

# Verbundschlussbericht

## **Verbundvorhaben: Dekadische Klimavorhersage in der Westafrikanischen Monsunregion und in der Zyklogeneseregion des tropischen Atlantiks (DEPARTURE)**

**09. Februar 2016**

Zuwendungsempfänger: Prof. Paeth, Universität Würzburg Prof. Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) Prof. Fink, Universität zu Köln Prof. Ahrens, Goethe-Universität Frankfurt Dr. Panitz, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Prof. Kunstmann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Förderkennzeichen: 01LP1129A 01LP1129B 01LP1129C 01LP1129D 01LP1129E 01LP1129F
--	--

Vorhabenbezeichnung: DEPARTURE

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2011 – 31.08.2015

Berichtszeitraum: 01.09.2011 – 31.08.2015

# Inhaltsangabe

I. Erreichte Ziele des Verbundprojektes	3
II. Arbeiten und Ergebnisse der Teilprojekte	3
III. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Universität Würzburg (01LP1129A)	5
IV. Ergebnisbericht des Teilprojekts des MPI-M (01LP1129B)	16
V. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Universität zu Köln (01LP1129C)	21
VI. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Goethe-Universität Frankfurt (01LP1129D)	29
VII. Ergebnisbericht des Teilprojekts des KIT (01LP1129E)	54
VIII. Ergebnisbericht des Teilprojekts des KIT (01LP1129F)	62
IX. Literaturverzeichnis	75

## **I. Erreichte Ziele des Verbundprojektes**

Gemäß dem Projektantrag wurden folgende Ziele des Verbundprojektes erreicht: Die Auswertung existierender ECHAM5 und REMO-Simulationen (Meilenstein M1) wurde durchgeführt. Die veränderte Landnutzung wurde für vergangene und zukünftige Zeiträume entwickelt und als Randbedingung in CCLM implementiert (Meilenstein M2). Für das Aerosolforcing (Meilenstein M3) wurden Sensitivitätsstudien mit verbesserter Aerosol-Hintergrundklimatologie mit CCLM durchgeführt. Nach Koordination von Modell-Setup und Boden-Spin-up mit Reanalysen wurden 104 transiente Simulationen (und weitere Sensitivitätsanalysen) von CCLM, WRF und REMO mit globalem ERA40-, ERA-Interim- und MPI-ESM-Antrieb und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen als 3-Member-Ensembles für die Hindcast-Dekaden 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 und 2001-2010 durchgeführt (Meilensteine M4, M5, M6). Hinsichtlich der Anfangs- und Randbedingungen wurde das RCP4.5-Treibhausgasszenario gewählt und verschiedene Sensitivitätsstudien mit verbesserter Landnutzung (M2), Aerosolforcing (M3), Atmosphären-Vegetations-Interaktion und Boden-Initialisierung (M9) und solche mit Ozean-Kopplung (M8) und statistischer SST-Korrektur mit verschiedenen RCMs realisiert. In Koordination der Projektpartner und unter Berücksichtigung der Skill Scores von MiKlip wurde das Multi-Modell-Ensemble ausgewertet und detaillierte Abschätzungen zu Modellfehler (Bias) und Vorhersagepotential (Korrelation, MSSS) der verschiedenen RCMs und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen bezüglich des WAM-Niederschlags und der atlantischen Hurrikanaktivität durchgeführt (Meilenstein M7). Für die Simulationen wurden eine Kopplung des RCMs REMO mit dem globalen Ozeanmodell MPIOM (Meilenstein M8), ein Austausch des Soil-Vegetation-Atmosphäre-Transfer (SVAT)-Moduls TERRA\_ML von CCLM durch das verbesserte VEG3D-Modul und eine verbesserte Boden-Initialisierung in CCLM durch Spin-up mit realistischen Antriebsdaten und Datenassimilation von Satellitendaten (Meilenstein M9) entwickelt und implementiert. Eine statistische Postprozessierung des Modelloutputs wurde in Form einer SST-Korrektur des fehlerhaften globalen MPI-ESM-Antriebs für Simulationen mit CCLM durchgeführt (Meilenstein M10). Da die ersten Hindcast-Dekaden ein unklares Bild des Vorhersage-Skills des Multi-Modell-Ensembles zeigten, wurden die vorliegenden Computerressourcen zur Klärung und Verbesserung des Skills für weitere Dekaden der Vergangenheit und zusätzliche Anfangs- und Randbedingungen (SST-Korrektur, Boden-Initialisierung) verwendet und auf die dekadische Vorhersage der zukünftigen Dekade 2015-2025 (Meilenstein M11) verzichtet. Insgesamt stimmen die erreichten Ziele folglich gut mit der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung im Projektantrag überein.

