

Großforschungsprojekte am MPI-M: Kooperationen fördern Klimawissenschaft

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) engagiert sich neben zahlreichen Forschungsprojekten unterschiedlicher Geldgeber in drei Großprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF): in HD(CP)² (High definition clouds and precipitation for advancing climate prediction), MiKlip (Mittelfristige Klimaprognosen) und PalMod (Paläo-Modellierung). Die Projekte HD(CP)² und MiKlip wurden am MPI-M koordiniert, und für PalMod ist einer der drei Sprecher des Projekts aus dem MPI-M.

Das MPI-M arbeitet federführend in diesen Großprojekten, weil es damit seine eigenen Forschungsthemen in einer Weise voranbringen kann, die allein mit Haushaltsmitteln der Max-Planck-Gesellschaft nicht umsetzbar wären. Die Forschungsthemen der Projekte passen sehr gut zu den Leitthemen des MPI-M: Erdsystemmodellierung (HD(CP)²), Untersuchung der Vorhersagbarkeit des Klimas (MiKlip) und Klimaentwicklung auf langen Zeitskalen (PalMod). Insbesondere wird die Entwicklung der Erdsystemmodelle durch die Großprojekte anhand konkreter Aufgaben vorangetrieben. Dies geschieht sehr direkt in HD(CP)², in dem zum Beispiel ultra-hochauflösende Versionen für regionale „Hindcasts“, nachträgliche Vorhersagen für einen bereits vergangenen Zeitraum, entwickelt werden. In MiKlip wird das Modell an gestellte Aufgaben angepasst, und in PalMod soll erstmalig ein kompletter glazialer Zyklus mit Hilfe komplexer Erdsystemmodelle simuliert werden. In den drei Projekten werden Simulationen mit den Erdsystemmodellen auf unterschiedlichen Zeitskalen und mit unterschiedlichen Auflösungen durchgeführt: von einigen Tagen bis zu Zehntausenden von Jahren und von regionaler (hoher) bis zu globaler (niedrigerer) Auflösung.

Die Zusammenarbeit mit der Forschungscommunity innerhalb der Projekte ist wertvoll für das MPI-M, da alle Partner voneinander profitieren und Ressourcen ausgetauscht werden können. Durch die Projektpartner ist es möglich, an Infrastrukturen oder Daten, wie z. B. Beobachtungen, teilzuhaben, die das MPI-M nicht selbst hat. Beispielsweise nutzt HD(CP)² Beobachtungsdaten der Universität Köln, des Deutschen Wetterdiensts (DWD) und der Universität Hohenheim, und MiKlip arbeitet mit einem Evaluationspaket der FU Berlin.

Die Großprojekte

HD(CP)²

Wolken und Niederschlag spielen eine Hauptrolle in der Beantwortung der Frage, wie sich das Klima durch den Einfluss des Menschen verändern wird. Fehlendes Verständnis der physikalischen Vorgänge und zu wenig Computerkapazität haben bisher dazu geführt, dass die Darstellung von Wolken und Niederschlag einen Großteil der Unsicherheit derzeitiger Klimamodelle und deren Vorhersagen darstellt. In HD(CP)² wurde dieses Problem durch die Kombination der Fortschritte in der Modellentwicklung und in den Beobachtungen angegangen. Das Projekt verfolgte die übergeordneten Ziele, die Klimavorhersagen durch bessere Darstellung der Wolken und des Niederschlags in derzeitigen Klimamodellen zu verbessern, die Modellunsicherheit durch eine Abschätzung des Einflusses der durch Wolken/Niederschlag-Prozesse hervorgerufenen Modellfehler zu quantifizieren, Expertenteams, d.h. Gruppen von Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Forschungseinrichtungen, zu etablieren, die zusammen an einer Fragestellung arbeiten, und die Sichtbarkeit deutscher Forschung durch Bündelung und Fokussierung bereits existierender Weltklasseforschung zu erhöhen.

Das Modell ICON des MPI-M lieferte ultra-hochaufgelöste, regionale Hindcasts für Zeiträume und Flächen, die klimatisch relevant sind (Auflösung: 156 m horizontal, 10-50 m vertikal). Zur Evaluation des Modells auf

diesen Skalen sind hochaufgelöste Beobachtungen nötig, die in der zweiten Förderperiode auf den tropischen Atlantik (Barbados) und Nordatlantik ausgeweitet wurden (Beobertungskampagne NARVAL-II mit MPI-Beteiligung). Diese Beobachtungen sowie die ICON-Modellergebnisse sollen genutzt werden, um die aktuellen Fragestellungen in Bezug auf Wolken und Niederschlag zu beantworten.

