

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-

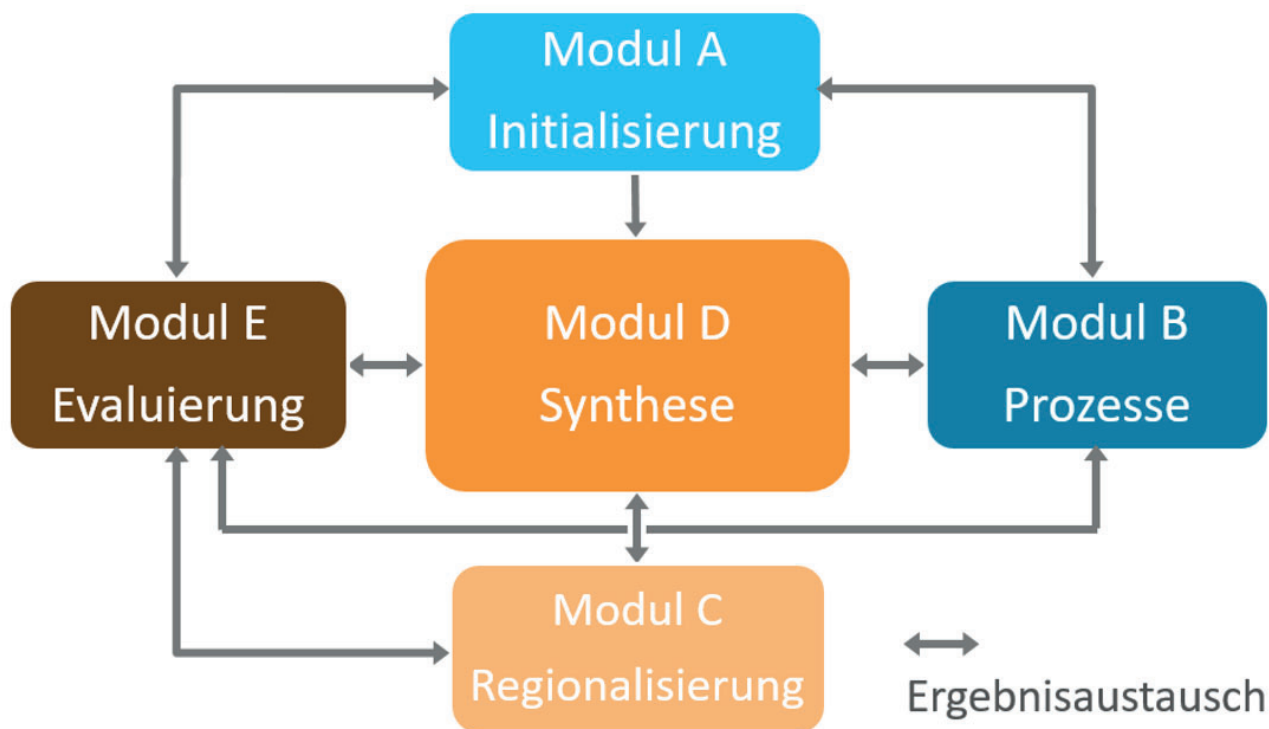


Abb. 6-1: Die fünf Themenbereiche (Module) von MiKlip II. Modul A untersuchte die Initialisierungsmethoden und -daten sowie Ensembleerzeugung dekadischer Klimavorhersagen., Modul B betrachtete klimarelevante Prozesse, Modul C erstellte regionalisierte Klimavorhersagen mit Fokus auf Europa, und Modul 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*

