Monsoon Abschlussbericht

Bjorn Stevens (MPI-M), Ulrike Burkhardt (DLR), Lukas Kluft (MPI-M), und Chao Li (MPI-M)

Juli 2024

Gefördert durch das BMBF Programm:
The changing monsoon circulation in global storm-resolving simulations - Monsoon

FZK: 01LP1927A (MPI-M), 01LP1927B (DKRZ),

01LP1927C (DLR)

Laufzeit des Vorhabens: Dezember 2019 – Dezember 2023 (konstenneutral verlängert)

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

(Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.)

Bjorn Stevens (coordinator), Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, +49 40 41173421, bjorn.stevens@mpimet.mpg.de

Ulrike Burkhardt, DLR-Institut für Physik der Atmosphäre, Münchener Straße 20 82234 Oberpfaffenhofen-Wessling, +49 81 53282561, Ulrike.Burkhardt@dlr.de

Lukas Kluft, Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, +49 40 41173242, lukas.kluft@mpimet.mpg.de

Chao Li, Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, +49 40 41173164, chao.li@mpimet.mpg.

Einleitung

Das Monsunprojekt ist eine bahnbrechende Initiative, die technologische Innovation mit Klimawissenschaft verbindet, um die dringenden Herausforderungen der globalen Erwärmung und deren Auswirkungen auf die Monsunsysteme anzugehen. Im Kern wird das Projekt von dem Bestreben angetrieben, die Rechenleistung chinesischer und deutscher Supercomputer nutzbar zu machen und insbesondere das ICON-Modell (Hohenegger et al., 2023) auf die fortschrittlichen Supercomputer zu übertragen. Das Projekt zielt darauf ab, hochauflösende, sturmauflösende Simulationen des borealen Sommermonsuns zu ermöglichen, die sowohl die aktuellen Bedingungen als auch künftige Projektionen unter einem signifikanten Erwärmungsszenario abdecken. Der Umfang des Projekts umfasst auch Simulationen für extreme Wetterereignisse in Deutschland, was seine Relevanz und Anwendung erweitert.

Dieser Bericht befasst sich mit den technischen Feinheiten und Erfolgen, die mit der Durchführung von ICON-Simulationen auf verschiedenen Supercomputer-Architekturen verbunden sind, und stellt erste wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Monsunsimulationen vor. Anlässlich der extremen Wetterereignisse in Deutschland und China wurde der Schwerpunkt des Projekts erweitert und es wurden Simulationen zu diesen Ereignissen durchgeführt. Die Sommermonsunsimulationen werden für zwei Zeiträume durchgeführt, für die Gegenwart und für eine projizierte Zukunft (2070) unter einem starken Erwärmungsszenario. Als Teil des Projekts zielen kurze Simulationen, ebenfalls auf einem gröberen 5km-Gitter, auf die Entwicklung von Methoden und Metriken für die optimale Konfiguration der Simulationen ab. Dazu gehören die Einschränkung mikrophysikalischer Wolkenprozesse und die intelligente Auswahl vorgeschriebener Muster der Meeresoberflächentemperaturen in einer Weise, die der interannuellen und intersaisonalen Variabilität am besten Rechnung trägt. Für beide Epochen führen wir Mini-Ensembles durch, die jeweils aus drei Mitgliedern bestehen und mit einer Initialisierung am 1. Mai beginnen und bis zum 30. September ihrer vorgegebenen SST laufen. Es wurden bereits 45 Monate lang Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen werden über das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) verbreitet.

Ein bemerkenswerter Aspekt dieser Simulationen ist die Fokussierung auf die komplizierte Beziehung zwischen Monsunniederschlag und Meeresoberflächentemperaturmustern, wodurch das Potenzial globaler sturmauflösender Modelle zur Verbesserung der Vorhersagbarkeit von Monsunniederschlag und extremen Niederschlagsereignissen deutlich wird. Darüber hinaus haben wir zwei "Monsun-Extrem"-Simulationen durchgeführt, um die extremen Niederschlags- und Überschwemmungsereignisse in Ahrweiler (Deutschland) und Henan (China) im Juli 2021 darzustellen. Mit diesen Simulationen wollen wir untersuchen, inwieweit Starkniederschlagsereignisse vorhersehbar sind, wie weit im Voraus ein solches Ereignis vorhergesagt werden kann und ob wir einige frühere Signale in der Atmosphäre erkennen können, bevor das Ereignis eintritt.

Das Monsunprojekt hat bemerkenswerte Fortschritte bei der Analyse der DYAMOND-Simulationen gemacht, insbesondere im Hinblick auf die Darstellung der Eisphase und ihrer vertikalen Verteilung in den Tropen. Diese Simulationen wurden sorgfältig anhand von Beobachtungsdaten ausgewertet und mit den ICON-DWD-Simulationen mit 13 km Auflösung sowie mit anderen im Rahmen des Monsunprojekts durchgeführten Simulationen verglichen. Unterstützt durch Beobachtungsdaten bieten diese Analysen eine solide Grundlage für zukünftige Verbesserungen der Mikrophysik des ICON-Modells mit dem Ziel, die Darstellung der tropischen Konvektion zu verbessern.

Mit dem Fortschreiten des Monsunprojekts wird eine erste Bewertung der Simulationen vorgenommen, und es wird angestrebt, die Ergebnisse einer breiteren Forschungsgemeinschaft zugänglich zu machen. Diese Initiative trägt nicht nur zu einem besseren Verständnis der Monsundynamik im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung bei, sondern unterstreicht auch die Bedeutung der internationalen Zusammenarbeit und der technologischen Innovation bei der Bewältigung der komplexen Herausforderungen der Klimawissenschaft.

Forschung am Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M)

1 Kurzdarstellung (MPI-M)

Seit Beginn der Industrialisierung sind die globalen Temperaturen um mehr als 1°C gestiegen. Diese Erwärmung ist vor allem auf dem Land zu beobachten, mit erheblichen Veränderungen in Nord- und Westafrika, und erstreckt sich über Eurasien bis nach Nordchina, wo die Temperaturen seit 1900 um 2°C bis 3°C gestiegen sind. Thermodynamische Prinzipien legen nahe, dass unter konstanten Bedingungen die Niederschlagsextreme mit der Erwärmung überproportional ansteigen (um $6°C^{-1}$ bis $7\%°C^{-1}$). Folglich ist mit einem Anstieg der Starkniederschlagsereignisse um fast 20 % zu rechnen, der auf die beobachtete Erwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Basis (Ende des 19. Jahrhunderts) zurückzuführen ist. Diese thermodynamische Skalierung deutet darauf hin, dass bei einer Verdoppelung der Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten, wie sie in den derzeitigen Emissionsszenarien prognostiziert wird, eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse um bis zu 40 % im Vergleich zu den vorindustriellen Werten zu erwarten wäre.

Beobachtungsstudien deuten jedoch darauf hin, dass die Bedingungen möglicherweise nicht konstant bleiben. Bemerkenswerte Forschungsarbeiten (Lenderink und van Meijgaard, 2008; Lenderink et al., 2017) haben gezeigt, dass die beobachteten Niederschlagsextreme mit doppelt so hohen Raten zunehmen könnten, wie sie durch einfache thermodynamische Skalierung vorhergesagt werden. Sollten sich diese Erkenntnisse bewahrheiten, könnte sich die Intensität extremer Niederschlagsereignisse in den nächsten Jahrzehnten im Vergleich zum vorindustriellen Ausgangszustand verdoppeln, insbesondere in wärmeren Landregionen. Solche Vorhersagen sind jedoch weitgehend spekulativ, da die Vorhersagefähigkeiten durch erhebliche Mängel in den derzeit für künftige Klimaprojektionen verwendeten globalen Modellen begrenzt sind. Diese Modelle haben vor allem Probleme mit der Vorhersage von Niederschlagsänderungen, insbesondere auf regionaler Ebene und in den Tropen (Stevens und Bony, 2013).

Im Monsun-Projekt haben wir alle geplanten Simulationen sowohl für das "Monsun-Ensemble" als auch für die "Monsun-Extreme" unter Verwendung des JUWELS-Booster-Clusters am JSC erfolgreich abgeschlossen. Das "Monsun-Ensemble" besteht aus 14 Simulationen, die die Monsunzeit von April bis Oktober abdecken, jeweils mit einer globalen Gitterauflösung von 5 km. Diese Simulationen, die mit bestimmten Ozean-Randbedingungen durchgeführt wurden, um verschiedene Klimaprojektionen widerzuspiegeln, sollen einen umfassenden Überblick über das Verhalten des Monsuns geben.

Darüber hinaus haben wir zwei "Monsun-Extrem"-Simulationen durchgeführt, um speziell extreme Wetterereignisse in Ahrweiler, Deutschland, und Henan, China, im Juli 2021 zu untersuchen. Diese Simulationen wurden auf einem feineren 2,5 km-Gitter durchgeführt, um die Details dieser Extremereignisse zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind entscheidend für das Verständnis der Fähigkeit des Modells, Unwetterphänomene darzustellen, und sie werden direkt zur Verbesserung der Interpretation des breiteren "Monsun-Ensembles" verwendet.

Bei unseren Simulationen kommt ein neuartiges Klimamodell zum Einsatz, das besonders effektiv bei der Darstellung von Niederschlagsmustern ist. Dieses Modell ermöglicht eine genauere Vorhersage der Monsunentwicklung unter zukünftigen Erwärmungsszenarien. Durch diese Simulationen haben wir neue Erkenntnisse darüber gewonnen, wie sich Starkniederschlagsmuster in einem wärmeren Klima verändern könnten. Vor allem unterstreichen unsere Ergebnisse die Bedeutung der mesoskaligen Organisation der Konvektion - ein Prozess, der von traditionellen globalen Klimamodellen nur unzureichend erfasst wird - für die Beeinflussung der täglichen tropischen Niederschlagsextreme.

Sowohl Simulationen als auch Beobachtungsdaten zeigen, dass die täglichen Niederschlagsextreme in stärker organisierten Zuständen, die mit größeren, aber weniger häufigen Stürmen einhergehen, tendenziell zunehmen. Bei der Simulation eines wärmeren Klimas beobachteten wir einen beständigen Anstieg der monatlichen mittleren täglichen Niederschlagsextreme. Vor allem höhere Niederschlagsperzentile zeigen eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber konvektiver Organisation, die sich mit der globalen Erwärmung voraussichtlich verstärken wird. Ohne Veränderungen in der

Organisation steigen die intensivsten täglichen Niederschlagsextreme über den tropischen Ozeanen mit einer Rate nahe der Clausius-Clapeyron-Skalierung (CC) an. Bei einer verstärkten Organisation in einem wärmeren Klima übersteigt die Steigerungsrate dieser Extreme jedoch die Vorhersagen der CC-Skalierung.

