INT	<i>Costs of Inaction for Austria - Climate change impacts transmitted by international trade</i> (Abschätzung von handelsinduzierten Klimafolgekosten für Österreich als Ergänzung zu COIN)
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i> (internationales Programm des WCRP zur Verbesserung und Koordinierung regionaler Klimamodellierung)
COSMO-CLM	<i>Consortium for Small-Scale Modelling in Climate Mode</i>
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (in 2008 von der Bundesregierung beschlossener politischer Rahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland)

DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN-KU	Koordinierungsstelle Umweltschutz des Deutschen Instituts für Normung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
EKL	Ertragsklasse (relativer Maßstab für die Wuchsleistung eines Baumbestandes)
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Schweizerische Forschungsinstitution für anwendungsorientierte Materialwissenschaften und Technologie)
EN	Europäische Normen
EnKF	Ensemble-Kalman-Filter
EPFL	<i>École polytechnique fédérale de Lausanne</i>
EPIC	<i>Environmental Policy Integrated Climate</i> (Klima-/Landwirtschaftsmodell, das landwirtschaftliche Aktivitäten und deren Wechselwirkungen innerhalb von Ökosystemen simuliert)
EPISODES	<i>Empirical Statistical Downscaling for Seasonal, Decadal up to Climate Time Series</i> (beim DWD entwickelte Empirisch-Statistische Downscaling-Methode)
ESD	<i>Empirical Statistical Downscaling</i>
ESM	<i>Earth System Model</i>
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EURO-CORDEX	<i>European CORDEX</i> (Europäischer Zweig der internationalen CORDEX-Initiative)
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
FAO	<i>Food and Agricultural Organization</i> (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen)
FONA	Forschung für nachhaltige Entwicklung (Plattform des BMBF zur Forschung für Nachhaltigkeit)
FREVA	<i>Freie Universität Berlin Evaluation System</i>
GCM	<i>General Circulation Model</i> (Allgemeines Zirkulationsmodell; Globales Klimamodell)
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GIQ	Gleichwertiger Abfluss (Abfluss, der durchschnittlich an 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird)
GIW	Gleichwertiger Wasserstand (Pegelstand, bei dem die Soltiefe der Fahrrinne noch garantiert ist)
HadGEM	<i>Hadley Centre Global Environment Model</i> (Klimamodellfamilie des UK Met Office)
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HQ	Abflussmenge bei Hochwasser bestimmter Jährlichkeiten (z. B. HQ100 = 100-jähriges Hochwasser)
HSQ	Höchster Schifffahrtswasserstand-Abfluss
HWRM	Hochwasserrisikomanagement
HYRAS	Hydrometeorologische Rasterdatensätze
IAM	<i>Integrated Assessment Model</i> (integriertes Bewertungsmodell zur Folgenabschätzung des Klimawandels)
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i> (inverse Distanzgewichtung)
IMAA	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (Gremium zur ressortübergreifenden Abstimmung und Weiterentwicklung der DAS)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Zwischenstaatlicher Ausschuss der Vereinten Nationen für Klimaänderungen)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Internationale Organisation für Normung)
JRC	<i>Joint Research Centre</i> (Gemeinsame Forschungsstelle; Generaldirektion der Europäischen Kommission)
KliRef2014	Bayerischer Klimareferenzdatensatz