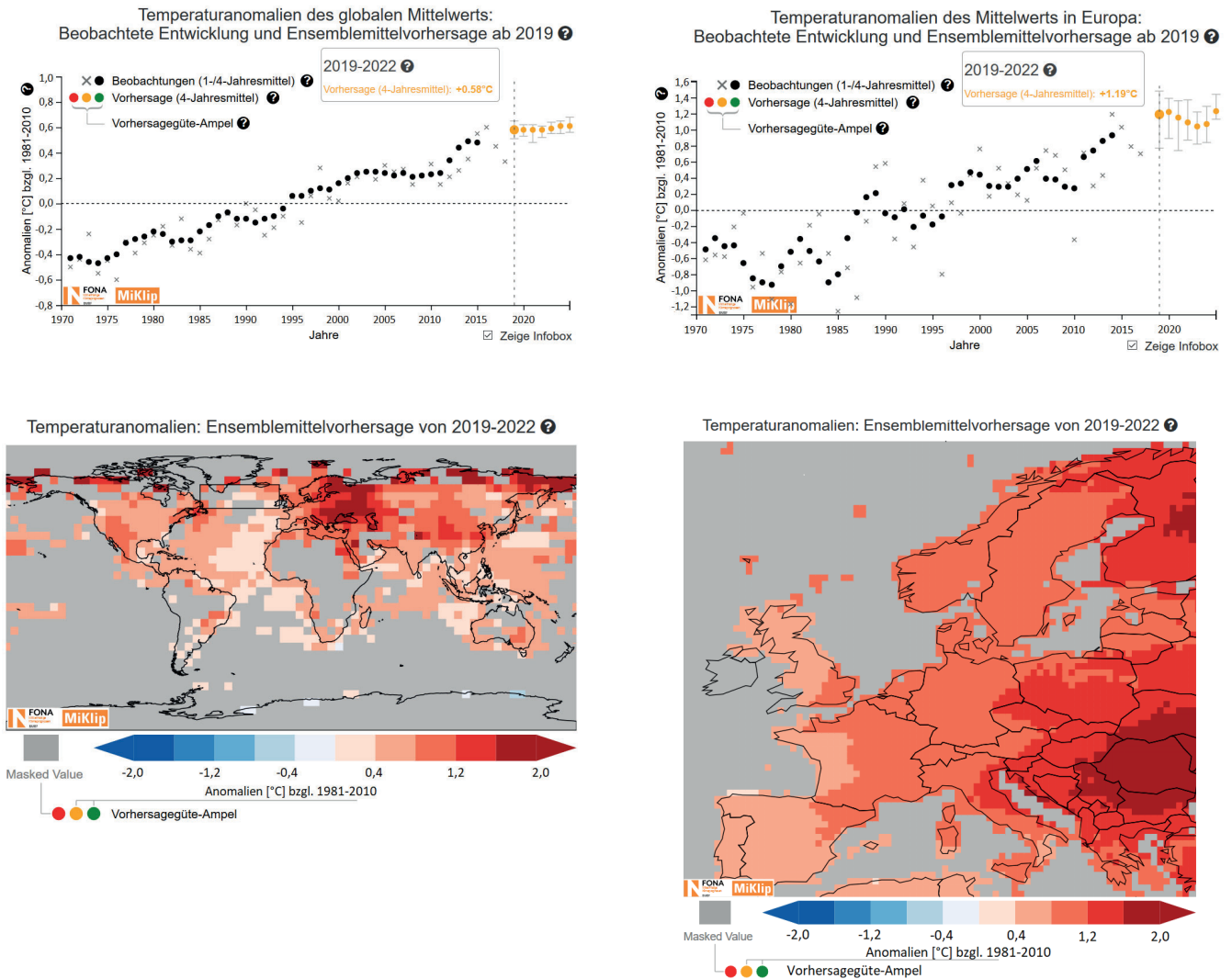


Abb. 6-2: (oben) MiKlip-Vorhersage der globalen Mitteltemperatur (links) und der Mitteltemperatur in Europa (rechts) für den Zeitraum 2019 bis 2028. Gezeigt sind 4-Jahresmittelwerte der Temperaturabweichungen sowie deren Streubreite. Gezeigt sind ferner Beobachtungsdaten ab 1970 für jährlich gemittelte 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