2 Eingehende Darstellung (MPI-M)

2.1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Technischer Fortschritt

Im Kern des Projektes "Monsoon 2.0" stand die Durchführng eines Vielzahl von hochauflösenden globalen Klimasimulationen. Um diese Menge an Simulationen in einer annehmbaren Zeit durchführen zu können, wurde das Wetter- und Klimamodell ICON auf GPUs portiert. Diese Arbeiten wurden bereites im Vorfeld von Kollegen des CSCS in der Schweiz begonnen.

Im Rahmen von "Monsoon 2.0" konnte die Atmosphärenkomponente von ICON nun erstmals für eine Vielzahl an numerischen Experimenten genutzt werden. Die Simulationen wurden auf dem GPU Cluster JUWELS Booster am Jülich Supercomputing Centre (JSC) durchgeführt.

Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieses Berichts wurde bereits ein Großteil der geplanten Simulationen auf dem JUWELS Booster Cluster am JSC durchgeführt (s. Tabelle 1). Diese Simulationen umfassen sowohl das sogenannte „Monsoon Ensemble" sowie die „Monsoon Extremes".

Tabelle 1 Übersicht über die bereits durchgeführten Simulationen im Rahmen des Monsoon Projektes

Beschreibung der Simulation	Auflösung	Anzahl
Present-day	5 km	4
RCP 2.5	5 km	2
RCP 8.5	5 km	2
+1 K	5 km	4
Erhöhte Eissedimentation	5 km	2
Extremwetter Deutschland/China	2.5 km	2

Beim „Monsoon Ensemble" handelt es sich um 14 Simulationen der Monsunsaison (April-Oktober) mit einer globalen Gitterauflösung von 5km. Die Simulationen wurden mit vorgeschriebenen Randbedingungen des Ozeans durchgeführt, welche verschiedene Klimaprojektionen beschreiben. Ein erster Plausibilitätscheck der Daten zeigt ein starkes Signal in atmosphärischen Zustandsgrößen. Dies stimmt uns zuversichtlich im weiteren Verlauf der Auswertungen Aussagen über die Statistiken des Monsuns treffen zu können.

Zusätzlich hat unsere Analyse gezeigt, dass die Variabilität zwischen Ensemblemitgliedern innerhalb einer Klimaprojektion geringer ist als erwartet. Vermutlich genügt also eine geringere Anzahl an Simulationen als zunächst geplant, um eine robuste Aussage über den Klimazustand zu treffen. Aus diesem Grund werden wir die noch ausstehenden Ressourcen am JSC dafür verwenden Reanalysen vergangener Monsunsaisons durchzuführen. Im Unterschied zu den bisherigen Projektionen können diese Modelläufe im Anschluss mit Beobachtungsdaten verglichen werden.

Als Ergänzung zum „Monsoon Ensemble" wurden die beiden „Monsoon Extremes" simuliert. Die Simulationen wurden auf einem feineren 2,5km Gitter gerechnet. Ziel dieser beiden Simulationen war es, die Extremwetterereignisse in Ahrweiler (Deutschland) und Henan (China) im Juli 2021 abzubilden. Die Ergebnisse geben uns Aufschluss darüber, wie gut das Modell auch sehr extreme Wetterereignisse repräsentieren kann. Diese Erkenntnisse werden anschließend direkt in die Interpretation des „Monsoon Ensembles" einfließen.

Zusammenfassend sind wir mit der Durchführung der Simulationen am JSC sehr zufrieden! Die GPU-Version von ICON erreicht auf dem JUWELS Booster Cluster einen Durchsatz von 120 simulierten Tagen pro Tag auf 72 Rechenknoten.

Dieser starke Fortschritt in der Performance des Modells hat es erst ermöglicht Experimente wie das „Monsoon Ensemble“ in annehmbarer Laufzeit durchzuführen. Hierbei möchten wir die technische Unterstützung sowohl am JSC als auch am DKRZ in Hamburg hervorheben ohne die unser Teilprojekt nicht zu einem so erfolgreichen Abschluss gekommen wäre.

Open Data

Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl an hochauflösenden Simulationen des Erdsystems durchgeführt. Die Daten wurden über das WDC Climate archiviert und stehen so der gesamten wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung.

Zusätzlich sind auch zwei sogenannte “Monsoon Extreme” der tropischen Wirbelsturmes In-fa simuliert worden. Diese Simulationen bieten eine noch höhere Auflösung (2.5 km), um die Analyse von Prozessen in der Entstehung von Wirbelstürmen im Modell zu untersuchen. Auch diese Daten sind über das WDCC frei zugänglich.

Kluft, Lukas (2023). ICON Monsoon 2.0 Ensemble. DOKU at DKRZ. https://hdl.handle.net/21.14106/f8b74dd060c567cb10b56c321add53a3d4618097

Kluft, Lukas (2023). ICON Monsoon 2.0 Case Study. DOKU at DKRZ. https://hdl.handle.net/21.14106/ad5d1f0307daa8fac4724c0d170eb28ce337e8c9

Intensivierung der täglichen tropischen Niederschlagsextreme durch stärker organisierte Konvektion

Viele glauben, dass die globale Erwärmung eine Rolle bei der zunehmenden Schwere von Niederschlagsextremen spielt (wie Field et al., 2012). Dies hängt mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zusammen, der erklärt, wie die Kapazität der Luft, Wasserdampf zu halten, exponentiell mit der Temperatur ansteigt, eine Beziehung, die durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben wird (Trenberth et al., 2003). Bleibt die Luftfeuchtigkeit bei einem Temperaturanstieg relativ stabil, nimmt auch die von den Luftströmungen transportierte Wasserdampfmenge zu, was zu einem Anstieg extremer Niederschlagsereignisse in einem ähnlichen Ausmaß führt, wie es diese Gleichung vorhersagt. Sowohl empirische Daten als auch Simulationen deuten jedoch darauf hin, dass die tatsächliche Zunahme der Niederschlagsextreme erheblich von der CC-Skalierung abweichen kann (O'Gorman 2012, 2015; Bao et al., 2017; Pendergrass, 2018; Bläckberg und Singh, 2022). Während die globale durchschnittliche Niederschlagsrate dadurch begrenzt ist, wie schnell die Atmosphäre Energie durch Strahlungsprozesse abgeben kann (Newel et al., 1975; Mitchell et al., 1987; Allen et al., 2002), können lokale Niederschlagsraten um viele Größenordnungen relativ zum Mittelwert schwanken. Der Zusammenhang zwischen der Organisation konvektiver Systeme (Gewitter und andere konvektive Wolken) und extremen Niederschlägen in den Tropen und die Frage, wie sich diese Beziehung mit der globalen Erwärmung ändern könnte, ist nach wie vor ungewiss. Bao et al. (2024) verwenden die Simulationen des ICOsahedral Nonhydrostatic (ICON) Modells, sowohl in einer gekoppelten als auch in einer reinen Atmosphären-Konfiguration, für gegenwärtige, vergangene und zukünftige jährliche und halbjährliche Zeitscheiben, um zu verstehen, wie die täglichen tropischen Niederschlagsextreme (über einen Tag akkumulierte Gesamtniederschlagsextreme) mit der konvektiven Organisation zusammenhängen und um vorherzusehen, wie sich beide als Reaktion auf die Erwärmung verändern werden.

Bao et al. (2024) untersuchen, wie sich die konvektive Organisation und die täglichen Niederschlagsextreme in einem sich erwärmenden Klima entwickeln, und zeigen die Beziehung zwischen diesen Phänomenen auf. Beobachtungen und Modelle deuten darauf hin, dass die täglichen Niederschlagsextreme mit dem Grad der mesoskaligen Organisation im derzeitigen Klima

zusammenhängen. Mit der Erwärmung werden die täglichen Niederschlagsextreme, insbesondere über dem Ozean, voraussichtlich stärker zunehmen als die Veränderungen des Wasserdampfs, wobei die Raten die Clausius-Clapeyron-Skalierung (CC) übersteigen. Diese Verschärfung ist bei den höchsten Extremen besonders ausgeprägt, mit einem bemerkenswerten Anstieg von 9,3 % pro Grad Kelvin für das 99,99-ste Perzentil über dem Ozean.

Abbildung 2.1A zeigt, dass die täglichen Niederschlagsextreme (P_n) in einem wärmeren Klima wahrscheinlich zunehmen werden. Insbesondere zeigen die extremsten Ereignisse (99,99. Perzentil) in den gesamten Tropen, sowohl an Land als auch über den Ozeanen, eine durchschnittliche Zunahme mit einer Rate, die mit der Zunahme der Oberflächenfeuchtigkeit übereinstimmt. Vor allem über den Ozeanen ($P_{o,n}$) übersteigt die Verstärkungsrate von 9,3 % pro Grad Kelvin für das 99,99. Perzentil die Rate der Wasserdampfveränderungen, was eng mit der Clausius-Clapeyron-Skala (CC) übereinstimmt. Dies wirft die Frage auf: Trägt die konvektive Organisation zur Verstärkung der täglichen Niederschlagsextreme bei? Zunächst beobachteten Bao et al. (2024) eine Zunahme der konvektiven Organisation mit der Erwärmung (Abb. 2.1B), wie aus dem über zwei Perioden gemittelten Iorg hervorgeht, trotz erheblicher Schwankungen von Monat zu Monat. Es besteht ein klarer und statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den Veränderungen der täglichen Niederschlagsextreme und den organisatorischen Veränderungen ($P < 0{,}005$, 99,5 % Konfidenzintervall), wobei die Monate, in denen eine stärkere organisatorische Zunahme zu verzeichnen ist, auch ausgeprägtere Niederschlagsextreme infolge der Erwärmung aufweisen (Abb. 2.1 C und D). Über den tropischen Ozeanen, ohne organisatorische Veränderungen, entspricht die Zunahme der Niederschlagsextreme weitgehend der CC-Skala, insbesondere für $P_{o,99.9}$. Wenn jedoch die Konvektion stärker organisiert wird, dürfte der Anstieg der Extreme die CC-Skala übertreffen. Die Daten zeigen, dass schon eine geringe Erhöhung des I_{org} (0,01) zu einem zusätzlichen Anstieg von etwa 2 % pro Grad Kelvin in $P_{o,95}$ und 4 % in $P_{o,99.9}$ bei Erwärmung führen kann. Im Gegensatz dazu zeigen Änderungen des durchschnittlichen Niederschlags nur eine schwache Korrelation mit Änderungen des I_{org}, wie aufgrund seiner Verknüpfung mit der atmosphärischen Nettostrahlung und der Energiebilanz zu erwarten war, die durch verschiedene Prozesse jenseits der konvektiven Organisation beeinflusst werden.