KliVo	Deutsches Klimavorsorgeportal der Bundesregierung (www.klivoportal.de)
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (Kooperationsprojekt des DWD mit den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz)
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt (Ressortforschungsprogramm des BMVI)
KU-AK 4	Arbeitskreis 4 der DIN-Koordinierungsstelle Umweltschutz („Anpassung an den Klimawandel“)
KWB	Klimatische Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlagssumme und Summe der potentiellen Verdunstung)
KWVA	Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (Studie im Auftrag der Bundesregierung zur Analyse und Bewertung künftiger Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland)
LAI	<i>Leaf Area Index</i> (Blattflächenindex; Maß für die Belaubungsdichte eines Bestands)
Lfu	Landesamt für Umwelt
MiKlip	Mittelfristige Klimaprognose (BMBF-Forschungsprojekt)
MPI-ESM	<i>Earth System Model</i> des Max-Planck-Instituts für Meteorologie
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
NAGUS	DIN-Normungsausschuss Grundlagen des Umweltschutzes
NCCSS	<i>National Centre for Climate Services</i> (Netzwerk des Bundes für Klimadienstleistungen in der Schweiz)
netCOF	<i>Network Common Data Format</i> (Dateiformat für den Austausch wissenschaftlicher Daten)
nFK	nutzbare Feldkapazität (Wassermenge, die ein Boden pflanzenverfügbar speichern kann)
NSE	<i>Nash-Sutcliffe-Efficiency</i> (Modelleffizienzkoeffizient zur Bewertung der Vorhersagefähigkeit hydrologischer Modelle)
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
ÖKS	Österreichische Klimaszenarien
PC	<i>Principal Components</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
ProClim	Forum für Klima und globalen Wandel der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
QDCM	<i>Quantile Delta Change Mapping</i>
QDM	<i>Quantile Delta Mapping</i>
QM	<i>Quantile Mapping</i> (Methode zur Bias-Korrektur)
RCM	<i>Regional Climate Model</i> (Regionales Klimamodell)
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i> (Repräsentative Konzentrationspfade)
ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (Bundesweites Forschungsprojekt von 2014 bis 2017)
REMO	<i>Regional Model</i> (regionales Klimamodell des MPI-M)
RNQ	Regulierungsniederwasserabfluss
SC	<i>Sub-Committee</i> (Subkomitee / Unterausschuss)
SDM	<i>Scaled Distribution Mapping</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i> (neue Versionen der RCPs, die unterschiedliche zukünftige gesellschaftliche Verhältnisse berücksichtigen)
TC	<i>Technical Committee</i>
TCFD	<i>Task Force on Climate-related Financial Disclosures</i> (Expertenkommission der G20-Staaten zur Entwicklung einheitlicher Angaben klimabezogener Finanzrisiken)
TRJ	Testreferenzjahre (speziell zusammengestellte Datensätze, die einen mittleren, für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Für Simulationen im heizungs- und raumlufttechnischen Bereich.)

TUM	Technische Universität München
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)
valORTree	Projekt „Validierung des phytotoxischen Ozonflusses in Nadeln und Blättern als Voraussetzung einer realitätsnahen, integrierten Risikobewertung für die Ökosystemleistungen der Wälder in Deutschland“
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VZ	Vegetationszeit
WaSIM	Wasserhaushalts-Simulationsmodell der ETH Zürich
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i> (Weltklimaforschungsprogramm zur Koordinierung der globalen Klimaforschung.)
WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode
WRF	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes



50 Jahre promet

Grußwort des DWD-Präsidenten Prof. Dr. Gerhard Adrian

promet begleitet mich seit meinem Studium. Wir Studierende nutzten *promet* auf Empfehlung der Dozenten auch zur Vorbereitung auf Prüfungen. Das besondere an *promet* als Medium für die Fortbildung ist die breite Darstellung aktueller Themen in unserem Fach. Dies wird durch die Fachredakteurinnen und Fachredakteure sowie die Gutachterinnen und Gutachter gesichert, die mit den Autorinnen und Autoren die Inhalte koordinieren.

Die Entwicklung des Berufsbilds „Meteorologie“ zusammen mit der akademischen Ausbildung ist heute wie in vielen anderen Naturwissenschaften geprägt durch eine starke inhaltliche Diversifizierung bei gleichzeitiger Spezialisierung. Auch im Deutschen Wetterdienst als Herausgeber von *promet* findet diese Entwicklung an den einzelnen Arbeitsplätzen statt. Hier sehe ich auch eine wichtige Rolle für *promet*, das mit der breiten Darstellung aktueller Themen den Leserinnen und Lesern hilft, einen Einblick in die Entwicklung anderer verwandter Themenbereiche unseres Fachs zu verfolgen, die nicht unmittelbar im Zusammenhang mit ihrer beruflichen Tätigkeit stehen.