## **II. Arbeiten und Ergebnisse der Teilprojekte**

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten an Modellverbesserungen, Simulationen und Auswertungen den einzelnen Teilprojekten von DEPARTURE zugeordnet. Tab. II.1 bietet einen Überblick über alle durchgeführten Simulationen:

An der Universität Würzburg wurde das Gesamtprojekt koordiniert. Weiterhin wurde die Auswertung existierender ECHAM5 und REMO-Simulationen (M1) durchgeführt und die transienten Simulationen von REMO-W in Standardversion mit globalem ERA40-, ERA-Interim- und MPI-ESM-Antrieb als 3-Member-Ensembles für alle vier Hindcast-Dekaden realisiert (M4). Schließlich wurde das gesamte Multi-Modell-Ensemble von DEPARTURE koordiniert ausgewertet und detaillierte Abschätzungen zu Bias, Korrelation und MSSS der unterschiedlichen RCMs und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen bezüglich des WAM-Niederschlags und der atlantischen Hurrikanaktivität durchgeführt (M7).

Tab. II.1: Anzahl der durchgeführten dekadischen Vorhersagesimulationen der Regionalmodell-Ensembles mit MPI-ESM-Antrieb in Standardversion, mit Ozeankopplung und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen für vier ausgewählte Hindcast-Dekaden (siehe Text zur Modellbeschreibung). Weitere Sensitivitätsstudien mit ERA40/ERA-Interim-Antrieb und zusätzlichen Randbedingungen sind nicht aufgeführt.

Modell (version)	Anzahl der Simulationen pro Hindcast-Dekade			
	1966–1975	1981–1990	1991–2000	2001–2010
WRF	2	2	2	2
REMO-W	3	3	3	3
REMO-H	3	3	3	3
REMO-O1	3	3	3	3
REMO-O2	3	3	3	3
CCLM	3	3	3	3
CCLM-AOD	-	-	-	3
CCLM-AOD/SST	3	-	-	3
CCLM-SOIL	-	-	-	3
CCLM-VEG	-	-	-	3
CCLM-LUC	3	3	3	3
CCLM-LUV	3	3	-	3

Am KIT Garmisch-Partenkirchen wurden die transienten Simulationen von WRF mit globalem MPI-ESM-Antrieb aufgrund eines deutlich höheren Rechenaufwands als 2-Member-Ensembles (statt 3) für alle vier Hindcast-Dekaden durchgeführt (M6). Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher Parametrisierungen getestet.

An der Universität zu Köln wurden in CCLM die jährlich konstanten Landnutzungsklassen von ECOCLIMAP durch GLC2000 ersetzt (CCLM-LUC). Zusätzlich wurde anhand eines statistischen Modells eine jährlich variable Landnutzung für vergangene und zukünftige Zeiträume entwickelt und als Randbedingung in CCLM implementiert (CCLM-LUV). Mit beiden Modellversionen wurden Sensitivitätsstudien mit globalem MPI-ESM-Antrieb als 3-Member-Ensembles für verschiedene Hindcast-Dekaden durchgeführt (M2).

Am MPIM Hamburg wurde ausgehend von einer REMO-Version mit verbesserter Parametrisierung in den Tropen (REMO-H) die hochaufgelöste Kopplung des Regionalmodells REMO mit dem globalen Ozeanmodell MPIOM mit zwei unterschiedlichen Spin-up-Versionen (REMO-O1, REMO-O2) entwickelt und implementiert. Weiterhin wurden die transienten Simulationen von REMO-H, REMO-O1 und REMO-O2 mit globalem MPI-ESM-Antrieb als 3-Member-Ensembles für alle vier Hindcast-Dekaden realisiert (M8). Schließlich wurde ein Tracking-Algorithmus zur Ermittlung der Zugbahnen von tropischen Stürmen und Hurrikans im Atlantik entwickelt und auf alle durchgeführten Regionalmodell-Simulationen angewandt, um eine koordinierte Auswertung der atlantischen Hurrikanaktivität zu ermöglichen (M7).