Ergebnisse:

Am Ende der ersten Förderphase stand das hochauflösende Modell ICON-LEM zur Verfügung, das MPI-M war federführend in seiner Entwicklung. Mittlerweile ist es ein Community-Modell, d. h. die wissenschaftliche Gemeinschaft kann es ebenfalls benutzen. Die Arbeiten im Projekt legten den Grundstein für die Modellierungsstrategie des MPI-M im Bereich „Sapphire“ (hochaufgelöste Modellierung des gekoppelten Klimasystems, um konvektive Stürme in den Tropen und mesoskalige Ozeanwirbel in den Extratropen explizit darstellen zu können) und für die DYAMOND-Initiative (<https://www.esiwace.eu/>).

Die Datenbank SAMD (Standardized Atmospheric Measurement Data archive) am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) ist ein wichtiges Werkzeug, welches HD(CP)² hervorgebracht hat. Das Ziel dieses neuen Datenarchivs ist es, sowohl Modellierern als auch den Lieferanten der Beobachtungsdaten einen leichten Zugang zu einem Beobachtungsdatenarchiv bereitzustellen. SAMD hält Beobachtungsdaten im Climate Forecast (CF) Conventions Format bereit und macht sie der breiteren Öffentlichkeit zugänglich. Die Daten werden standardisiert und geprüft angeboten, und Metadaten unterschiedlicher Instrumente werden durch „open access“ der Forschungscommunity verfügbar gemacht.

Die projekteigene, technisch sehr aufwändige Observationskampagne HOPE (HD(CP)² Observational Prototype Experiment) hat 2013 zeitlich und räumlich hochaufgelöste Datensätze in einem zweimonatigen Feldexperiment in Jülich und später Melpitz erhoben. Dabei konzentrierte sich das Experiment auf die Erfassung der Entstehung von Wolken und Niederschlag in der konvektiven atmosphärischen Grenzschicht. Die Datensätze dienen u. a. dazu, das Modell ICON zu evaluieren, aber auch um Prozesse zwischen Landoberfläche und der atmosphärischen Grenzschicht zu untersuchen.

Durch einen engen Austausch hat HD(CP)² die Communities der Modellierer und Beobachter besser miteinander vernetzt.

MiKlip

Der Bedarf an verlässlichen Aussagen zu Klimaentwicklungen im Bereich von Jahren bis hin zu Jahrzehnten wächst stetig, da Planungshorizonte vor allem in der Wirtschaft, aber auch in Politik und Gesellschaft, in der Regel in der Größenordnung von 10 Jahren angesiedelt sind. Sie sind die wesentliche Voraussetzung für eine Verbesserung der Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft an das zukünftige Klima sowie einer nachhaltigen Entwicklung der Wirtschaft in Einklang mit den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen. Das Projekt MiKlip stellte sich diesen Herausforderungen, mit dem besonderen Fokus auf Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen und auf die Entwicklung eines vor-operationellen Vorhersagsystems für dekadische Klimaprognosen.

Auf Zeitskalen von einigen Jahren bis hin zu Jahrzehnten (Dekaden) hängt die Verteilung der Klimagrößen nicht nur von den menschengemachten Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre ab, sondern auch von der natürlichen Variabilität des Klimasystems. Die natürliche Variabilität beruht auf externen Antrieben wie den Schwankungen der einfallenden Sonnenstrahlung oder auf Vulkanen sowie der internen Variabilität des gekoppelten Klimasystems. Die interne Variabilität ist überwiegend chaotisch, aber in der dekadischen Zeitdimension gibt es deutliche Hinweise auf ein längerfristiges „Gedächtnis“ einzelner interner Prozesse.

Das Gedächtnis eben dieser langsamen Prozesse versucht die dekadische Klimavorhersage auszunutzen. Eine zentrale Bedeutung kommt hierbei der Trägheit des Ozeans und seiner Schlüsselprozesse zu. Daher werden insbesondere Informationen wie etwa Temperaturen und Salzgehalte des Ozeans vorgegeben und für die Vorhersagen nutzbar gemacht. Diese Anfangsbedingungen sind für dekadische Prognoserechnungen entscheidend; für langfristige Projektionen sind sie unerheblich.