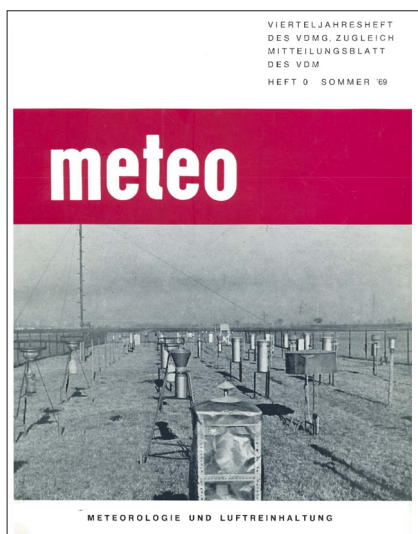
Die 50-jährige Reihe von *promet* dokumentiert darüber hinaus den beeindruckenden Fortschritt, der in diesem Zeitraum in den verschiedenen Teilgebieten der Meteorologie und Klimatologie erreicht wurde. Ich finde es spannend, auch wieder in die ersten Hefte zu sehen. Themen der ersten Jahrgänge von *promet* waren beispielsweise Turbulenz, Satellitenmeteorologie oder numerische Wettervorhersage.

Eine wesentliche Grundlage für den Erfolg von *promet* ist das große Engagement der Autorinnen und Autoren, der Fachredakteurinnen und Fachredakteure, der Gutachterinnen und Gutachter, der Schriftführer und der Schriftführerin, und nicht zuletzt der Einsatz der Mitglieder des Redaktionsausschusses. Meinen herzlichen Dank!

Gerhard Adrian

50 Jahre *promet*

Grußwort des ehemaligen Schriftleiters Dr. Hein Dieter Behr



*Titelseite des „meteo“-Heftes 0 aus dem Jahr 1969. Mit diesem Probeheft, herausgegeben vom damaligen Frankfurter Verein des VDMG, sollte die Geschichte von *promet* seinen Anfang nehmen.*

50 Jahre *promet* – eine wahre Erfolgsgeschichte! Als mich die derzeitige Schriftleiterin, Frau Bertelmann, kürzlich einlud, ein Grußwort für dieses Jubiläumsheft zu verfassen, wurde mir erst bewusst, auf welch lange Zeit und auf welche Fülle von veröffentlichten Fachthemen wir Leser von *promet* bereits zurück blicken können.

Als wir damaligen Studierenden am Institut für Meereskunde in Kiel das erste Heft von *promet* in den Händen hielten, dachten wir zunächst: „Ach, noch eine weitere meteorologische Fachzeitschrift.“ Ab den folgenden Heften wurde uns rasch klar, dass *promet* eine ganz andere Zielsetzung hatte: Diese Schriftenreihe sollte keine weitere Fachzeitschrift sein, in der Einzelbeiträge zu den unterschiedlichen wissenschaftlichen Fragestellungen veröffentlicht wurden. *promet* sollte, wie der damalige DWD-Präsident Dr. Erich Süssenberger in seiner Einführung zum ersten Heft erläuterte, der meteorologischen Fortbildung dienen.