An der Universität Frankfurt wurde eine optimierte Initialisierung von Bodentemperatur und -feuchte in CCLM durch Spin-up von TERRA\_ML mit realistischen Antriebsdaten und Datenassimilation von Satellitendaten entwickelt und implementiert (CCLM-SOIL). Sensitivitätsstudien mit verbesserter Bodeninitialisierung und globalem MPI-ESM-Antrieb wurden als 3-Member-Ensembles für die Hindcast-Dekade 2001-2010 durchgeführt (M9).

Am KIT Karlsruhe wurden die transienten Simulationen von CCLM mit globalem ERA40-, ERA-Interim- und MPI-ESM-Antrieb als 3-Member-Ensembles für alle vier Hindcast-Dekaden durchgeführt (M5). Weiterhin wurde die Aerosol Optische Dichte von Tanré durch die verbesserte Aerosol-Hintergrundklimatologie von AeroCom substituiert (CCLM-AOD) und zusätzlich in Form einer statistischen Postprozessierung des Modelloutputs die fehlerhaften globalen MPI-ESM SSTs durch realistischere ERA40/ERA-Interim SSTs ersetzt (CCLM-AOD/SST). Das Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer (SVAT)-Modul TERRA\_ML von

CCLM wurde durch das verbesserte VEG3D-Modul ausgetauscht (CCLM-VEG). Schließlich wurden Sensitivitätsstudien mit verbessertem Aerosolforcing (M3), statistischer SST-Korrektur (M10) und realistischerer Atmosphären-Vegetations-Interaktion (M9) sowie globalem MPI-ESM-Antrieb als 3-Member-Ensembles für die Hindcast-Dekade 2001-2010 und teilweise auch für 1966-1975 realisiert.

Die Hauptergebnisse des DEPARTURE-Projektes zu Bias und dekadischer Vorhersagbarkeit von WAM-Niederschlag und atlantischer Hurrikanaktivität verschiedener RCMs und verbesserter Anfangs- und Randbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Beim Niederschlagsbias zeigen die RCMs einige Added Values im West- und Zentral-Sahel aber eine deutliche Verstärkung des positiven MPI-ESM-Bias über der Guinea-Küste, der auf einem positiven SST-Bias im Südost-Atlantik beruht und durch die Ozeankopplung von REMO stark verbessert werden kann. Der Niederschlagsbias kann in jeder Region durch unterschiedliche verbesserte Randbedingungen reduziert werden: SSTs und Landnutzung in der Guinea-Küste, Vegetation im Zentral-Sahel und Aerosole im West-Sahel.

Die dekadische Vorhersagbarkeit einer gesamten Dekade zeigt Added Values einzelner RCMs, z.B. im West-Sahel und in 1966-1975, aber erreicht selten signifikant positive Korrelationen und schwankt deutlich zwischen einzelnen Dekaden. Der gekoppelte Ozean kann manche Korrelationen von REMO verbessern. Die intra- und interdekadische Vorhersagbarkeit innerhalb und zwischen allen vier untersuchten Dekaden zeigt klare Added Values von mindestens einem RCM (v.a. REMO-W und WRF bzw. CCLM und REMO-H) in jeder Region. Die verbesserten Randbedingungen zeigen ebenso große Variabilität der dekadischen Vorhersagbarkeit über die Dekaden aber erreichen einige signifikante Added Values (Ozeankopplung, SSTs und Aerosole in der Guinea-Küste, Landnutzung im Zentral-Sahel und Landnutzung und Boden im West-Sahel), die teilweise in weiteren Dekaden geprüft werden sollten. Bei der intradekadischen Vorhersagbarkeit innerhalb einer Dekade weisen alle verbesserten Anfangs- und Randbedingungen ein klares Potential für Added Values auf.

Hinsichtlich der atlantischen tropischen Stürme und Hurrikans zeigen alle ungekoppelten RCMs einen positiven Bias in der simulierten Anzahl und Intensität, geringer im nicht-hydrostatischen CCLM als im hydrostatischen REMO, der durch die Ozeankopplung von REMO deutlich reduziert werden kann. Die dekadische Vorhersagbarkeit beider Variablen über eine gesamte Dekade schwankt stark über die Dekaden und erreicht selten signifikant positive Korrelationen. Doch manche Korrelationen von REMO werden durch den gekoppelten Ozean verbessert. Bei der intradekadischen und interdekadischen Vorhersagbarkeit innerhalb und zwischen allen vier untersuchten Dekaden zeigen sich einige signifikante Korrelationen bei Anzahl und Intensität für unterschiedliche RCMs, wobei CCLM bei Ersterer deutlich höhere Korrelationen erreicht als REMO.