Zwar wurden schon vor Beginn von MiKlip vielversprechende wissenschaftliche Abhandlungen in einzelnen Bereichen der dekadischen Klimavorhersagen verfasst, diese waren jedoch auf einzelne Aspekte der involvierten Forschungsgruppen ausgerichtet. Insgesamt gab es nicht mehr als drei Publikationen, sodass eine zielgerichtete Synthese so wichtiger Fragestellungen, wie zur Initialisierung, Evaluation und Prozessbezug, nicht möglich war. MiKlip setzte genau hier an, und entwickelte ein koordiniertes Programm zur systematischen Entwicklung und Evaluierung eines nationalen dekadischen Klimasystems auf globaler und regionaler Ebene für die operative Anwendung. Die Forschungsfragen in MiKlip waren grob den vier größeren Herausforderungen zugeordnet: der Initialisierung und Bereitstellung eines Ensembles von dekadischen Klimavorhersagen, dem zunehmenden Verständnis von Prozessen relevant für einen Zeithorizont von 10 Jahren, die für die dekadische Vorhersagbarkeit des Klimas von Bedeutung sind, der Regionalisierung der dekadischen Klimavorhersagen, und der Evaluation und Verifikation der dekadischen Klimavorhersagen. Eine Synthese bündelt die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung eines zentralen Vorhersage- und Evaluierungssystems.

In der ersten Phase hat MiKlip zunächst wichtige Beiträge mit Bezug zur Erforschung der Grundlagen der dekadischen Vorhersagbarkeit geleistet und ein international wettbewerbsfähiges dekadisches Klimavorhersagesystem entwickelt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen war das übergeordnete Ziel für die zweite Förderphase von MiKlip (MiKlip II), das dekadische Klimavorhersagesystem nicht nur zu verbessern, sondern auch für den operativen Betrieb vorzubereiten. Die Ergebnisse dieser zweiten Phase sollen hier im Fokus stehen.

Ergebnisse:

Die Grundlage des Klimavorhersagesystems ist das gekoppelte Erdsystemmodell des MPI-M (MPI-ESM). Es berücksichtigt nicht nur die klassischen Klimakomponenten Atmosphäre-Ozean-Meereis, sondern weitere Erdsystemkomponenten wie Ozean-Land-Biochemie, und ist an eine 5-Schichten Landkomponente gekoppelt. MiKlip II entwickelte eine hochaufgelöste Version des MPI-ESM (MPI-ESM-HR) für die dekadischen Klimavorhersagen und wird als Basismodell für das „Climate Model Intercomparison Project Phase 6“ (CMIP6) und dem WCRP DCCP (World Climate Research Program Decadal Climate Prediction Panel) genutzt (neben einer weiteren niedrigeren Auflösung des MPI-ESM). Gegenüber seinen Vorgängerversionen zeichnet sich MPI-ESM-HR durch eine Verdopplung der Auflösung der Atmosphäre (~100 km) aus. Diese Weiterentwicklung verbessert insbesondere Schlüsselprozesse in den mittleren Breiten, wie etwa blockierende Wetterlagen und die Entstehung und Verstärkung der Sturmszugbahnen, und erhöht deren Vorhersagegüte signifikant auf dekadischen Zeitskalen.

Die dekadischen Klimavorhersagen des MiKlip-Systems weisen im Vergleich zur Klimatologie eine signifikante Verbesserung der Vorhersagen auf, beispielsweise für die Oberflächentemperaturen. Diese Verbesserung wird zwar noch durch den allgemeinen Temperaturanstieg geprägt, die geeignete Initialisierung der natürlichen Klimavariabilität kann jedoch regional zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersagegüte führen. Ein deutliches Plus ist insbesondere über dem Nordatlantik und auch für das europäische Kontinentalklima zu finden. Weitere Fortschritte in der Vorhersage wurden aber auch für andere Größen erzielt, wie etwa für den Niederschlag und Dürren, für dynamische Schlüsselgrößen wie Sturmszugbahnen über Europa und die Quasi-Biennale Oszillation in den Tropen, sowie für für das Erdsystem relevante Parameter wie die Kohlenstoffaufnahme im Ozean. Weiterhin sind erste Erfolge bei der Vorhersage von extremen Temperatur-

ereignissen über Europa zu verzeichnen. Die Vorhersagen werden seit 2017 auf der Projektseite von MiKlip veröffentlicht (<https://www.fona-miklip.de/1/dekadische-vorhersage/vorhersagenarchiv/dekadische-klima-vorhersage-fuer-2018-2027/>).