Angeregt wurde *promet* von Prof. Dr. Friedrich Wippermann (TH Darmstadt), damaliger Vorsitzender des Frankfurter Vereins Deutscher Meteorologischer

Gesellschaften (VDMG). [Die vier regionalen Gesellschaften des VDMG schlossen sich 1974 zur Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. (DMG) zusammen.] Im Jahr 1969 gab der VDMG-Frankfurt ein Probeheft für eine meteorologische Fachzeitschrift unter der Bezeichnung „meteo“ Heft 0 heraus. Dieses fand im Kreise der Meteorologen eine starke Resonanz, ließ die Notwendigkeit einer Fortbildungszeitschrift deutlich werden und ermutigte zur Herausgabe der „*promet*-Reihe“. Wegen der bereits damals erkannten lebhaften Entwicklung von Naturwissenschaft und Technik wurde hier die Chance gesehen, ein abgeschlossenes Thema in aktualisierter Form, in zusammenhängender, verständlicher Form darzustellen. Prof. Dr. Franz Fiedler (Karlsruhe) mit dem ich meine beiden ersten Hefte von *promet* entwickelte, beschrieb das so: „Bei einem schönen Glas Rotwein im Sessel sitzend soll jedes Heft für den Leser ein Gewinn sein!“

Angesprochen mit dieser Schriftenreihe wurden bereits damals die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der beiden meteorologischen Dienste (Deutscher Wetterdienst und geophysikalischer Beratungsdienst der Bundeswehr) und der Hochschulinstitute sowie die Studierenden der Meteorologie nach dem Absolvieren ihrer Diplomvorprüfung. Durch die kostenfreie Abgabe der Hefte an diesen Personenkreis erhoffte man sich eine Rückkopplung derart, dass aus diesem Leserkreis profunde Textbeiträge für einzelne Hefte geliefert werden. Außerdem verteilten DMG, ÖGM und SGM *promet* auf eigene Kosten an die Mitglieder. Als Bindeglied zwischen dem Herausgeber, dem DWD, und den Forschungseinrichtungen wurde der Redaktionsausschuss eingerichtet, der diesen Wunsch gern aufnahm und viele gute Anregungen für die kommenden Hefte lieferte.

Eine Fundgrube der aktuellen Themen der meteorologischen Forschung waren ferner die Jahreszusammenstellungen der im deutschsprachigen Raum abgelegten Examina (Diplom, Promotion, Habilitation und später auch Bachelor und Master) im Fachgebiet Meteorologie. Den politischen Entwick-

lungen um das Jahr 1990, der Wiedervereinigung Deutschlands, sowie der zunehmende Zusammenschluss in Europa wurde durch die Verbreitung von *promet* nunmehr im gesamten deutschsprachigen Raum Rechnung getragen. Auch der Redaktionsausschuss wurde nach 2010 durch Kollegen aus Österreich und der Schweiz erweitert. Insbesondere dies führte zu einer erfreulichen Verbreitung der im Ausschuss erörterten Themen.

Dass das Schicksal von *promet* jedoch nicht immer ohne „Stolpersteine“ verlief, lässt sich an einer fast vierjährigen Pause zwischen 1997 und 2000 erahnen, in der kein *promet*-Heft erschien. Es wurde damals sogar darüber nachgedacht, *promet* ganz einzustellen!

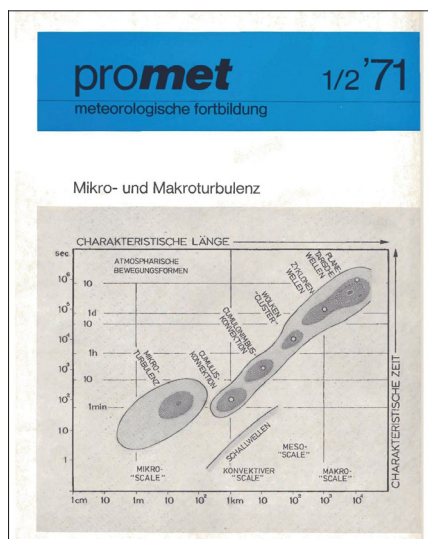
Für mich persönlich erfreulich und förderlich war, dass meine Mitarbeit im Redaktionsausschuss von *promet* wie auch die kritische Durchsicht der Manuskripte und die regelmäßigen Kontakte mit den betreffenden Autoren mich mehrfach in Fachgebiete führte, die nicht zu meinen damaligen dienstlichen Aufgaben gehörten. Neben den Fachbeiträgen in dem vorderen Teil der Hefte konnte ich in Zusammenarbeit mit dem DWD-Kollegen Detlev Frömming die Reihe „aus den meteorologischen Diensten in Europa“ entwickeln, die zeigte, dass meteorologische Dienstleistungen in den einzelnen Ländern Europas in den verschiedensten Organisationsformen erbracht wurden. Ferner sprach ich mit besonderer Vorliebe gezielt Kollegen außerhalb des DWD an, einen Kurzbeitrag über ein Thema zu verfassen, das nicht zum Hauptthema des jeweiligen Heftes passte. Zudem wurde sich in mühevoller Kleinarbeit um die Digitalisierung der Ausgaben der Jahre 1971-2000 von *promet* gekümmert, sodass nunmehr eine geschlossene Reihe aller Hefte in digitaler Form vorliegt.