### **III. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Universität Würzburg (01LP1129A)**

Im Folgenden werden die wissenschaftlichen Arbeiten und deren Ergebnisse präsentiert, die von der Universität Würzburg im Rahmen des DEPARTURE-Projektes durchgeführt und erzielt wurden. Die Universität Würzburg beschäftigte sich neben der Gesamtkoordination des Projektes hauptsächlich mit folgenden Projektzielen: Auswertung existierender ECHAM5 und REMO-Simulationen (M1), Realisierung von REMO-Simulationen für alle vier Hindcast-Dekaden (M4) und koordinierte Auswertung des gesamten Multi-Modell-Ensembles zu Bias und Vorhersagbarkeit der RCMs und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen bezüglich des WAM-Niederschlags und der atlantischen Hurrikanaktivität (M7).

### III.1. Voruntersuchungen mit ECHAM5 und REMO

Das Projekt DEPARTURE beabsichtigt, die dekadische Klimavorhersagbarkeit in der westafrikanischen Monsun (WAM)-Region und der atlantischen Region tropischer Zyklonogenese zu ermitteln. Der erste Arbeitsschritt beruht auf der Auswertung bereits existierender Klimamodellsimulationen des GLOWA IMPETUS-Projektes bezüglich der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsvariabilität über Westafrika im Zeitraum 1961-1999. Dabei handelt es sich um ein Ensemble von fünf Simulationen des globalen Klimamodells ECHAM5 (T42 ~ 2,8125°) angetrieben mit beobachteten Meeresoberflächentemperaturen (sea surface temperatures SST) und um ein entsprechendes Ensemble der darin genesteten Simulationen des regionalen Klimamodells REMO (0,5°). Zur Validierung werden unterschiedliche aggregierte Beobachtungsdatensätze von CRU, GPCC (0,5°) und GPCP (2,5°) herangezogen.

Zunächst werden regional gemittelte Niederschlagszeitreihen über der Guineaküste (Landgitterboxen 4-13°N/ 20°W-16°E) und der Sahelzone (Landgitterboxen 13-23°N/ 20°W-16°E) im Zeitraum 1961-1999 gebildet. Abb. III.1 (links) zeigt eine leichte Unterschätzung der beobachteten Niederschläge über der Guinea-Küste in beiden Klimamodellen und die deutliche Verbesserung der systematischen ECHAM5-Modellfehler durch die regionale Klimamodellierung mit REMO besonders im Sommer. In der Sahelzone überschätzen die Modellsimulationen die beobachteten Niederschläge dagegen oft leicht. Der Added Value von REMO tritt in der Sahelzone und im Winter der Guineaküste weniger deutlich hervor und die Unterschiede zwischen den einzelnen Beobachtungsdatensätzen steigen stark an. Der beobachtete Trend im Zeitraum 1961-1999 zeigt eine deutliche Niederschlagsabnahme über der Guinea-Küste aufgrund einer starken Abnahme in den 1970er Jahren hin zur Saheldürre mit anschließender geringer Zunahme. ECHAM5 zeigt eine geringere Trendintensität im Gesamtjahr und einen positiven Trend im Sommer, was den Beobachtungen widerspricht. REMO kann die beobachteten negativen Trends deutlich besser reproduzieren, was v.a. in den über 10 Jahre tiefpassgefilterten Zeitreihen deutlich wird, und präsentiert somit einen weiteren Added Value im Vergleich zum globalen Klimamodell. Schließlich können sogar einige Übereinstimmungen in der interannuellen Niederschlagsvariabilität zwischen Beobachtungen und durch SST angetriebenen Modellsimulationen gefunden werden, vor allem über der Guineaküste zu Beginn der Simulationsperiode (1960-1970) und bezüglich der stärksten Dürre im Untersuchungszeitraums (1983/84). Solche Übereinstimmungen sind weniger deutlich im Winter und über der Sahel Zone, aber offenbaren den starken Einfluss der Randbedingung SST auf die dekadische Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags.