Um die Beziehung zwischen den Veränderungen der monatlichen Organisation und den täglichen Niederschlagsextremen mit der Erwärmung zu kontextualisieren, untersuchen wir Daten aus dem Jahr 1850 und konzentrieren uns dabei auf die Beziehung zwischen den saisonal bereinigten Monatsmitteln von Iorg und Pn ohne den Einfluss der Erwärmung. Diese Analyse zeigt deutlich niedrigere Korrelationen, was darauf hindeutet, dass durch die Erwärmung verursachte organisatorische Veränderungen die täglichen Niederschlagsextreme verstärken.

Abbildung 2.1A deutet auch darauf hin, dass die durchschnittliche Steigerungsrate der täglichen Niederschlagsextreme über Land geringer ist als die CC-Skala (unter 7 % pro Grad Kelvin), wobei kein starker Zusammenhang zwischen Veränderungen der konvektiven Organisation und Niederschlagsextremen über Land gefunden wurde. Dies deutet darauf hin, dass Niederschlagsextreme an Land eher von großräumigen Prozessen beeinflusst werden. Darüber hinaus korrelieren Veränderungen in der Trockenzone (ΔA_0) positiv mit Veränderungen in I_{org}, wobei die Vorhersagen auf eine Ausdehnung der Trockenzone bei Erwärmung hindeuten, selbst wenn die mesoskalige Organisation abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass die Ausdehnung der Trockenzone direkt mit der Erwärmung zusammenhängt, wobei der Effekt durch ein höheres Organisationsniveau verstärkt wird. Eine Zunahme der I_{org} korreliert mit weniger, aber größeren Stürmen, die eng mit Änderungen der Iorg zusammenhängen.

Zusammenfassend unterstreichen Bao et al. (2024) die signifikante Auswirkung der konvektiven Organisation auf die Intensivierung der täglichen Niederschlagsextreme in einem sich erwärmenden Klima, mit bemerkenswerten Unterschieden zwischen ozeanischen und landgebundenen Reaktionen.

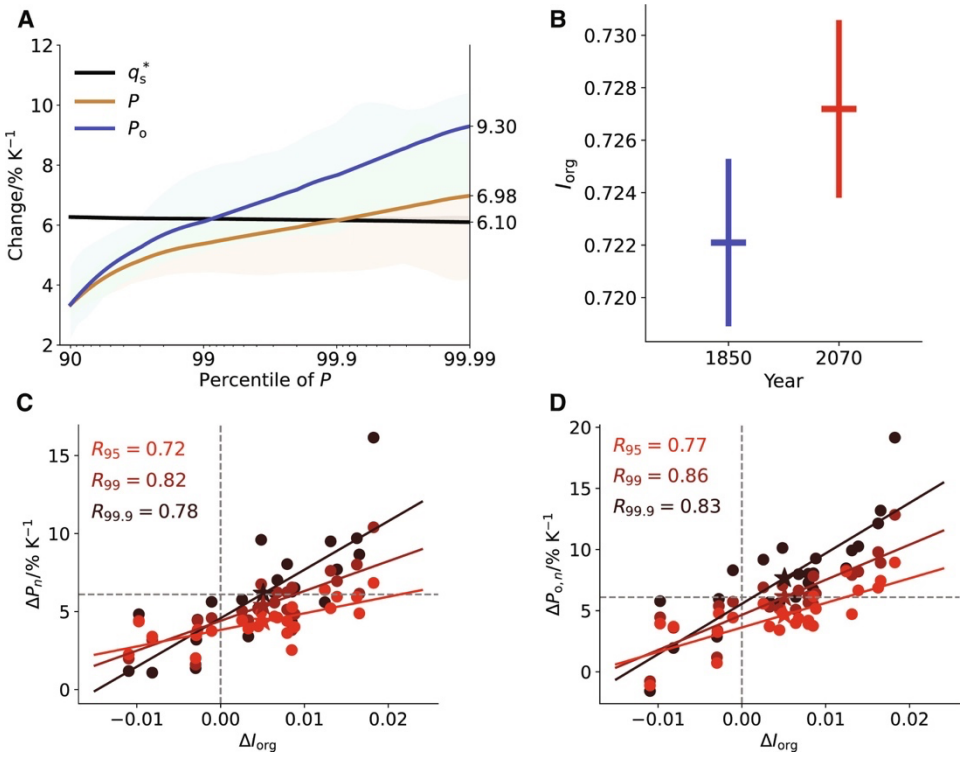

***Abbildung 2.1**: Veränderungen der Niederschlagsextreme und der konvektiven Organisation bei Erwärmung. (A) Bruchteilige Änderungen des täglichen Niederschlags über allen Regionen (P), über dem Ozean (P_o) und der spezifischen Oberflächen-Sättigungsfeuchte (q_s^*) als Funktion des Niederschlagsperzentils. P, Po, und q_s^* werden für jeden Tag sortiert und dann über jeden Monat von April bis September gemittelt. Die Änderungen werden zwischen 2070 und 1850 berechnet und durch den mittleren Anstieg der Oberflächentemperatur normiert. Die durchgezogenen Linien zeigen die Mittelwerte aller Monate für vier Ensemblemitglieder. Die Schattierungen zeigen den Interquartilsbereich. (B). Mittlerer I_{org} im Jahr 1850 gegenüber 2070. Die Fehlerbalken zeigen SEs von monatlichen Variationen. (C und D) Änderungen der täglichen Niederschlagsextreme über allen Regionen [ΔP_n, (C)] und der täglichen Niederschlagsextreme über dem Ozean [$\Delta P_{o,n}$, (D)] im Vergleich zu Änderungen der Organisation (ΔI_{org}). Die Veränderungen werden zwischen 2070 und 1850 berechnet und sind durch den Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur normiert. Jeder Punkt steht für die tägliche Veränderung, gemittelt über einen Monat, und die Farben von rot bis dunkelrot zeigen die Ergebnisse für die täglichen Niederschlagsextreme am 95., 99. bzw. 99,9 Perzentil. Die Pentagramme sind die Mittelwerte aller Monate. Die horizontale gestrichelte Linie in (C) und (D) stellt die entsprechenden Veränderungen der spezifischen Oberflächenfeuchtigkeit (q_s^*). Die Ergebnisse stammen von ICON-A. Nach Bao et al. (2023).*

Um die Auswirkungen der konvektiven Organisation auf den extremen Niederschlag weiter zu entflechten, kategorisieren Bao et al. (2024) den Niederschlag nach seiner Intensität (M_n) und Dauer (D_n), wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Bei der Analyse der halbjährlichen Niederschlagsdaten konzentrieren sich Bao et al. (2024) auf die P_n-Raster, um dann die Gesamtniederschlagsstunden innerhalb eines Tages zu berechnen. Dabei steht D_n für die Gesamtniederschlagsstunden des Tages, und M_n wird durch Division von P_n durch D_n berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass der wichtigste Faktor, der die Änderungen der Niederschlagsmengen mit der Organisation verbindet, die Dauer der extremen Niederschlagsereignisse ist, die eine statistisch signifikante Korrelation aufweist. Im Gegensatz dazu weisen Änderungen der Niederschlagsintensität eine geringfügige Korrelation auf, die statistisch nicht signifikant ist und nicht umgekehrt mit ΔI_{org} zusammenhängt. In der Studie wird spekuliert, dass die leichte negative Korrelation auf eine erhöhte Stabilität zurückzuführen sein könnte, die zu stärkeren und schnelleren Aufwinden bei besser organisierten Bedingungen führt, obwohl dieser Effekt durch die längere Dauer der Ereignisse in Verbindung mit einer besseren Organisation wieder ausgeglichen wird.

Die längere Dauer der extremen Niederschlagsereignisse könnte auf größere Konvektionscluster mit besserer Organisation und möglicherweise auf eine langsamere Niederschlagsbewegung zurückzuführen sein, ein Aspekt, der in dieser Studie nicht untersucht wurde. Nichtsdestotrotz unterstützt unsere Analyse die Idee, dass organisatorische Faktoren in erster Linie die Dauer von Niederschlagsereignissen verlängern, was mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen übereinstimmt. Diese Studie zeigt, dass in sehr realistischen Modellszenarien nicht die Intensität, sondern die Dauer der Niederschläge mit einer stärker organisierten Konvektion zunimmt.

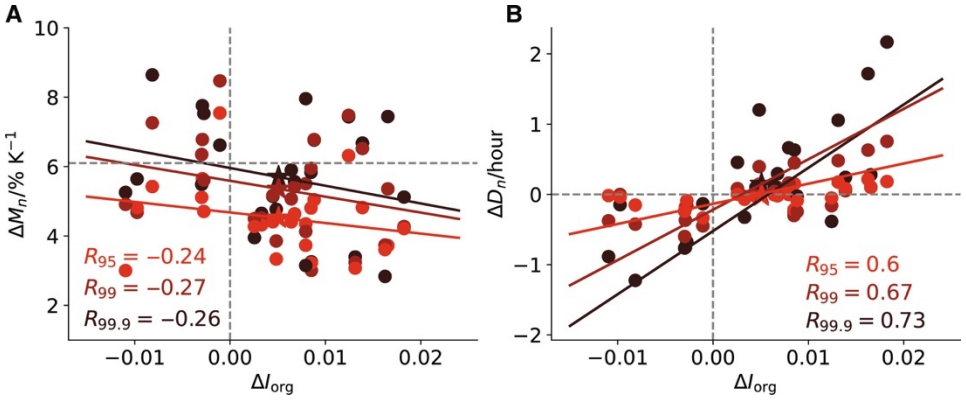

***Abbildung 2.2**: Veränderungen in der Organisation im Vergleich zu Veränderungen in der Intensität und Dauer von Niederschlagsextremen. Änderungen der täglichen Niederschlagsextreme (ΔP_n), zerlegt in Änderungen der Intensität [ΔM_n, (A)] und Dauer [ΔD_n, (B)] gegenüber Änderungen der Organisation (ΔI_{org}). Die Details der Diagramme sind dieselben wie in Abb. 2.1C. Die Ergebnisse stammen aus ICON-A. Nach Bao et al. (2023).*

Die Analyse der Monsunsimulationen, die durch eine neue Generation globaler Klimamodelle ermöglicht wird, die die Prozesse, die den Veränderungen bei den extremen Niederschlägen zugrunde liegen, aufklären sollen, sollte die Bemühungen um ein besseres Verständnis der Veränderungen in der konvektiven Organisation fördern. Die Prozesse, die der konvektiven Organisation zugrunde liegen, und die Skalen, auf denen sie stattfinden, fehlen in den Modellen, die bisher zur Untersuchung des globalen Klimawandels verwendet wurden. So basierten beispielsweise die in der letzten Phase des Projekts zum Vergleich gekoppelter Modelle verwendeten globalen Klimamodelle auf gröberen Gittern (typischerweise 150 km), und (was noch wichtiger ist) alle verwendeten parametrische Darstellungen konvektiver Systeme, die so konzipiert sind, dass sie den mittleren Niederschlag auf eine Art und Weise darstellen, die die konvektive Organisation nicht berücksichtigt und die Reaktion der mesoskaligen Zirkulation nicht zulässt, von der festgestellt wurde, dass sie die Veränderungen der Extreme in den derzeitigen Simulationen untermauert. Globale sturmauflösende Modelle ermöglichen nicht nur eine bessere physikalische Grundlage für die Vorhersage von Extremen, sondern auch die Empirie, die erforderlich ist, um das Verständnis für künftige Veränderungen bei Niederschlagsextremen zu verbessern - umso mehr, als ihre Auflösung und Dauer in den kommenden Jahren verfeinert werden.