Meiner Nach-Nachfolgerin im Amt der Schriftleitung wünsche ich eine glückliche Hand bei der Erstellung der kommenden Hefte. Möge irgendwann das Jubiläum „100 Jahre *promet*“ zu feiern sein.

Hein Dieter Behr
Schriftleiter *promet* der Jahre 1999-2007

50 Jahre promet

Grußwort des ehemaligen Schriftleiters Dr. Jörg Rapp



Titelseite der ersten *promet*-Ausgabe aus dem Jahr 1971 mit dem Thema „Mikro- und Makroturbulenz“.

Die Meteorologie ist eine hochmoderne Wissenschaft. Aus deren inzwischen verlässlichen Wetter- und Klimavorhersagen werden eine Vielzahl von kurz- und längerfristigen Maßnahmen abgeleitet, die unsere Lebensweise immer deutlicher beeinflussen. Aus diesem Grund ist es enorm wichtig, für eine effektive und zeitgemäße Aus- und Fortbildung zu sorgen. Und dazu trägt unsere Zeitschrift „*promet*“ ohne Zweifel bei.

Das Wort „Alleinstellungsmerkmal“ ist eine typisch deutsche Sprachschöpfung. Nicht schön, vielleicht etwas bürokratisch und sperrig, aber für *promet* genau passend. Was sind nun diese „Alleinstellungsmerkmale“?

1. Lehrbuchcharakter

Die *promet*-Hefte erscheinen im Umfang und im Arrangement fast wie klassische Lehrbücher, mit dem Unterschied des größeren Formats. Die behandelten Fragenkreise werden in der Regel durch eine ausgewogene Zusammenstellung an Beiträgen behandelt, von Einführungsartikeln bis hin zur Behandlung hochaktueller Forschungsthemen.

2. Gewissenhafte Begutachtung

Großer Wert wird auf eine verlässli-

che Begutachtung (ein Review) der einzelnen Beiträge gelegt. Unabhängige Gutachterinnen und Gutachter aus der Meteorologie schauen sich die Manuskripte genau durch, geben grundlegende inhaltliche Expertisen ebenso wie konkrete Verbesserungsvorschläge. Dabei werden, auch ohne einen anonymisierten Prozess, hohe Qualitätsmaßstäbe angesetzt, die den Fortbildungscharakter der Zeitschrift berücksichtigen. *promet* dient nicht primär dazu, neue Forschungserkenntnisse zu präsentieren – dafür gibt es ja die einschlägigen meteorologischen Journale.

3. Großer Rückhalt in der Wissenschaftscommunity

Allein die Zusammensetzung des Redaktionsausschusses der letzten Jahrzehnte illustriert eindrucksvoll die Verankerung des Magazins in der meteorologischen Wissenschaftscommunity. Sehr viele Beiträge des Hefes werden von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universitätsinstitute und anderer Forschungsorganisationen zugeliefert. Dadurch sind die Artikel immer auf der Höhe der Zeit.