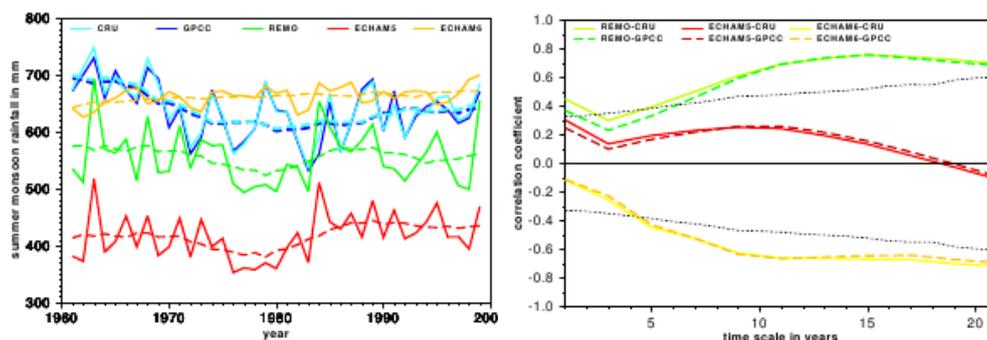


Abb. III.1: Beobachtete und simulierte Zeitreihen des über der Guineaküste gemittelten Sommerniederschlags (Juni-Juli-August) [mm] im Zeitraum 1961-1999 mit über 10 Jahre tiefpassgefilterten Zeitreihen als gestrichelte Linien (links) und entsprechende Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Zeitreihen für unterschiedliche Tiefpassfilter [Jahre] mit dem 5% Konfidenzintervall als gepunktete, schwarze Linie, welches die zunehmende Autokorrelation der gefilterten Zeitreihen berücksichtigt (rechts). Für die simulierten Zeitreihen werden Ensemblemittel herangezogen.

Schließlich werden die Korrelationen zwischen simulierten und beobachteten Niederschlagszeitreihen im Zeitraum 1961-1999 für unterschiedliche Tiefpassfilter über 1-21 Jahre gebildet (Abb. III.1, rechts). Dabei wird deutlich, dass der Korrelationskoeffizient von 0-0,4 für Jahreswerte bis auf 0,7-0,8 für tiefpassgefilterte Niederschlagswerte (11-21 Jahre-Mittel) ansteigt, was auf eine hohe dekadische Vorhersagbarkeit von Monsunniederschlägen bereits durch die einzige bisher betrachtete Randbedingung SST hinweist. Die regionale Klimamodellierung mit REMO zeigt deutlich höhere Korrelationskoeffizienten als ECHAM5 über der Guinea-Küste im Sommer und leicht höhere im Gesamtjahr auf der dekadischen Zeitskala und somit einen Added Value in der dekadischen Vorhersagbarkeit. Das 5%-Konfidenzintervall wird von REMO nach ungefähr 5 Jahren überschritten. In der Sahelzone übertrifft die erklärte Varianz von ECHAM5 in manchen Jahreszeiten jedoch leicht diejenige von REMO möglicherweise aufgrund des stärkeren Rauschens in der höheren Modellauflösung.

Somit zeigen die bereits existierenden Simulationen von ECHAM5 und REMO deutliche Added Values der regionalen Klimamodellierung bei Mittelwert, Trend und dekadischer Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags, besonders über der Guineaküste im Sommer. Weiterhin stellt sich die beobachtete Randbedingung SST als vielversprechend für die dekadische Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags heraus und erklärt bereits über 50% der beobachteten Niederschlagsvarianz.

### III.2. Validierung von MPI-ESM Baseline 0

Nun wird eine adäquate Validierung des simulierten WAMs im gekoppelten, globalen Klimamodells MPI-ESM (Baseline 0, Low Resolution LR: T63 ~ 1,875°/ GR15 ~ 1,5°) durchgeführt, welches auf ECHAM6/MPIOM basiert, die Grundlage des dekadischen MiKlip-Vorhersagesystems darstellt und somit den globalen Antrieb für alle im Projektverlauf geplanten Simulationen regionaler Klimamodelle liefert. Diese globalen Simulationen werden mit möglichst realistischen ozeanischen Anfangsbedingungen initialisiert (MPI-ESM-Assimilationslauf „genudgt“ an eine mit atmosphärischen NCEP-Reanalysen angetriebene MPIOM-Simulation) und entwickeln sich frei ohne Nudging an beobachtete SST wie zuvor bei ECHAM5. Wir untersuchen die jeweils 10 Ensemble member der dekadischen Hindcast-Simulationen, die in den Jahren 1961, 1971, 1981 und 1991 mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen pro Ensemble member initialisiert wurden.