Ein besonderes Ergebnis — und bisher einmalig — ist die erfolgreiche Übergabe des geprüften Vorhersagesystems an den Deutschen Wetterdienst (DWD) für die operationelle Nutzung. Es ist jetzt Bestandteil der „seamless predictions“-Strategie des DWD, die sowohl operationelle Klimavorhersagen im Monats- und Jahreszeitenbereich als auch dekadische Vorhersagen und Klimaprojektionen berücksichtigt (https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimavhs/klimavhs_node.html). Darüber hinaus sind die dekadischen Klimavorhersagen nun Bestandteil einer internationalen Initiative des WCRP, der World Meteorological Organization (WMO) und des Global Framework on Climate Service (GFCS) zur Bereitstellung eines operativen Multimodellsystems für dekadische Klimavorhersagen.

PalMod

PalMod untersucht das Klimasystem und seine Variabilität im letzten Eiszeitzyklus mit komplexen Erdsystemmodellen. Das Ziel ist, eine durchlaufende (transiente) Simulation eines ganzen glazialen Zyklus mit Hilfe eines komplexen Erdsystemmodells durchzuführen, die die Interaktion der relevanten physikalischen und biogeochemischen Prozesse im Erdsystem inklusive der eisbedeckten Regionen beschreibt. Mit den Ergebnissen aus den Modellstudien kann die Belastbarkeit von langfristigen Klimaprojektionen besser abgeschätzt und die Aussagekraft zukünftiger Klimasimulationen entsprechend verbessert werden.

Vor 20.000 Jahren war die globale Mitteltemperatur etwa 4 bis 5 Grad niedriger als heute. Auf Nordamerika und Skandinavien lagen gigantische Eisschilde, so dass der Meeresspiegel um ca. 120 m niedriger war als heute. Die atmosphärische Konzentration von CO₂ war um mehr als ein Drittel geringer gegenüber dem präindustriellen Wert. Diese Eisschilde sind innerhalb von 10.000 Jahren verschwunden, und das Klima hat sich erwärmt. Den Übergang vom Wetter zu den langen Klimafluktuationen über viele Jahrhunderte und Jahrtausende direkt zu berechnen, stellt die Klimamodellierer vor große Herausforderungen. Bisher wurden Simulationen mit komplexen Klimamodellen nur über mehrere Jahrhunderte durchgeführt, in sehr wenigen Fällen über ein paar Jahrtausende

Für längere Rechnungen müssen die Modelle erheblich schneller gemacht und dafür neue Algorithmen entwickelt werden. Es fehlen den Modellen zudem noch potentiell wichtige physikalische und biogeochemische Prozesse. Eisschilde mit ihren langen Zeitskalen werden bisher bei den üblichen Simulationen als konstant vorgeschrieben. Durch eine interaktive Kopplung mit dynamischen Eisschildmodellen wird die Variabilität auf sehr langen Zeitskalen verstärkt. Und es wird möglich, in den Erdsystemmodellen die Rückkopplungen zwischen kontinentalen Eismassen und der großskaligen Ozeanzirkulation zu untersuchen. Außerdem fehlen den jetzigen Modellen wichtige Wechselwirkungsprozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs mit dem Meeresspiegel und dem Inlandeis, die möglicherweise die schnellen und asynchronen Änderungen im atmosphärischen Kohlendioxid und Methan während abrupter Klimaänderungen erklären könnten. Auch der Effekt von Kohlenstoff und Methan, gespeichert im Permafrost an Land und als Gashydrat in marinen Sedimenten, der die erdbahnabhängige Klimavariabilität verstärkt, ist in den Erdsystemmodellen noch nicht enthalten.

PalMod soll diese Lücken im Wissen und in der Modellierung schließen. Zur Erreichung dieser wissenschaftlichen Ziele ist ein Zeitraum von 10 Jahren angedacht. Zurzeit beginnt der zweite Abschnitt.