4. Deutschsprachige Beiträge

Die Meteorologie ist eine international stark vernetzte Wissenschaft. Fast alle Forschungsergebnisse werden in englischer Sprache veröffentlicht. Dennoch ist es für die Aus- und Fortbildung wichtig, dass die wichtigsten Lehrmaterialien in der (deutschen) Muttersprache erscheinen, um sich auf das Adaptieren, Verstehen und Lernen konzentrieren zu können – einerlei, wie gut jemand Fremdsprachen spricht und versteht.

5. Hohe Auflage, weite Verbreitung

Für ein wissenschaftliches Journal ist die gedruckte Auflagenzahl ungewöhnlich hoch. Regelmäßig werden ungefähr 3600 Hefte produziert, die unter den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes, des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr, den meteorologischen Universitätsinstituten und den Mitgliedern der meteorologischen

Gesellschaften in Deutschland, Österreich und der Schweiz verteilt werden. Hinzu treten mehr als hundert Tauschexemplare für die Bibliotheken und der Einzelverkauf. Es wird angenommen, dass schätzungsweise zwei Drittel der Meteorologinnen und Meteorologen in Deutschland das Heft regelmäßig beziehen.

6. Open Access

Etwa ein Jahr nach Erscheinen der gedruckten Ausgabe wird das Heft kostenfrei online gestellt (sogenanntes „grünes Open Access-Modell“). Dadurch ist es insbesondere in der Lehre, aber auch in anderen Wissenschaftsdisziplinen frei und kostenlos zugänglich. Alle älteren Ausgaben sind schon frühzeitig digitalisiert worden.

7. Regelmäßiges Erscheinen seit einem halben Jahrhundert

Seit nunmehr 50 Jahren erscheint regelmäßig mindestens ein Heft pro Jahr.

8. Das besondere Extra

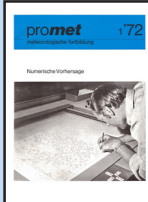


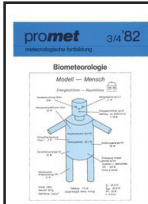


Die Fortbildungszeitschrift *promet* veröffentlicht jährlich die wichtigsten bibliographische Daten fast aller im deutschsprachigen Raum durchgeführten Examinaarbeiten in der Meteorologie (und verwandter Wissenschaften), also Habilitationen, Dissertationen, Master- bzw. Diplomarbeiten und Bachelorarbeiten [Anm. d. Schriftleitung: Die Examina 2020 erscheinen im nächsten Heft 105]. Sie geben indirekt ein annähernd vollständiges Bild der jeweils aktuellen Wissenschafts- und Forschungsaktivitäten. Für kaum ein anderes Wissensgebiet gibt es eine Aufstellung in dieser Gesamtheit.

Dies sind gewiss hinreichend viele und gute Gründe, der DWD-Zeitschrift *promet* und seiner neuen, jungen und überaus engagierten Schriftleiterin, Frau Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann, für die kommenden Jahre und die nächsten Jahrzehnte alles erdenklich Gute und viel Erfolg zu wünschen.