Abb. III.1 (links) zeigt die Niederschlagszeitreihen im Sommer über der Guineaküste im Zeitraum 1961-1999 für das Ensemblemittel von MPI-ESM im Vergleich zu den Modellen und Beobachtungen aus den Voruntersuchungen. Dabei werden die vier dekadischen Hindcast-Simulationen von MPI-ESM mit den Initialisierungsjahren 1961, 1971, 1981 und 1991 aneinandergehängt, weil keine deutlichen Inhomogenitäten bei den Übergangsjahren gefunden werden. MPI-ESM stimmt mit den beobachteten Mittelwerten relativ gut überein, zeigt aber in der dekadischen Variabilität eine stetige Niederschlagszunahme und keine Anzeichen der beobachteten westafrikanischen Dürre in den 1970er und 1980er Jahren. Die Korrelation zwischen den simulierten und beobachteten Niederschlagszeitreihen im Zeitraum 1961-1999 für unterschiedliche Tiefpassfilter über 1-21 Jahre (Abb. III.1, rechts) zeigen deutlich negative Zusammenhänge zwischen MPI-ESM und Beobachtungen auf der dekadischen Zeitskala aufgrund der gegensätzlichen Niederschlagstrends im Untersuchungszeitraum. Das 5%-Konfidenzintervall wird von MPI-ESM nach ungefähr 5 Jahren überschritten.

Da die SST-Randbedingung die dekadische Vorhersagbarkeit des WAMs stark beeinflusst und sich deutlich zwischen den globalen MPI-ESM- und ECHAM5-Simulationen unterscheidet, wird die mit MPI-ESM simulierte globale SST-Variabilität mit GISST-Beobachtungen (1°) validiert, um die ungünstige Validierung des simulierten Monsunniederschlags näher zu

beleuchten. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede und gegensätzliche Muster bei den dekadischen Trends über fast allen Ozeanregionen. Für eine detailliertere SST-Analyse werden 12 Ozeanregionen ausgewählt, die in bestimmten Monaten starke Einflüsse auf den WAM aufweisen, z.B. Nordatlantik im Gesamtjahr, tropischer Pazifik im Frühling, Nordpazifik und umliegende Ozeanregionen im Sommer. Diese Auswahl folgt der maximalen Korrelation des beobachteten Sommerniederschlags über der Guineaküste aus GPCC im Zeitraum 1961-1999 mit monatlichen SSTs aus GISST, welche dem untersuchten Sommer vorausgehen. Die regional gemittelten SST-Zeitreihen dieser Ozeanregionen zeigen meist deutliche Unterschiede zwischen MPI-ESM und GISST-Beobachtungen bei Mittelwerten, interannueller Variabilität und dekadischen Trends im Zeitraum 1961-1999. Für jede Ozeanregion wird die Korrelation zwischen beobachteten und simulierten SSTs pro MPI-ESM-Hindcast-Dekade und über die jeweiligen dekadischen Mittel im Zeitraum 1961-1999 gebildet. Dabei werden die MPI-ESM-Ensemblemittel und die 10 einzelnen Simulationen untersucht. Bei den dekadischen Mitteln ergeben fast alle Ozeanregionen negative Korrelationen aufgrund von gegensätzlich simulierten und beobachteten dekadischen SST-Trends (Abb. III.2), allerdings selten statistisch signifikant. Bei den Korrelationen innerhalb der Dekaden zeigen sich kaum signifikante positive und negative Korrelationskoeffizienten auf der interannuellen Zeitskala und kein deutliches Muster über die einzelnen Regionen, Dekaden oder Simulationen.

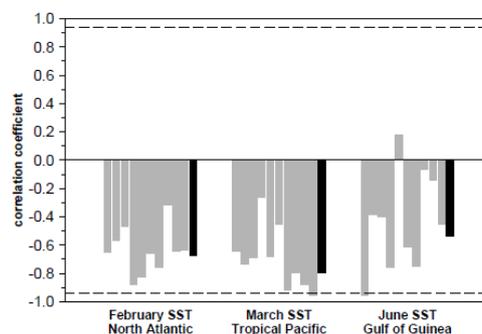


Abb. III.2: Korrelationskoeffizienten zwischen beobachteten (GISST) und simulierten (MPI-ESM) dekadisch gemittelten SST-Zeitreihen im Zeitraum 1961-1999 für die angegebenen Monate und Ozeanregionen. Die grauen Balken kennzeichnen die jeweiligen 10 MPI-ESM-Simulationen und die schwarzen Balken die Ensemblemittel. Die gestrichelten Linien markieren das 95%-Konfidenzintervall.