Simulationen bei Sturm und extremen Niederschlagsereignissen im Juli 2021

Zusätzlich zu den Ensemblesimulationen in verschiedenen Hintergrundklimata wurden zwei weitere Simulationen durchgeführt, die sich speziell mit Extremereignissen beschäftigen. Hierzu wurde der Taifun In-Fa als sogenannte "Monsoon Extreme" ausgewählt. In-Fa war ein tropischer Wirbelsturm, der im Juli 2021 vor der chinesischen Küste starke Winde und extreme Niederschläge verursachte.

Um die relevanten physikalischen Prozesse noch besser abbilden zu können, wurde die horizontale Auflösung von ICON auf 2,5 km erhöht. Die "Monsoon Extreme" bestehen aus zwei Simulationen: Eine wurde unmittelbar vor dem Sturm gestartet, die andere hatte eine längere Vorlaufzeit ("lead time").

Abbildung 2.3a zeigt die Windgeschwindigkeit am Boden vor der chinesischen Küste. Der Wirbelsturm war von mehreren "Cold Pools" umgeben, räumlich kleinen, aber intensiven Niederschlagsereignissen. Sowohl die Windgeschwindigkeiten als auch die Zugbahn des Taifuns wurden von ICON sehr gut vorhergesagt. Allerdings zeigte sich, dass die Entwicklung des Taifuns in den ersten Tagen deutlich langsamer verlief als in den Beobachtungen. Wir führen dies auf die relativ grobe Initialisierung des Modells zurück: In der Klima-Konfiguration wird ICON nur eine Anfangsbedingung vorgegeben.

Abbildung 2.3b zeigt, dass das Modell das Muster und den Ort des Starkregenereignisses genau wiedergibt; die simulierte Intensität ist jedoch im Vergleich zu den beobachteten Daten schwächer. Diese Diskrepanz ist wahrscheinlich auf das Auftreten sehr intensiver Niederschlagsereignisse auf Skalen zurückzuführen, die kleiner sind als die, die von ICON aufgelöst werden. Außerdem werden bestimmte notwendige Randbedingungen, wie z. B. Taleffekte, möglicherweise nicht angemessen dargestellt. Die Simulationen zeigen, dass das ICON-Modell mit einer globalen horizontalen Auflösung von 2,5 km extreme Wetterereignisse wie den Infa-Taifun und das Starkregenereignis in Zhengzhou angemessen wiedergeben kann. Es ist immer noch umstritten, ob das Starkregenereignis in Zhengzhou durch den Infa-Taifun verursacht wurde. Das im Rahmen des Monsunprojekts entwickelte Modell und die Simulationen könnten genutzt werden, um den Zusammenhang zwischen dem Infa-Taifun und den Starkregenereignissen im Landesinneren von China zu verstehen.

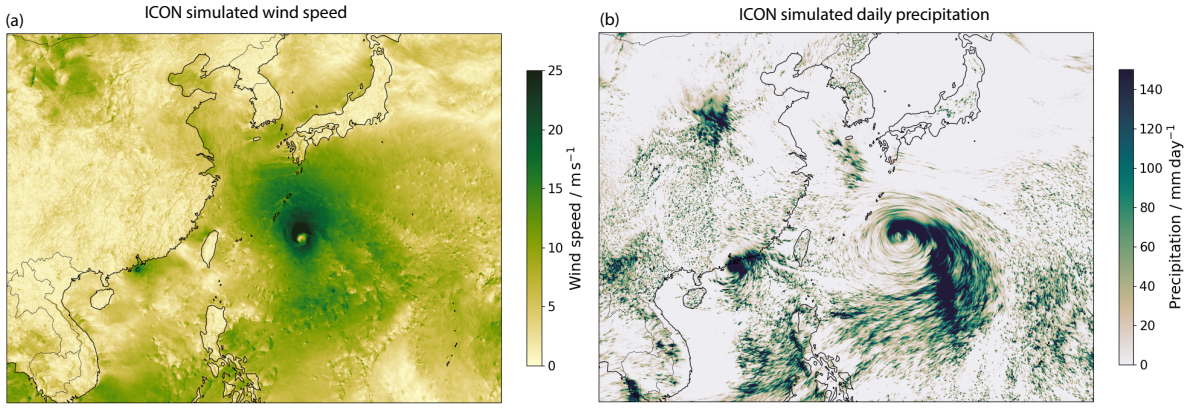

Abbildung 2.3*: Die (a) Windgeschwindigkeit (ms-1) und (b) der Gesamtniederschlag (mm dd-1) von 12:00 Uhr am 19. Juli 2021 bis 11:30 Uhr am 20. Juli 2021 am Boden vor der chinesischen Küste, simuliert durch das ICON-Modell mit 2,5 km horizontaler Auflösung.*

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten wurden allein für die Arbeit am MPI-M genehmigt. Davon haben wir die Personalkosten für das Gehalt des Postdocs Dr. Lukas Kluft verwendet. Er war maßgeblich an der Portierung des ICON-Modells auf den JUWELS-Booster-Cluster des JSC und der Durchführung aller geplanten Simulationen beteiligt und trug auch zur Studie über die Intensivierung der täglichen tropischen Niederschlagsextreme durch stärker organisierte Konvektion bei.

Reisekosten wurden für die Teilnahme von Dr. Lukas an Konferenzen und Workshops verwendet, darunter der Shanghai Typhoon Workshop und die International Conference on Tibetan Plateau and High Mountains Energy and Water Exchanges (TEWEX-CLIMA) 2023, NextGEM's Hackathon und WarmWorld Kickoff Meeting. Das Budget des Monsun-Projekts wurde auch für ein zweitägiges Kick-off-Meeting im November 2019 verwendet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Arbeit basierte auf dem Arbeitsplan gemäß dem Projektvorschlag. Es war notwendig, einen Wissenschaftler, Lukas Kluft, zu berufen, der über ausreichende Erfahrung in der Klimamodellierung, Hochleistungsberechnung und Hintergrundwissen in den Atmosphärenphysikwissenschaften verfügt. Drittmittel und Eigenmittel standen für die

Durchführung des vorgeschlagenen Projekts nicht zur Verfügung, ebenso wenig eine Kofinanzierung oder eine ausschließliche Finanzierung durch die EU. Das MPI-M unterstützte jedoch die Arbeit an dem Projekt aus QBG- und anderen Eigenmitteln. Der Projektkoordinator Bjorn Stevens leistete über die im Antrag als QBG angegebenen 3 Personenmonate hinaus einen Beitrag zum Projekt in betreuender und wissenschaftlicher Funktion. Die wissenschaftlichen Programmierer Luis Kornblueh und Uwe Schulzweida trugen zur Modellentwicklung sowohl als Gatekeeper des ICON-Modells als auch durch Programmierung und Beratung im Rahmen der als QBG angegebenen 6 Personenmonate bei. Die Doktorandin Laura Pacini trug im Rahmen von 3 Personenmonaten (QBG) zur Analyse des Einflusses von SST-Mustern auf den Niederschlag bei. Angela Gruber trug im Umfang von 3 Personenmonaten, die als QBG angegeben sind, zum administrativen Management des Projekts bei. Die oben erwähnten Arbeiten zur zukünftigen Entwicklung der oberen Troposphäre von Paul Keil haben mehr als die im Antrag angegebenen QBG benötigt. 9 Personenmonate als im Antrag angegeben. Darüber hinaus hat der aus dem Exzellenzcluster CLICCS geförderte Wissenschaftler Chao Li mit seiner Arbeit zur Koordination und zum wissenschaftlichen und technischen Austausch mit allen Projektpartnern zum Erfolg des Projekts beigetragen.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergeb- nisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Monsun-Projekt hat bedeutende Fortschritte bei der Weiterentwicklung des ICON-Modells gemacht, insbesondere bei der Anpassung für den Einsatz auf GPUs. Diese Anpassung ermöglicht die Durchführung globaler Klimasimulationen in einem noch nie dagewesenen Umfang. Während die ersten Bemühungen, das ICON-Modell auf GPUs zu portieren, vom CSCS-Team in der Schweiz unternommen wurden, hat das Projekt nun die atmosphärische Komponente von ICON erfolgreich für eine breite Palette von Simulationen auf dem JUWELS Booster GPU-Cluster am Jülich Supercomputing Centre (JSC) eingesetzt. Diese Bemühungen haben wertvolle Erkenntnisse und Ergebnisse für das nextGEMs (Next Generation Earth Modelling Systems) Projekt, das vom Horizon 2020 Programm der EU unterstützt wird, und das WarmWorld Projekt, das vom BMBF finanziert wird, geliefert. Im Rahmen dieser Projekte wurden umfangreiche globale gekoppelte Klimasimulationen im Kilometermaßstab durchgeführt, wobei der JUWELS Booster am JSC und LUMI, einer der paneuropäischen Pre-Exascale-Supercomputer, der im Rechenzentrum des CSC in Kajaani, Finnland, untergebracht ist, eingesetzt wurden.