Bisherige Ergebnisse:

In der ersten, vierjährigen Projektphase lag der Fokus auf der technischen Modellentwicklung sowie auf der Entgletscherung, d.h. dem Abschmelzen der großen Landeis Massen. Als Testfall wurde ein transientes Entgletscherungsexperiment durchgeführt, mit einigen weltweit ersten Neuerungen. Die Land-See-Maske und die Flussverläufe wurden interaktiv angepasst, abhängig von der Topographie, der Ausdehnung der Eisschilde und der Änderung des Meeresspiegels. Es wurde ein interaktives Methanmodul mit terrestrischen Methanemissionen aus einem Landoberflächenmodell integriert; ein Modell für die Methansenke wurde gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Chemie entwickelt, um die atmosphärische Methankonzentration in transienten Experimenten bestimmen zu können. Die Ergebnisse dieses transienten Experiments sind noch nicht veröffentlicht, zeigen aber einige Klimacharakteristika, die in den Paläodaten beobachtet wurden, wie das Ergrünen der Sahel-/der Sahararegion im frühen Holozän und die Verdopplung des atmosphärischen Methans zwischen dem Letzten Glazialen Maximum und der vorindustriellen Zeit.

Mit den Neuerungen im Erdsystemmodell konnten auch Simulationen zu Heinrich-Ereignissen — Klimaschwankungen in der Eiszeit — durchgeführt werden. Es konnte gezeigt werden, dass diese Ereignisse durch die Abfolge von zwei Mechanismen verursacht wurden: durch das Kalben von Eisbergen und durch Höhenverluste des Laurentischen Eisschildes. Das Kalben der Eisberge beeinflusste die Ozeanzirkulation, und die Höhenverluste des Laurentischen Eisschildes hatten Auswirkungen auf die Atmosphärenzirkulation. Durch die Verwendung der neuartigen Modellkonfiguration konnte das Zusammenspiel der Effekte untersucht und erstmals die Abfolge der beiden Effekte in einer Simulation beobachtet werden.

In der nun beginnenden zweiten Phase von PalMod wird der Fokus der Untersuchungen auf dem Beginn des Glazials liegen. Weiterhin sollen Dansgaard-Oeschger Ereignisse — rasante Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit — untersucht werden, die in Beziehung zu den Heinrich-Ereignissen stehen. Ein weiteres Ziel ist die Simulation der Biogeochemie bzw. des Kohlenstoffkreislaufes während der Deglaziation.

Fazit

Die Koordination und Beteiligung an Großforschungsprojekten bringen die Forschung des MPI-M erfolgreich voran. Die Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern führt zu einer guten Vernetzung in der Forschungsgemeinschaft und hat Vorteile für alle Partner. Modellierer und Messende arbeiten stärker zusammen. Die Modellentwicklung in den beschriebenen Projekten führt zu zahlreichen Innovationen im Erdsystemmodell des MPI-M. Die unten aufgeführte Liste der Veröffentlichungen zeigt eindrucksvoll die erreichten Forschungsergebnisse.

Mehr Information:

Projektwebseite HD(CP)2: <http://hdcp2.eu/index.php?id=3744>

Projektwebseite MiKlip: <https://www.fona-miklip.de/>

Projektwebseite PalMod: <https://www.palmod.de/home>

Kontakte:

HD(CP)²

Prof. Dr. Bjorn Stevens
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 422 (Assistentin Angela Gruber)
E-Mail: bjorn.stevens@mpimet.mpg.de

MiKlip

Prof. Dr. Jochem Marotzke
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 311 (Assistentin Kornelia Müller)
E-Mail: jochem.marotzke@mpimet.mpg.de

Dr. Sebastian Hettrich
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 310
E-Mail: sebastian.hettrich@mpimet.mpg.de

PalMod

Prof. Dr. Martin Claußen
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 226 (Assistentin Sylvia Houston)
E-Mail: sylvia.houston@mpimet.mpg.de

Veröffentlichungen:

HD(CP)²

Dipankar, A., B. Stevens, R. Heinze, C. Moseley, G. Zängl, M. Giorgetta, and S. Brdar (2015): Large eddy simulation using the general circulation model ICON. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 07, doi:10.1002/2015MS000431.

Heinze, R., Moseley, C., Böske, L. N., Muppa, S. K., Maurer, V., Raasch, S., and Stevens, B. (2017): Evaluation of large-eddy simulations forced with mesoscale model output for a multi-week period during a measurement campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 7083–7109, doi:10.5194/acp-17-7083-2017.