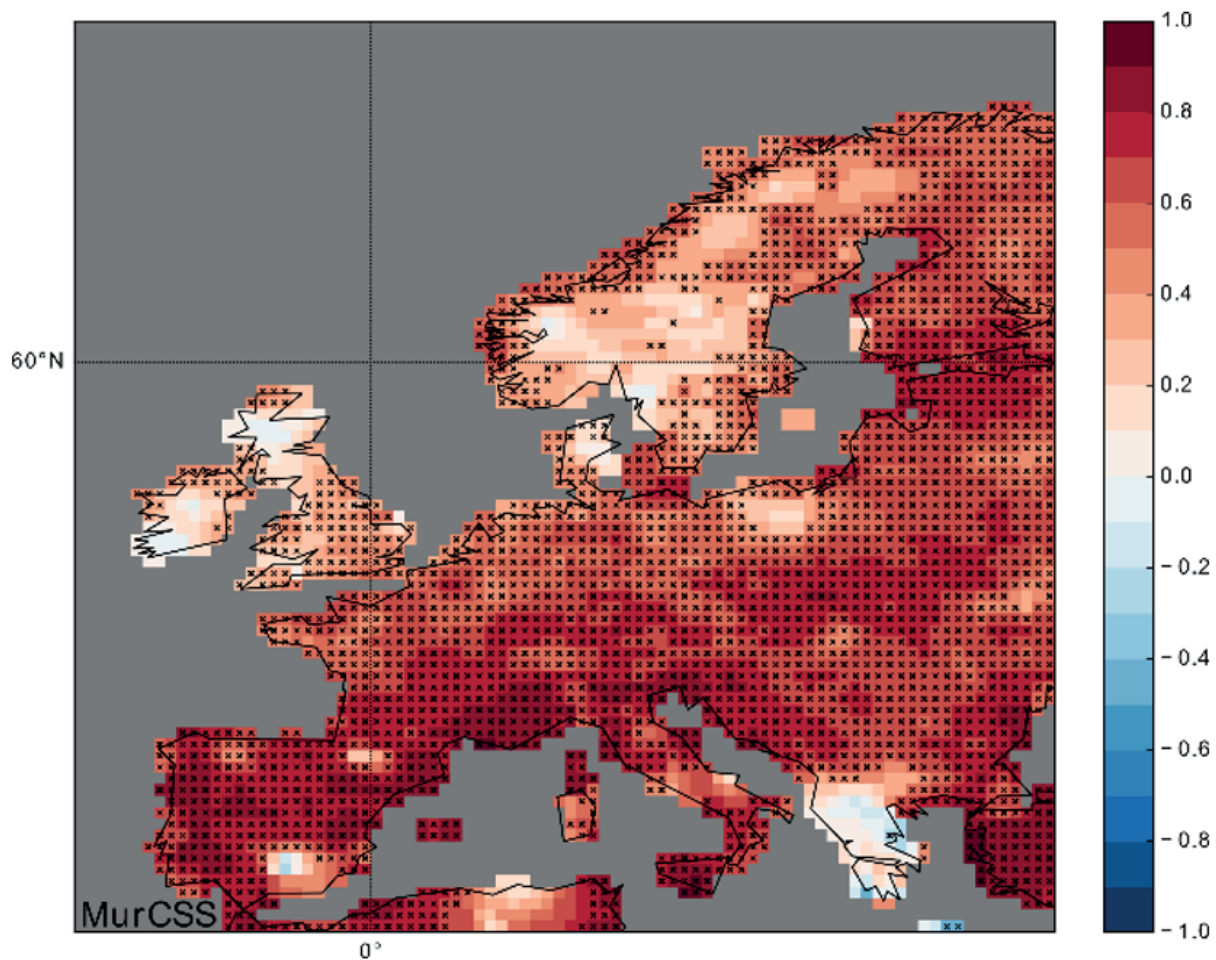


Abb. 6-3: Vorhersagegüte des regionalen Vorhersagesystems für die durchschnittliche Tageshöchsttemperatur im Sommer (JJA) für die Vorhersagejahre 2 bis 5, und für den Zeitraum 1965 bis 2011. Gezeigt ist die Vorhersagegüte unter Einbezug der Rekalibrierung. Dabei beschreiben positive/negative Werte eine 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
iuliiia.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