Darüber hinaus hat das Projekt entscheidend dazu beigetragen, die Bedeutung der mesoskaligen Organisation der Konvektion für das Verständnis der Schwankungen der täglichen akkumulierten Niederschlagsextreme in den Tropen aufzuzeigen, eine Erkenntnis, die von Bao et al. (2024) veröffentlicht wurde. Dieser Prozess, den herkömmliche globale Klimamodelle nicht physikalisch abbilden können, ist entscheidend für die Vorhersage von Veränderungen bei extremen Niederschlagsereignissen. Die Analyse von Bao et al. (2024), die sich auf eine neue Generation globaler Klimamodelle stützt, die in der Lage sind, die Prozesse aufzulösen, die zu Veränderungen bei extremen Niederschlägen führen, unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Forschung im Bereich der konvektiven Organisation. Globale Modelle zur Auflösung von Stürmen bieten nicht nur eine physikalisch fundiertere Grundlage für die Vorhersage extremer Wetterereignisse, sondern unterstützen auch die empirische Forschung, die notwendig ist, um unser Verständnis für künftige Veränderungen der Niederschlagsmuster zu verbessern. In dem Maße, in dem sich die Auflösung und die Dauer dieser Modelle weiter verbessern, werden sie zu immer wertvolleren Instrumenten für die Klimaforschung.

2.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt geworde- ner Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Hauptziel des Monsunprojekts bestand darin, das ICON-Modell für fortschrittliche Supercomputersysteme anzupassen, um detaillierte, globale sturmauflösende Simulationen sowohl des aktuellen Klimas als auch zukünftiger Monsunprognosen zu ermöglichen. Diese Initiative

unterstreicht das Entstehen einer neuen Kategorie von Klimamodellen, die aus der Integration von Monsun-Fachwissen und Hochleistungsrechenkapazitäten (HPC) entstanden sind und durch deutsche Beiträge zum Prozessverständnis und zur Modellierung bereichert wurden. Diese Zusammenarbeit hat zu Simulationen von außergewöhnlicher Qualität geführt. Das ICON-Modell zeichnet sich als eines der wenigen Klimamodelle aus, die in der Lage sind, effiziente globale Klimasimulationen im Kilometermaßstab auf GPU-Cluster-Supercomputing-Systemen durchzuführen.
Während der Durchführung des Monsoon-Projekts haben führende Klimamodellierungszentren weltweit bedeutende Fortschritte bei globalen Klimasimulationen im Kilometermaßstab erzielt und bemerkenswerte Verbesserungen bei der Nutzung von GPUs für die Klimaforschung erzielt. Diese Beiträge aus der breiteren wissenschaftlichen Gemeinschaft haben nicht nur das Monsun-Projekt verbessert, sondern auch die entscheidende Rolle der interdisziplinären Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung des Bereichs der Klimamodellierung und -simulation hervorgehoben. Der Austausch von Wissen und Techniken zwischen den Disziplinen war entscheidend für die Verfeinerung der Projektmethodik und stellt sicher, dass das ICON-Modell weiterhin führend auf dem Gebiet der globalen Klimasimulationen im Kilometermaßstab ist.

2.5 Publikationen

Bao, J., B. Stevens, L. Kluft, and C. Muller, 2024: Intensification of tropical precipitation extremes from more organized convection. *Science Advances*, 10: eadj6801. doi:10.1126/sciadv.adj6801

Hohenegger, C., Korn, P., Linardakis, L., Redler, R., Schnur, R., Adamidis, P., Bao, J., Bastin, S., Behravesh, M., Bergemann, M., Biercamp, J., Bockelmann, H., Brokopf, R., Brüggemann, N., Casaroli, L., Chegini, F., Datseris, G., Esch, M., George, G., Giorgetta, M., Gutjahr, O., Haak, H., Hanke, M., Ilyina, T., Jahns, T., Jungclaus, J., Kern, M., Klocke, D., Kluft, L., Kölling, T., Kornblueh, L., Kosukhin, S., Kroll, C., Lee, J., Mauritsen, T., Mehlmann, C., Mieslinger, T., Naumann, A., Paccini, L., Peinado, A., Praturi, D., Putrasahan, D., Rast, S., Riddick, T., Roeber, N., Schmidt, H., Schulzweida, U., Schütte, F., Segura, H., Shevchenko, R., Singh, V., Specht, M., Stephan, C., von Storch, J., Vogel, R., Wengel, C., Winkler, M., Ziemen, F., Marotzke, J. & Stevens, B., 2023:. ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth System and their interactions at kilometer and subkilometer scales. *Geoscientific Model Development*, 16, 779-811. doi:10.5194/gmd-16-779-2023

Jiang, J., Zhou, T., Qian, Y., Li, C. et al., 2023: Precipitation regime changes in High Mountain Asia driven by cleaner air. *Nature,* 623, 544–549. doi.org/10.1038/s41586-023-06619-y

Wu, M., Zhou, T., Li, C. et al., 2021: A very likely weakening of Pacific Walker Circulation in constrained near-future projections. *Nature Communications,* 12, 6502. doi.org/10.1038/s41467-021-26693-y

Huang, X., Zhou, T., Dai, A., Li, H., Li, C., et al., 2020: South Asian summer monsoon projections constrained by the interdecadal Pacific oscillation. *Science Advances*, 6, eaay6546. DOI:10.1126/sciadv.aay6546

2.6 Literatur

Allen, M. R., and W. J. Ingram, 2002: Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* 419, 224–232.

Bao, J., S. C. Sherwood, L. V. Alexander, J. P. Evans, 2017: Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates. *Nat. Clim. Change* 7, 128–132.

Bläckberg, C. P. O. and M. S. Singh, 2022: Increased large-scale convective aggregation in cmip5 projections: Implications for tropical precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.* 49, e2021GL097295.

Field, C. B., and co-authors, 2012: Changes in Impacts of Climate Extremes: Human Systems and Ecosystems (Cambridge Univ. Press, 2012), pp. 231–290.

Lenderink, G., R. Barbero, J. M. Loriaux, and H. J. Fowler, 2017: Super Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate*, 30 (15), 6037-6052.

Lenderink, G., and E. van Meijgaard, 2008: Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1 (8), 511-514.

Mitchell, J. F. B., C. A. Wilson, W. M. Cunnington, 1987: On Co2 climate sensitivity and model dependence of results. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 113, 293–322.

Newell, R. E., G. F. Herman, S. Gould-Stewart, M. Tanaka, 1975: Decreased global rainfall during the past ice age. *Nature* 253, 33–34.

O'Gorman, P. A., 2012: Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nat. Geosci.* 5, 697–700.

O'Gorman, P. A., 2015: Precipitation extremes under climate change. *Curr. Clim. Change Rep.* 1, 49–59.

Pendergrass, A. G., 2018: What precipitation is extreme? *Science* 360, 1072–1073.

Stevens, B., and S. Bony, 2013: What Are Climate Models Missing? *Science,*340 (6136), 1053-1054.

Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, D. B. Parsons, The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84, 1205–1218 (2003).

Forschung am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre

3 Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Monsoon zielte in erster Linie als Technologieprojekt darauf ab, ICON auf chinesische Supercomputer zu portieren, um zeitscheibengenaue globale sturmauflösende (2,5 km) Simulationen des borealen Sommermonsuns durchzuführen. Neben den technischen Modellverbesserung und der Portierung auf den chinesischen Supercomputer wurde in Teilprojekten an der Modellkonfiguration gearbeitet. Bei der Analyse der hochauflösenden DYAMOND Simulationen hatte sich bereits gezeigt, dass trotz hoher Auflösung (unterhalb von 5km) Wolkeneigenschaften in den verschiedenen Modellen noch immer stark variieren. Diese Variation der Wolkeneigenschaften haben eine Auswirkung auf Niederschlagsprozesse, aber auch auf Strahlung und Dynamik. Das vom DLR bearbeitete Teilprojekt hatte daher zur Aufgabe die DYAMOND Simulationen und im Anschluss das in diesem Projekt verwendete ICON Modell hinsichtlich der Repräsentation von Eiswolken zu untersuchen und mit Beobachtungsdaten zu evaluieren. Die Resultate sollten dazu dienen die Konfiguration der ICON-Simulationen zu optimieren.

Ablauf des Vorhabens

Am Anfang konzentrierten sich die Arbeiten, wie geplant, ausschließlich auf die Analyse der DYAMOND Simulationen. Anhand dieser Daten sollte analysiert werden in welchen Orten bzw. in welchen Situationen die Modelle stark unterschiedliche Wolkeneigenschaften simulieren und ob oder wie diese Änderungen mit den Wolkenschemata verbunden sind. Zu diesem Zwecke war unser erstes Ziel herauszufinden, ob die Variabilität im tropischen Eiswasserpfad in den verschiedenen Simulationen tatsächlich durch die Unterschiede in den Wolkenschemata verursacht werden oder durch Unterschiede bei der Simulation der Konvektion durch die verschiedenen Modelle. Außerdem wurde die vertikale Struktur der Wolken in den verschiedenen Modellen verglichen. Zur Evaluation der DYAMOND Simulationen wurden passive und aktive Fernerkundungsdaten verwendet.

Danach wurden die in diesem Projekt durchgeführten ICON Simulationen mit den DYAMOND Simulationen, Simulationen des vom DWD verwendeten ICON Modell und Beobachtungsdaten verglichen. Dies ermöglichte einen Vergleich der Simulationen drei verschiedener ICON Modell Konfigurationen, die sich in Auflösung, Verwendung von Parametrisierungen für Konvektion und Weiterentwicklungsgrad unterscheiden.

Wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Wir analysierten die DYAMOND Modelle und das DWD-ICON, welche alle die Meeresoberflächentemperatur des IFS Modells des ECMWF vorschrieben. Unsere Analysen ergaben, dass sich die Unterschiede im Eiswasserpfad in den Modellsimulationen nicht nur aufgrund der verschiedenen Wolkenschemata ergeben, sondern dass sie auch stark von den Regionen, in denen Konvektion stattfindet, dem unterschiedlichen En-und Detrainment und von der Höhe der konvektiven Wolken abhängen. So zeigte sich z.B. dass das DWD-ICON Konvektion viel stärker als andere Modelle auf Gebiete mit den höchsten Meeresoberflächentemperaturen beschränkt. Daher simuliert das DWD-ICON lokal höhere Vertikalgeschwindigkeiten als andere Modelle, was wiederum mit einem größeren Anteil der Eisphase am totalen Wasser verbunden ist als in anderen Modellen. Es zeigte sich, dass die Modelle allgemein den Eiswasserpfad in Gebieten mit nur mäßig großen mittleren Vertikalgeschwindigkeiten unterschätzen, während in den stark konvektiven Gebieten, welche sich durch hohe mittlere Vertikalgeschwindigkeiten auszeichnen, der Eiswasserpfad relative gut simuliert wird. Dies ist besonders ausgeprägt im DWD-ICON Modell, welches in stark konvektiven Gebieten einen ähnlich hohen Eiswasserpfad wie die DYAMOND Modelle simuliert, den Eiswasserpfad in den anderen Gebieten aber stark unterschätzt.