Heinze, R. et al. (2016): Large-eddy simulations over Germany using ICON: A comprehensive evaluation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.2947

Heinze, R., Moseley, C., Böske, L. N., Muppa, S., Maurer, V., Raasch, S., and Stevens, B. (2016): Evaluation of large-eddy simulations forced with mesoscale model output for a multi-week period during a measurement campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 7083–7109, <https://doi.org/10.5194/acp-17-7083-2017>

Klocke, D., Brueck, M., Hohenegger, C., & Stevens, B. (2017): Rediscovery of the doldrums in storm-resolving simulations over the tropical Atlantic. *Nature Geoscience*, 10(12), 891, doi:10.1038/s41561-017-0005-4.

- Lammert, A. et al. (2019) A Standardized Atmospheric Measurement Data Archive for Distributed Cloud and Precipitation Process-Oriented Observations in Central Europe. *BAMS*, 100 (7). <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/BAMS-D-18-0174.1>
- Macke, A. et al (2017) The HD(CP)2 Observational Prototype Experiment (HOPE) – an overview. *EGU, Atmos. Chem. Phys.*, 17, 4887-4914. <https://doi.org/10.5194/acp-17-4887-2017>
- Moseley, C., Henneberg, O., & Haerter, J. O. (2019). A statistical model for isolated convective precipitation events. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 360-375. doi:10.1029/2018MS001383.
- Moseley, C., Hohenegger, C., Berg, P., Haerter, J.O. (2016): Intensification of convective extremes driven by cloud-cloud interaction. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2789.
- Muppa, S.K., A. Behrendt, H.-S. Bauer, K. Warrach-Sagi, F. Späth, N. Kalthoff, V. Maurer, A. Wieser, R. Heinze, C. Moseley, R.A.J. Neggers, P. Siligam, and V. Wulfmeyer (2018): Characterizing turbulent processes in the convective boundary layer: Evaluation of large eddy simulations with high-resolution lidar observations. *submitted to QJRMSS*.
- Nam, C., Kühne, P., Salzmänn, M., & Quaas, J. (2018). A prospectus for constraining rapid cloud adjustments in general circulation models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 2080–2094. <https://doi.org/10.1029/2017MS001153>
- Nam, C., Quaas, J., Neggers, R., Drian, S. L., and Isotta, F. (2014): Evaluation of boundary layer cloud parameterizations in the ECHAM5 general circulation model using CALIPSO and CloudSat satellite data. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6 (2), 300-314, doi:10.1002/2013MS000277.
- Nam, C., and Quaas, J. (2013): Geographically versus dynamically defined boundary layer cloud regimes and their use to evaluate general circulation model cloud parameterizations. *Geophys. Res. Lett.*, 40(18), 4951-4956, doi:10.1002/grl.50945.
- Rosch, J., Heus, T., Brueck, M., Salzmänn, M., Mülmenstädt, J., Schlemmer, L. and Quaas, J. (2015): Analysis of diagnostic climate model cloud parametrizations using large-eddy simulations. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 141: 2199–2205. doi: 10.1002/qj.2515.
- Senf, F., D. Klocke, and M. Brueck (2018): Size-resolved evaluation of simulated deep tropical convection. *Mon. Wea. Rev.*, 0, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0378.1>
- van Stratum, B. J. H. and B. Stevens (2015): The influence of misrepresenting the nocturnal boundary layer on idealized daytime convection in large-eddy simulation. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 7, 423-436, doi: 10.1002/2014MS000370.
- Voigt, A., R. Pincus, B. Stevens, S. Bony, O. Boucher, N. Bellouin, A. Lewinschal, B. Medeiros, Z. Wang, and H. Zhang (2017): Fast and slow shifts of the zonal mean intertropical convergence zone in response to an idealized anthropogenic aerosol. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 9, 870–892, doi: 10.1002/2016MS000902.