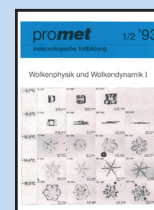
Jörg Rapp

Schriftleiter *promet* der Jahre 2007-2019

50 Jahre promet

Schriftleitung	Jahrgang / Heft	Titel	
Dipl.-Ing. Alfred Hofmann (Bad Homburg) 1971-1977	1 (1971), Heft 1/2	Mikro- und Makroturbulenz	     
	2 (1972), Heft 1	Numerische Vorhersage	
	2 (1972), Heft 2	Satellitenmeteorologie 1	
	2 (1972), Heft 3	Satellitenmeteorologie 2	
	2 (1972), Heft 4	Wolkenphysik	
	3 (1973), Heft 1	Das barotrope Modell	
	3 (1973), Heft 2	Geschichte der meteorologischen Strahlungsforschung	
	3 (1973), Heft 3	Meßtechnik und Automation	
	3 (1973), Heft 4	Technoklimatologie	
	4 (1974), Heft 1	Die Grenzschicht der Atmosphäre	
	4 (1974), Heft 2	Medizinmeteorologie	
	4 (1974), Heft 3	Instrumente und Methoden	
	4 (1974), Heft 4	Vorhersageprüfung	
	5 (1975), Heft 1	Agrarmeteorologie heute	
	5 (1975), Heft 2	Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre, Teil 1: Gase	
	5 (1975), Heft 3	Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre, Teil 2: Aerosole	
	5 (1975), Heft 4	GATE 1	
	6 (1976), Heft 1	GATE 2	
	6 (1976), Heft 2	Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre	
	6 (1976), Heft 3	Das barokline Modell	
6 (1976), Heft 4	Die Energetik der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre		
7 (1977), Heft 1	Radioaktivität der Atmosphäre		
7 (1977), Heft 2	Luftelektrizität 1		
Dipl.-Met. Max Schlegel (Offenbach am Main) 1977-1986	7 (1977), Heft 3	Luftelektrizität 2	
	7 (1977), Heft 4	Klimaschwankungen	
	8 (1978), Heft 1	Aktuelle Probleme der Flugmeteorologie	
	8 (1978), Heft 2/3	Anthropogene Klimamodifikation	
	8 (1978), Heft 4	Sturmfluten und Seegang 1	
	9 (1979), Heft 1	Sturmfluten und Seegang 2	
	9 (1979), Heft 2/3	Zirkulationsmodelle	
	9 (1979), Heft 4	Stadtklima	
	10 (1980), Heft 1/2	Klimamodelle	
	10 (1980), Heft 3	Klima und Planung 1	
	10 (1980), Heft 4	Klima und Planung 2	
	11 (1981), Heft 1	Meso-scale Modelle	
	11 (1981), Heft 2/3	Transport und turbulente Diffusion von Luftbeimengungen	
	11 (1981), Heft 4	Flugmeteorologische Probleme der planetarischen Grenzschicht	
	12 (1982), Heft 1/2	Synoptische Meteorologie heute. Zentraler synoptischer Dienst	
	12 (1982), Heft 3/4	Biometeorologie	
	13 (1983), Heft 1/2	Statistische Methoden der Klimatologie	
	13 (1983), Heft 3/4	Neuere Ergebnisse der Satellitenmeteorologie	
	14 (1984), Heft 1	Das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW)	
	14 (1984), Heft 2/3	Maritime Meteorologie	
14 (1984), Heft 4	Klima und Volkswirtschaft 1		
15 (1985), Heft 1	Klima und Volkswirtschaft 2		
15 (1985), Heft 2/3	Strahlungstransporte in der Atmosphäre		
15 (1985), Heft 4	Klimarelevante Spurenstoffe 1		
16 (1986), Heft 1	Klimarelevante Spurenstoffe 2		
16 (1986), Heft 2/3	Hydrometeorologie		
16 (1986), Heft 4	Ozon 1		
Dipl.-Met. Hans-D. Kirch (Offenbach am Main) 1987-1997	17 (1987), Heft 1/2	Ozon 2 und 3	
	17 (1987), Heft 3/4	Mesoskaliges Klima 1 und 2	
	18 (1988), Heft 1/3	Das Max-Planck-Institut für Meteorologie	
	18 (1988), Heft 4	Meteorologie und Klimatologie der Antarktis 1	
	19 (1989), Heft 1/2	Meteorologie und Klimatologie der Antarktis 2 und 3	
	19 (1989), Heft 3/4	Reaktive Spurenstoffe in der Atmosphäre	
	20 (1990), Heft 1/2	Spezielle geophysikalische Verfahren	
	20 (1990), Heft 3/4	Fernerkundung in der Meteorologie 1	
	21 (1991), Heft 1/2	Fernerkundung in der Meteorologie 2	
	21 (1991), Heft 3/4	ALPEX - das Alpine Experiment 1	
	22 (1992), Heft 1	ALPEX - das Alpine Experiment 2	