Das in diesem Projekt verwendete ICON Modell simuliert zwar einen größeren Eiswasserpfad als das

DYAMOND oder DWD ICON, allerdings ist der Anstieg verteilt über stark und schwach konvektive Gebiete und nicht vor allen Dingen in Gebieten mit schwachen Vertikalgeschwindigkeiten zu finden wie es die Beobachtungsdaten zeigen.

Die Ergebnisse deuten unter anderem auf eine zu schnelle Konversion des Wolkenwasser in Niederschlag hin. Die Einführung einer Zwei-Momenten Mikrophysik würde es dem Modell ermöglichen initial einen hohen konvektiven Niederschlag zu simulieren ohne die Lebensdauer des konvektiven Ausflusses (‚Outflow'), der aus kleineren Eiskristallen besteht, zu verkürzen.

Innerhalb des Projektes kooperierten wir mit Martin Köhler vom DWD. Er führte die DWD-ICON Simulation für uns durch und beteiligte sich an der Interpretation der Ergebnisse.

4 Eingehende Darstellung (DLR)

4.1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Zirren sind in den Tropen sehr häufig (Stubenrauch et al., 2013) und haben einen starken Einfluss auf die langwellige Strahlung am Oberrand der Atmosphäre (OLR), können aber von modernen Klimamodellen nur sehr unzuverlässig simuliert werden Li et al. (2012, 2023). Der Grund dafür ist, dass die makro- und mikrophysikalischen Prozesse, welche die Eigenschaften von Zirren kontrollieren, parametrisiert werden müssen. Die Unsicherheiten in der Simulation von Wolken sind vor allen Dingen groß in den Tropen (Stevens and Bony, 2013), wo die Wolkeneigenschaften vor allen Dingen von Konvektion bestimmt werden. Regionale nicht-hydrostatische Modelle mit einer Auflösung von wenigen 100m können Konvektion und die Bewölkung, die daraus resultiert, relativ realistisch simulieren (Rybka et al., 2021). Die Modelle des Projektes ‚Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains (DYAMOND)', welche eine Auflösung von weniger als 5km haben, lösen hochreichende Konvektion zum großen Teil auf und bedürfen daher keiner Parametrisierung für hochreichende Konvektion. Daher war der Focus dieses Projektes auf der Darstellung tropischer Zirren, da hier die größten Fortschritte erwartet werden können.

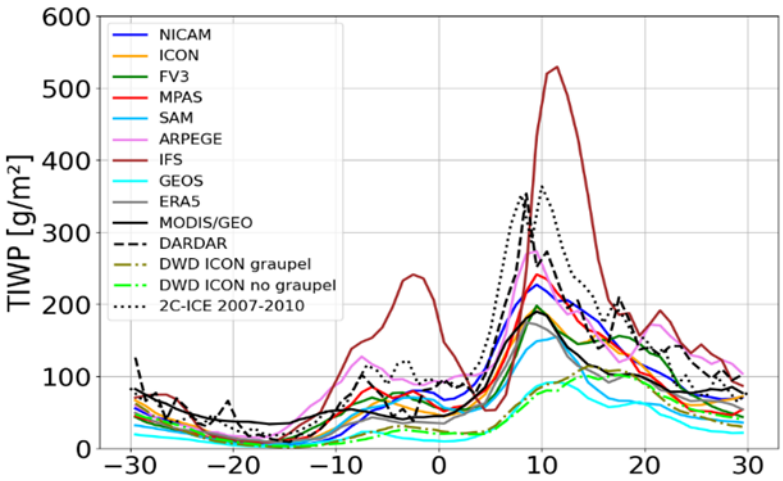

***Abbildung 3.1**: Zonales Mittel des totalen Eiswasserpfades (TIWP) über den tropischen Ozeanen für August-September 2016. In Farbe ist der TIWP der DYAMOND Modelle (durchgezogen) und des DWD-ICON (Punkt-Strich) dargestellt. In Schwarz sind die Beobachtungsdatensätze von der passiven (MODIS/GEO) und aktiven (DARDAR und 2C-ICE) Fernerkundung dargestellt. Der 2C-ICE Datensatz ist nur für die Jahre 2007 – 2010 frei erhältlich. Der DARDAR Datensatz für August/September 2016 und 2010 wurde extra im Rahmen der DLR-QBGF angefertigt. Ein Vergleich des 2C-ICE und DARDAR Datensatzes für das Jahr 2010 zeigte, dass beide Retrievals gut miteinander übereinstimmen.*

Der erste Schritt war die Analyse der Variabilität der simulierten tropischen Zirren und deren Gründe in den

Simulationen der DYAMOND Modelle. Die Ergebnisse der DYAMOND Modelle wurden zusätzlich mit dem niedriger auflösenden (13 km) DWD-ICON Model und mit ERA5 Reanalyse-daten verglichen. Im zweiten Schritt wurden die Simulationen mit Beobachtungsdaten aus aktiver und passiver Fernerkundung evaluiert. Für diese Evaluation wurde im Rahmen der DLR QBGF ein L3 Produkt der DARDAR Daten erstellt, welche auf CALIPSO und CLOUDSAT Messungen beruhen, der sich für die Evaluation von Modellsimulationen auf einem Modellgitter eignet.

In den Simulationen der DYAMOND Modelle zeigt sich trotz aufgelöster hochreichender Konvektion eine große Variabilität im totalen Eiswasserpfad (TIWP) (Abb. 3.1). Im Bereich der innertropischen Konvergenz Zone (ITCZ) variieren der TIWP in den DYAMOND Simulationen um einen Faktor 5 oder, wenn die zwei extremsten Simulationen weggelassen werden, um knapp einen Faktor 2. Einige der Modelle sind gut mit dem beobachteten TIWP aus der passiven Fernerkundung (MODIS/GEO) und nur wenige mit dem TIWP aus der aktiven Fernerkundung (DARDAR, 2C-ICE) vergleichbar. Da die passive Fernerkundung den TIWP in der Gegenwart von optisch dicken Wolken aufgrund der Sättigung des Signals unterschätzt, bedeutet das, dass der tropische TIWP von den Modellen unterschätzt wird.

Um die hohe Variabilität des Eiswasserpfades zwischen den Modellsimulationen entweder auf Unterschiede in der konvektiven Dynamik oder auf Probleme bei der Simulation der Wolken-Response zurückzuführen, verwenden wir die Vorgehensweise von Bony et al. (2004). Dabei wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) der vertikalen Geschwindigkeit bzw. die Response der Wolken auf diese vertikalen Geschwindigkeiten in den verschiedenen Simulationen miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass die Modelle die Häufigkeit monatsmittlerer Aufwärtsbewegungen durchaus unterschiedlich simulieren (Abb. 3.2a), was auf eine unterschiedliche räumliche Verteilung von Konvektion zurückzuführen ist. Einige Modelle simulieren Konvektion vor allen Dingen in Gebieten hoher Wasseroberflächentemperaturen (SST), während andere Modelle die Konvektion gleichmäßiger über die tropischen Ozeane verteilen oder Maxima in der Nähe von Küstenlinien aufweisen, wobei die gleichmäßigere Verteilung eher den ERA5 Reanalyse Daten entspricht.

Alle Modelle simulieren einen Anstieg des TIWP und des totalen Flüssigwasserpfads (TLWP) mit ansteigender vertikaler Geschwindigkeit (Abb. 3.2b), allerdings ist die Steigung des jeweiligen Zusammenhangs sehr unterschiedlich in den verschiedenen Modellen. Einige Modelle simulieren einen großen Anteil des totalen Wassers in Form von gefrorenen Hydrometeoren, wohingegen andere Modelle auch in Gebieten von hohen Vertikalgeschwindigkeiten mehr als 50% des totalen Wassers (gefrorene + flüssige Hydrometeore) in Form von flüssigen Hydrometeoren simulieren (Abb. 3.2c). Dies liegt vor allen Dingen an Unterschieden in der konvektiven Ein- bzw. Ausmischung, welche Wasser aus dem konvektiven Kern ausmischt. Da der konvektive Vertikaltransport von Wasser in den verschiedenen Modellen relativ ähnlich sein muss aufgrund der festgeschriebenen SST, sind die Hauptgründe für die Unterschiede also das konvektive Ein- und Ausmischen und die Wolken-Mikrophysik. Der Vergleich von ERA5 Vertikalgeschwindigkeiten kombiniert mit TIWP Fernerkundungsdaten zeigt, dass die Modellsimulationen schon in Gebieten mit schwach aufsteigender Luft den Eiswasserpfad signifikant unterschätzen. Dies ist ganz besonders ausgeprägt im niedriger auflösenden DWD-ICON.

In unseren Analysen konnten wir zeigen, dass die Variabilität der Wolkenreaktion auf Konvektion in den verschiedenen Modellen hauptsächlich für die Variabilität in den simulierten TIWP verantwortlich ist, aber dass auch die Unterschiede in der geographischen Verteilung von konvektiven Ereignissen zur Variabilität signifikant beitragen. So simuliert z.B. das DWD-ICON Modell Konvektion in Gebieten mit sehr hohen SST, was lokal zu hohen monatsmittleren Vertikalgeschwindigkeiten und damit verbundenen hohen TIWP führt. Diese Gebiete mit sehr hohen TIWP gleichen dabei das Defizit an TIWP in Gebieten mit niedrigeren Vertikalgeschwindigkeiten aus.