MiKlip

Boer, G. J., D. M. Smith, C. Cassou, F. Doblas-Reyes, G. Danabasoglu, B. Kirtman, Y. Kushnir, M. Kimoto, G. A. Meehl, R. Msadek, W. A. Mueller, K. Taylor, and F. Zwiers (2016): The Decadal Climate Prediction Project. *GMD*, doi:10.5194/gmd-2016-78

Kruschke, T., H. W. Rust, C. Kadow, W. A. Müller, H. Pohlmann, G. C. Leckebusch, U. Ulbrich, (2015): Probabilistic evaluation of decadal prediction skill regarding Northern Hemisphere winter storms. *Met. Zeitschrift*. doi:10.1127/metz/2015/0641

Kushnir, Y., A. A. Scaife, R. Arritt, G. Balsamo, G. Boer, F. Doblas-Reyes, E. Hawkins, M. Kimoto, R. Kumar Kollu, A. Kumar, D. Matei, K. Matthes, W. A. Müller, T. O’Kane, J. Perlwitz, S. Power, M. Raphael, A. Shimpou, D. Smith, M. Tuma, and B. Wu, (2019): Towards Operational Predictions of the Near-Term Climate. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/s41558-018-0359-7

Li, H., T. Ilyina, W. A. Müller and F. Sienz, 2016: Decadal predictions of the North Atlantic CO₂ uptake. *Nature Communications*. doi:10.1038/ncomms11076

Li, H., Ilyina, T., Müller, W. A., Landschützer, P. (2019): Predicting the variable ocean carbon sink. *Science Advances*, 5, eaav6471. doi: 10.1126/sciadv.aav6471

Marotzke, J., W. A. Müller, F. S. E. Vamborg, P. Becker, U. Cubasch, H. Feldmann, F. Kaspar, C. Kottmeier, C. Marini, I. Polkova, K. Prömmel, H. W. Rust, D. Stammer, U. Ulbrich, C. Kadow, A. Köhl, J. Kröger, T. Kruschke, J. G. Pinto, H. Pohlmann, M. Meyers, M. Schröder, F. Sienz, C. Timmreck, M. Ziese, (2016): MiKlip - a National Research Project on Decadal Climate Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, 2379-2394. doi:10.1175/BAMS-D-15-00184.1

Müller, W. A., J. Baehr, H. Haak, J. H. Jungclaus, J. Kröger, D. Matei, D. Notz, H. Pohlmann, J.-S. von Storch, and J. Marotzke, (2012): Forecast skill of multi-year seasonal means in the decadal prediction system of the Max Planck Institute for Meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L22707, doi:10.1029/2012GL053326.

Müller, W. A., J. H. Jungclaus, T. Mauritsen, J. Baehr, M. Bittner, R. Budich, F. Bunzel, M. Esch, R. Ghosh, H. Haak, T. Ilyina, T. Kleine, L. Kornblueh, H. Li, K. Modali, H. Pohlmann, E. Roeckner, I. Stemmler, F. Tian, J. Marotzke, (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

Paxian, A., M. Ziese, F. Kreienkamp, K. Pankatz, S. Brand, A. Pasternack, H. Pohlmann, K. Modali, and B. Früh, (2018): User-oriented global predictions of the GPCC drought index for the next decade. *Met. Zeitschrift*, 28, 3-21. doi:10.1127/metz/2018/0912

Pohlmann, H., W. A. Müller, K. Kulkarni, M. Kameswarrao, D. Matei, F. S. E. Vamborg, C. Kadow, S. Illing, and J. Marotzke, (2013): Improved forecast skill in the tropics in the new MiKlip decadal climate predictions. *Geophys. Res. Lett.*, 40, pp. 5798-5802.

Schuster, M., J. Grieger, A. Richling, T. Schartner, S. Illing, C. Kadow, W. A. Müller, H. Pohlmann, and U. Ulbrich (2019): Improvement in the decadal prediction skill of the northern hemisphere extra-tropical circulation through increased model resolution. *Submitted to ESD*

PalMod

Meccia, V.L., and U. Mikolajewicz (2018): Interactive ocean bathymetry and coastlines for simulating the last deglaciation with the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM-v1.2). *EGU, Geosci. Model Dev.*, 11, 4677–4692. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4677-2018>

Riddick, T., V. Brovkin, S. Hagemann, and U. Mikolajewicz (2018): Dynamic hydrological discharge modelling for coupled climate model simulations of the last glacial cycle: the MPI-DynamicHD model version 3.0. *EGU, Geosci. Model Dev.*, 11, 4291–4316. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4291-2018>

Ziemen, F., Kapsch, M.-L., Klockmann, M., & Mikolajewicz, U. (2019). Heinrich events show two-stage climate response in transient glacial simulations. *Climate of the Past*, 15, 153-168. doi:10.5194/cp-15-153-2019.