Schriftleitung	Jahrgang / Heft	Titel
	22 (1992), Heft 2/4 23 (1993), Heft 1/2 23 (1993), Heft 3 23 (1993), Heft 4 24 (1995), Heft 1/3 24 (1995), Heft 4 25 (1996), Heft 1/2 25 (1996), Heft 4 26 (1997), Heft 1/2	Meteorologie der Mittleren Atmosphäre Wolkenphysik und Wolkendynamik 1 Wolkenphysik und Wolkendynamik 2 Allgemeine Themen Wettervorhersagedienst 1 Wettervorhersagedienst 2 Aktuelle Beiträge zu Grundfragen der Meteorologie Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg 1 Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg 2
Dr. Hein Dieter Behr (Hamburg) 1999-2007	26 (2000), Heft 3/4 27 (2001), Heft 1/2 27 (2002), Heft 3/4 28 (2002), Heft 1/2 28 (2002), Heft 3/4 29 (2003), Heft 1/4 30 (2004), Heft 1/2 30 (2004), Heft 3 30 (2004), Heft 4 31 (2005), Heft 1 31 (2005), Heft 2/4 32 (2006), Heft 1/2 32 (2006), Heft 3/4 33 (2007), Heft 1/2	Photosmog 1 Photosmog 2 Die neue Modellkette des DWD 1 Die neue Modellkette des DWD 2 Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Teil 1: Das Klimasystem der Erde Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Teil 2: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen Umweltmeteorologie Numerische Klimamodelle, Teil III; 1 Numerische Klimamodelle, Teil III; 2 Mittlere und obere Atmosphäre 100 Jahre Atmosphärensondierung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg Atmosphäre und Gebirge Klima und Wetter in den Tropen Phänologie
Dr. Jörg Rapp (Offenbach am Main) 2007-2019	33 (2007), Heft 3/4 34 (2008), Heft 1/2 34 (2008), Heft 3/4 35 (2009), Heft 1/3 36 (2010), Heft 1/2 36 (2010), Heft 3/4 37 (2011), Heft 1/2 37 (2011), Heft 3/4 38 (2012), Heft 1/2 38 (2014), Heft 3/4 39 (2014), Heft 1/2 39 (2015), Heft 3/4 Heft 98 (2016) Heft 99 (2017) Heft 100 (2018) Heft 101 (2018) Heft 102 (2018)	Biometeorologie des Menschen Meteorologie und Versicherungswirtschaft Die Nordatlantische Oszillation (NAO) Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst Anwendungen von E-Learning in der Meteorologie Fernmessung von Wasserdampf und Wolken, Teil 1 Fernmessung von Wasserdampf und Wolken, Teil 2 Probabilistische Wettervorhersage Agrar- und Forstmeteorologie Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I: Grundlegendes Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie II: Mit dem Wetter leben Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien Hochgebirgsmeteorologie und Glaziologie Regionale Klimamodellierung I – Grundlagen Strahlungsbilanzen Klimakommunikation Atmosphärische Prozesse im arktischen Klimasystem
Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann (Offenbach am Main) seit 2019	Heft 103 (2020) Heft 104 (2021)	Außertropische Zyklonen Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen



Hinweis:

Im umfassenden *promet*-Archiv sind alle Hefte ab der ersten Ausgabe in digitalisierter Form frei verfügbar. Ein aktuelles Themenheft ist zunächst nur in gedruckter Form erhältlich und wird ein Jahr nach Veröffentlichung als kostenfreie Volltextversion (PDF) im Archiv zur Verfügung gestellt (Open Access – „Grüner Weg“).

Digitales Archiv aller erschienenen *promet*-Hefte ▶
seit 1971 zum kostenlosen Download
www.dwd.de/promet → Archiv



Vorschau auf die nächsten Hefte

- Grundlagen des globalen Kohlenstoffkreislaufs
- Beobachtungssysteme und Modellierung der Klimagase
- Stadtklima der Zukunft