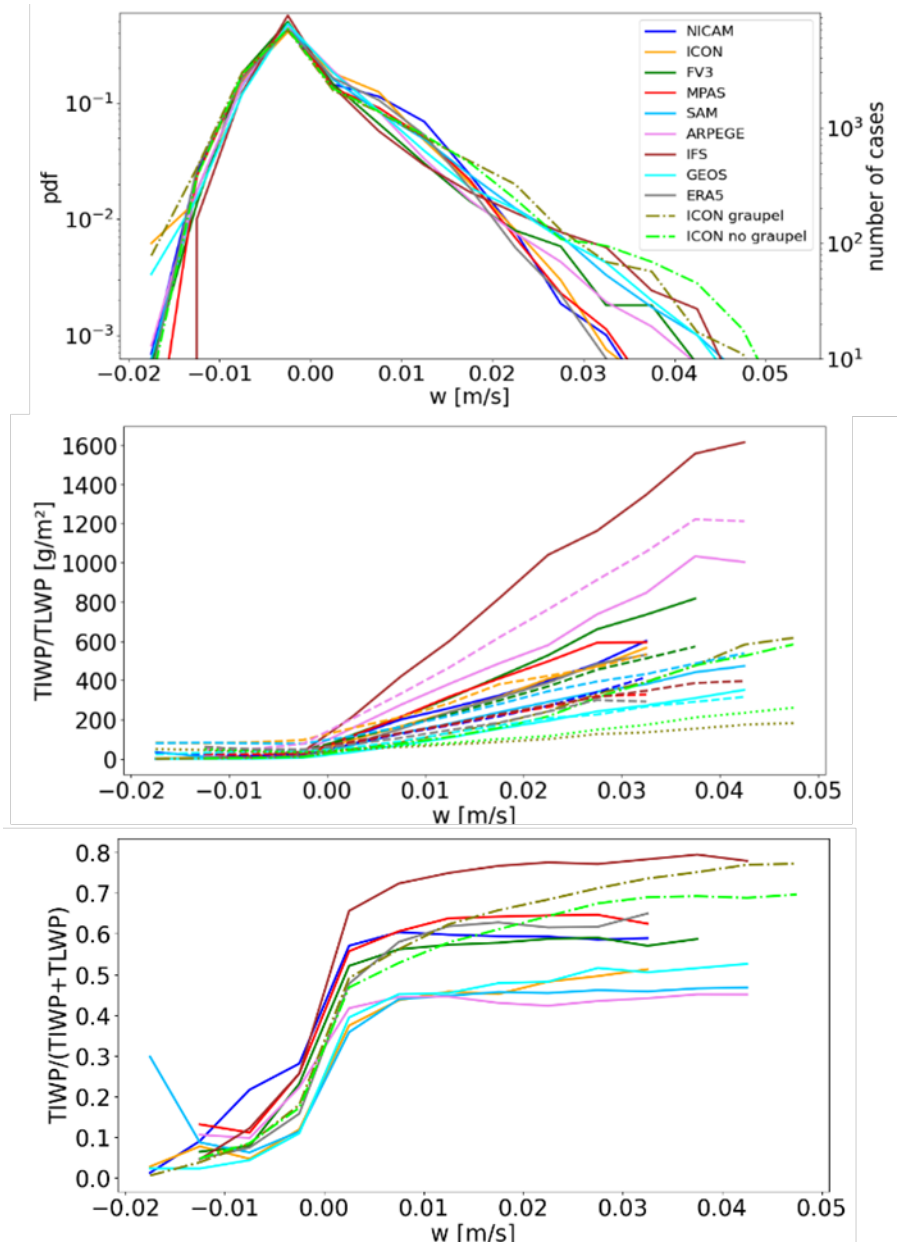

Abb. 3.2 (Oben) PDF der monatsmittleren vertikalen Geschwindigkeit in 500 hPa, (Mitte) TIWP (durchgezogen) und TLWP (gestrichelt) für verschiedene Vertikalgeschwindigkeiten und (Unten) Anteil der gefrorenen Hydrometeore am totalen Wasser (gefroren+flüssig) für verschiedene Vertikalgeschwindigkeiten.

Da der Zusammenhang zwischen Eiswasser und Vertikalgeschwindigkeit nur schwer mit Beobachtungsdaten kombiniert mit ERA5 verglichen werden kann, führten wir ergänzende Analysen zum Zusammenhang zwischen Eiswasserpfad und Niederschlag durch. Wir verwenden Niederschlagsdaten des Global Precipitation Climatology Project (GPCP-SG) und kombinieren sie mit den TIWP Daten aus der aktiven und passiven Fernerkundung. Der Vergleich mit den Modellsimulationen zeigt, dass der Eiswasserpfad von einigen DYAMOND Modellen in Gebieten mit starker Konvektion zufriedenstellend simuliert wird (Abb. 3.3). Dagegen sind die simulierten TIWP in Gebieten mit geringen Niederschlagsmengen zu gering. Dies ist selbst der Fall relative zu passiven Fernerkundungsdaten, die häufig TIWP unterschätzen aufgrund der Sättigung in Fällen von starker Konvektion. Die Unterschätzung des

Eiswasserpfades ist verbunden mit einer Überschätzung des Niederschlags, welches eine zu schnelle Konversion des Eiswassers in fallende Hydrometeore nahelegt. Ein Vergleich mit ICON-NWP Simulationen, in denen Konvektion parametrisiert wird, zeigte, dass ICON-NWP den tropischen Eiswasserpfad massiv unterschätzt. Es reproduziert zwar den Anstieg des Eiswasserpfades mit zunehmender Stärke der Konvektion, aber auch hier ist die Unterschätzung des Eiswasserpfades in schwach konvektiven Gebieten ganz besonders ausgeprägt.

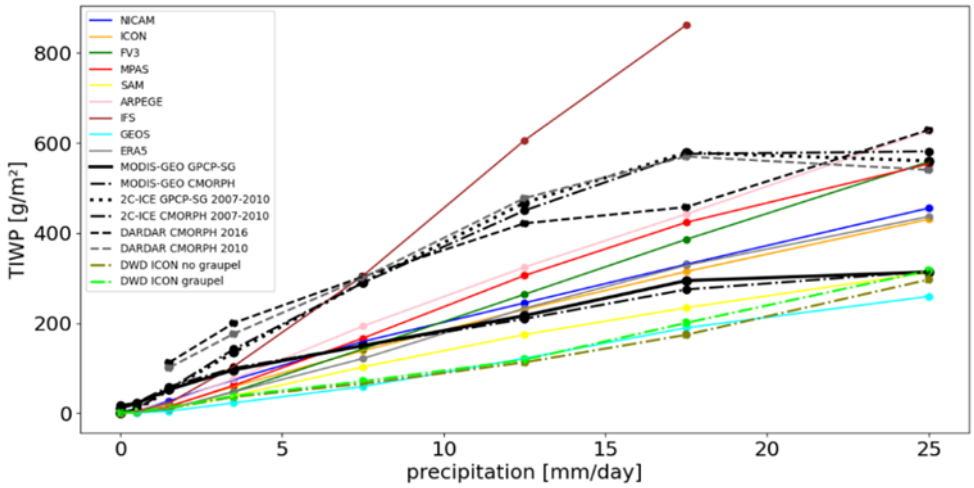

Abb. 3.3: Monatsmittlerer TIWP in Abhängigkeit des mittleren Niederschlags in DYAMOND und DWD-ICON Simulationen, in ERA5 Reanalysedaten und einer Kombination der GCPC Niederschlagsdaten mit dem totalen Eiswasserpfad aus aktiven (2C-ICE und DARDAR) und passiven (MODIS-GEO) Fernerkundungsdaten.

Ein Vergleich mit den Simulationen des Monsoon-Projektes zeigte, dass der tropische Eiswasserpfad gegenüber der DYAMOND Version des ICON-Modells erhöht ist (Abb. 3.4). Die Erhöhung ergibt sich allerdings nicht aus einem größeren Eiswasserpfad in Gebieten mit nur schwachem konvektiven Einfluss, wie er aus den Beobachtungsdaten abgeleitet werden kann, sondern aus einem generell größeren konvektiven Wassertransport in die obere Troposphäre, welcher zu einem Anstieg des Niederschlags und Eiswasserpfades führt. Simulationen, in denen eine größere Sedimentationsgeschwindigkeit des Wolkeneises vorgeschrieben wurde, bewirken einen leichten Anstieg des Eiswasserpfades, welcher sich aber vor allen Dingen in Gebieten mit starkem konvektivem Einfluss ergibt. Für die Simulationen des Monsoon Projektes gilt also weiterhin, dass der TIWP in Gebieten mit geringem konvektivem Einfluss unterschätzt ist.

Nicht nur der IWP hat eine starke Auswirkung auf die ‚outgoing longwave radiation' (OLR) sondern auch die Höhe der Wolkenobergrenze. Im Rahmen des DLR-QBGF verglichen wir die DYAMOND Simulationen mit Abschätzungen der Höhe der Wolkenobergrenze aus aktiven und passiven Fernerkundungsdaten. Unsere Analysen über dem tropischen Atlantik zeigen, dass die vertikale Verteilung des Eiswasserpfades von den Modellen sehr unterschiedlich simuliert wird. Die zu geringen Eiswasserpfade sind zumeist (bis auf im NICAM Modell) mit zu geringen Wolkenobergrenzen verbunden. Dies ist ganz besonders der Fall in Gebieten außerhalb der ITCZ. Die im Monsoon-Projekt durchgeführten Simulationen unterscheiden sich bzgl. der Höhe der Wolkenobergrenze nicht signifikant von den entsprechenden Höhen in den DYAMOND Simulationen. Die ICON Sensitivitätssimulation mit veränderter Fallgeschwindigkeit von Wolkeneis zeigte, dass die Wolkenobergrenze der Wolken nur mäßig stark auf diese Änderung in der Mikrophysik reagiert. Die zu geringen IWP und die zu geringe Höhe der Wolkenobergrenze haben beide die Tendenz die OLR zu überschätzen.

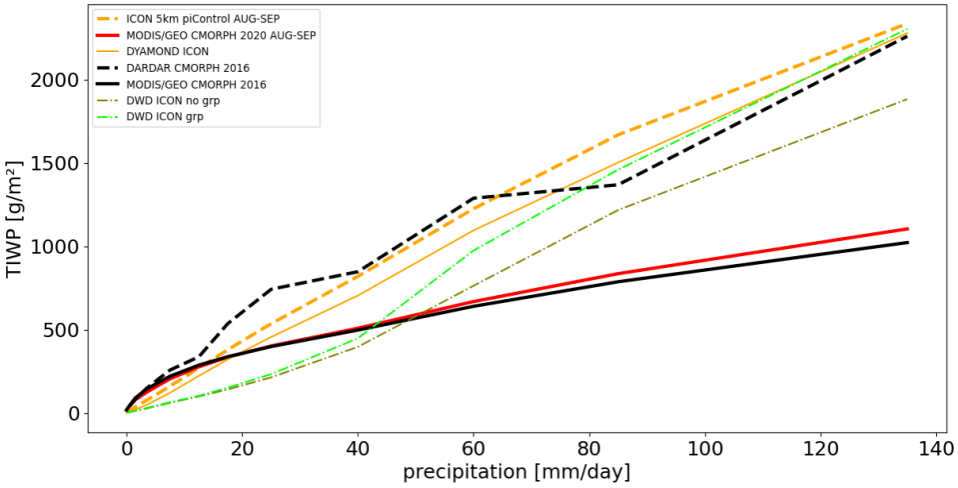

Abb. 3.4: Tagesmittel TIWP in Abhängigkeit des mittleren Niederschlags in DWD-ICON, DYAMOND-ICON und Monsoon-ICON und Beobachtungsdaten.

4.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten wurden von Karol Corko ausschließlich für projektbezogene Arbeiten verwendet.

Reisekosten wurden verwendet zur Teilnahme am Monsoon Kick off meeting, für einen einwöchigen Besuch von Karol Corko am MPI für Meteorologie im August 2022 und für die Teilnahme von Karol Corko an der EGU in 2022, an der AGU in 2022, am PIRE cirrus workshop in 2023 in Friday Harbor, US und am Clouds containig ice particles, workshop in 2023 in Mainz, Germany.

4.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Gelder wurden ausschließlich im Projekt Monsoon eingesetzt um die geplanten Arbeiten und Aufgaben durchzuführen.

4.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Evaluierung der globalen Sturm-auflösende Simulationen (Auflösung von unter ca. 5km) ist sehr wichtig, da herkömmliche Klimamodelle weiterhin Probleme haben Wolken realistisch zu simulieren und die Sturm-auflösende globale Modellierung als ‚way forward' angesehen wird. Während Prozesse, die die Bewölkung maßgeblich bestimmen, von den Sturm-auflösenden Modellen sehr viel realistischer simuliert werden, zeigt sich aber dass die von diesen Modellen simulierte Bewölkung noch immer eine große Variabilität aufweist. Die Simulationen dieser Sturm-auflösenden Modelle werden aber bereits genutzt um Parametrisierungen für Klimamodelle abzuleiten. Daher ist es besonders wichtig diese Simulationen mithilfe von modernen Beobachtungsdaten zu evaluieren und Simulationen verschiedener hochauflösender Modelle zu vergleichen, um etwas über die verbleibende Unsicherheit in diesen Simulationen zu lernen.

4.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In letzter Zeit gab es einige Publikationen, die die tropische Konvektion in den DYAMOND Simulationen studieren, e.g. Turbeville et al (2022) and Nugent et al. (2022). Dabei ging es um verwandte Themen wie den Wassereintrag in die tropische Stratosphäre, konvektive Organisation und die Charakterisierung des konvektiven Lebenszyklus anhand des Einflusses von Konvektion auf die OLR und die kurzwellige Albedo. Unsere Arbeiten sind komplementär zu diesen Studien.

4.6 Publikationen + Vorträge / Poster

Corko, K., U. Burkhardt, F. Ewald, L. Bugliaro and M. Köhler Evaluation of cirrus cloudiness in high resolution global simulations. In planning

Corko, K: Properties of tropical ice clouds in high resolution global simulations and their evaluation, PhD-thesis LMU München, in preparation.

Corko, K, U. Burkhardt, F. Ewald and M. Köhler Reasons for inter-model variability in the tropical total ice water path simulated by the convection permitting DYAMOND models, submitted to JGR Atmospheres.

Corko, Karol and Burkhardt, Ulrike and Ewald, Florian and Köhler, Martin (2023) Evaluation of the tropical upper tropospheric cloudiness simulated by the convection permitting DYAMOND models. 2023 PIRE cirrus workshop, 2023-09-05 - 2023-09-09, Friday Harbor, US.

Corko, Karol and Burkhardt, Ulrike and Ewald, Florian and Köhler, Martin (2023) Evaluation of the tropical upper tropospheric cloudiness simulated by the storm resolving models (SRMs) from DYAMOND project. Clouds containig ice particles, 2023-07-24 - 2023-07-26, Mainz, Germany.

Corko, Karol und Burkhardt, Ulrike (2022) Impact of tropical convection on upper tropospheric cirrus in high resolution DYAMOND simulations. EGU 2022, 2022-05-23 - 2022-05-27, Wien, Austria.

Corko, Karol und Burkhardt, Ulrike und Köhler, Martin (2022) Evaluation of tropical anvil cirrus in high-resolution DYAMOND simulations. AGU FALL MEETING, 2022-12-12 - 2022-12-16, Chicago.

Burkhardt, Ulrike und Corko, Karol und Verma, Pooja (2022) Evaluation of cirrus cloud properties in storm-resolving simulations. AGU Meeting, 2022-12-12 - 2022-12-16, Chicago.

4.7 Literatur

Bony, S., Dufresne, J.-L., Treut, H., Morcrette, J.-J., and Senior, C. (2004). On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. Climate Dynamics, 22:71-86.

Li, J.-L. F., et al. (2012), An observationally based evaluation of cloud ice water in CMIP3 and CMIP5 GCMs and contemporary reanalyses using contemporary satellite data, J. Geophys. Res., 117, D16105, doi:10.1029/2012JD017640.

Li, J.-L. F., Xu, K.-M., Tsai, Y.-C., Lee, W.-L., Jiang, J. H., Yu, J.-Y., et al. (2023). Evaluation of radiatively active frozen hydrometeors mass in CMIP6 global climate models using CloudSat-CALIPSO observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2023JD039200.https://doi.org/10.1029/2023JD039200

Nugent, J. M., Turbeville, S. M., Bretherton, C. S., Blossey, P. N., and Ackerman, T. P. (2022). Tropical cirrus in global storm-resolving models: 1. role of deep convection. Earth and Space Science, 9:e2021EA001965.

Rybka, H., Burkhardt, U., K¨ohler, M., Arka, I., Bugliaro, L., G¨orsdorf, U., Horv´ath, A., Meyer, C. I., Reichardt, J., Seifert, A., and Strandgren, J. (2021). The behavior of high-cape (convective available potential energy) summer convection in large-domain large-eddy simulations with icon. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(6):4285–4318.

Stevens, B., and S. Bony, 2013: What Are Climate Models Missing? Science, 340 (6136), 1053-1054.

Stevens, B., and Coauthors, 2019a: DYAMOND: The DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. Prog. in Earth and Planet. Sci., 1-24.

Stevens, B., and Coauthors, 2019b: Large-eddy and Storm Resolving Models for Climate Prediction - The Added Value for Clouds and Precipitation. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 1-115.

Stubenrauch, C.J., W.B. Rossow, S. Kinne, S. Ackerman, G. Cesana, H. Chepfer, L. Di Girolamo, B. Getzewich, A. Guignard, A. Heidinger, B.C. Maddux, W.P. Menzel, P. Minnis, C. Pearl, S. Platnick, C.

Poulsen, J. Riedi, S. Sun-Mack, A. Walther, D. Winker, S. Zeng, and G. Zhao, 2013: Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX Radiation Panel. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 94, no. 7, 1031-1049, doi:10.1175/BAMS-D-12-00117.1

Turbeville, S. M., Nugent, J. M., Ackerman, T. P., Bretherton, C. S., and Blossey, P. N. (2022). Tropical cirrus in global storm-resolving models: 2. cirrus life cycle and top-of-atmosphere ra-diative fluxes. Earth and Space Science, 9(2):e2021EA001978. e2021EA001978 2021EA001978.

5 Zusammenarbeit innerhalb des Verbund

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konzentrierte sich in erster Linie auf die Arbeitspakete WP1-3, die die Implementierung und Anpassung des ICON-Modells an die JUWELS-Booster-Cluster am JSC beinhalteten. Diese Arbeiten wurden von allen Projektteilnehmern gemeinsam betreut. Zur Erleichterung der Koordinierung wurden regelmäßige Projekttreffen einberufen, wenn auch während der Coronavirus-Pandemie nur virtuell.

Bei der Entwicklung des ICON-Modells wurde die bestehende Forschungsinfrastruktur im Zusammenhang mit ICON genutzt. Der Zugriff auf das Modell und die laufenden Entwicklungen in den Partnerinstituten wurde durch ein gut eingeführtes und gemeinsam genutztes Versionskontrollsystem sichergestellt. Alle Partner trugen zur Verbesserung des ICON-Codes bei, insbesondere zur Verbesserung der internen Kommunikation und zur Aktualisierung der Eingabe-/Ausgabebibliothek im Hinblick auf die Kompatibilität mit modernen Architekturen, wie z. B. GPUs. Diese Erweiterungen wurden wie geplant erfolgreich umgesetzt. Die deutschen Projektpartner wurden auch zum Kick-off-Meeting des vom BMBF finanzierten WarmWorld-Projekts eingeladen, so dass die Erkenntnisse und Ergebnisse des Monsoon-Projekts über das ICON-Konsortium an die breitere ICON-Gemeinschaft weitergegeben werden konnten, was weitere Fortschritte förderte.

Ursprünglich war geplant, mehrere Workshops mit deutschen und chinesischen Partnern zu veranstalten, um den Projektfortschritt und weitere Aktionspläne zu diskutieren. Aufgrund von Reisebeschränkungen im Rahmen von COVID-19 wurden jedoch wöchentliche virtuelle Treffen anberaumt, die einen regelmäßigen Austausch zwischen deutschen und chinesischen Projektwissenschaftlern zu technischen und wissenschaftlichen Fragen ermöglichen. Neben der Nutzung der JUWELS-Booster-Cluster am JSC wurden Anstrengungen unternommen, das ICON-Modell für den Tianhe-Supercomputer am National Supercomputing Center of Tianjin anzupassen. Trotz dieser Bemühungen konnte die Rechenleistung von ICON auf Tianhe nicht mit der auf den JUWELS-Booster-Clustern am JSC oder Levante am DKRZ mithalten. Daher wurde beschlossen, alle geplanten Monsunsimulationen in Deutschland durchzuführen. Der im Projekt angestellte Wissenschaftler, Herr Karol Corko, wurde eingeladen, am NextGEMs Hackathon teilzunehmen und das MPI-M zu besuchen, wo er zusammen mit dem Projektwissenschaftler Lukas Kluft an der Analyse der Monsunsimulationen arbeiten konnte. Alle Ergebnisse der Monsun-Simulationen wurden auch den chinesischen Partnern zur Verfügung gestellt, damit diese ihre eigenen Forschungsarbeiten durchführen können.

Im April 2023, nachdem China die Grenzkontrolle im Rahmen von COVID-19 aufgehoben hatte, wurden die Projektleiter Prof. Dr. Bjorn Stevens und Dr. Chao Li zu einem Besuch bei den Projektpartnern in Peking eingeladen, wo sie die Projektergebnisse vorstellten und die weitere Zusammenarbeit bei der Modellierung und Simulation globaler Stürme diskutierten. Im August 2023 fand ein Workshop zum Thema “Tropische Wirbelstürme” am Typhoon Center in Shanghai statt. Auf dieser Konferenz wurden die ICON-Simulationen aus unserem Projekt vorgestellt und mit den Expertinnen und Experten des Typhoon Centres besprochen. Im Anschluss wurden der Datensatz auch auf der International Conference on Tibetan Plateau and High Mountains Energy and Water Exchanges (TEWEX-CLIMA) 2023 vorgestellt. Die Teilnahme an beiden Events wurde überaus positiv wahrgenommen. Hierbei konnten sowohl die Ergebnisse des Projektes einem breiteren Publikum präsentiert werden, als auch Kontakte für künftige Projekte geknüpft werden.