Als Hindcast-Zeiträume für die regionalen Klimamodellsimulationen in DEPARTURE werden die Dekaden 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 und 2001-2010 gewählt, welche als entscheidende Episoden der historischen Entwicklung des WAMs angesehen werden. Aufgrund des starken SST-Einflusses auf den WAM-Niederschlag werden nur die MPI-ESM-Simulationen als globaler Antrieb ausgewählt, welche in voriger SST-Validierung die beste, schlechteste und eine mittlere Qualität aufweisen, um trotz beschränkter Rechenzeit das gesamte Spektrum der SST-Validierung abzudecken. Als Gütemaß wird die Summe der Korrelationskoeffizienten zwischen beobachteten und simulierten SST-Zeitreihen der 12 Ozeanregionen in einer Dekade herangezogen, gewichtet nach der Bedeutung der Ozeanregion für den Sommerniederschlag der Guineaküste. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus den Korrelationskoeffizienten zwischen beobachtetem Niederschlag und SST im Zeitraum 1961-1999 und zeigen ähnlich hohe Werte für alle Ozeanregionen mit Maxima im Nordatlantik und Nordpazifik (Abb. III.3, links). Das Gütemaß der SST-Validierung in der Dekade 1966-1975 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen MPI-ESM-Simulationen (Abb. III.3, rechts). Als Simulationen der besten, mittleren und schlechtesten Güte werden die Läufe 4, 9 und 8 ausgewählt. Für andere Dekaden zeigt sich eine andere Auswahl an Simulationen.

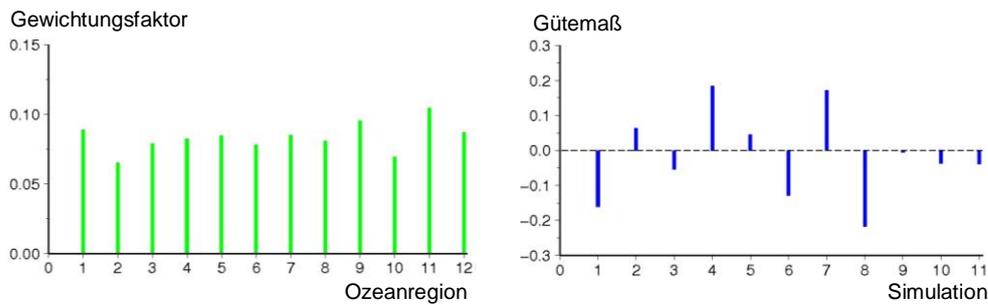


Abb. III.3: Gewichtungsfaktoren der 12 Ozeanregionen (links, 1 Nordatlantik Feb., 2 trop. Pazifik März, 3 Ostmittellmeer März, 4 Nordatlantik Juni, 5 Rotes Meer Juni, 6 Golf von Guinea Juni, 7 Südwestatlantik Juni, 8 Südwestindik Juni, 9 Nordostpazifik Juli, 10 Karibik Aug., 11 Nordwestpazifik Okt., 12 Nordatlantik Nov.) und Gütemaß der SST-Validierung in der Dekade 1966-1975 (rechts) für alle 10 MPI-ESM-Simulationen und das entsprechende Ensemblemittel (markiert als 11).

Somit zeigt der mit MPI-ESM simulierte WAM-Niederschlag gegensätzliche Trends und negative Korrelationen zu Beobachtungen. Diese können durch starke Trendunterschiede und mangelnde Phasenbeziehungen zwischen simulierten und beobachteten SSTs in ausgewählten Ozeanregionen mit Fernwirkung auf den WAM erklärt werden. Ein Gütemaß wird erarbeitet, welches die MPI-ESM-Simulationen mit bester, mittlerer und schlechtester Güte der globalen SST-Validierung als Antriebsläufe für die Regionalmodell-Simulationen auswählt.

### III.3. Regionalmodell-Simulationen mit MPI-ESM Baseline 1-Antrieb

In Absprache mit den Projektpartnern wird das DEPARTURE-Modellgebiet für die regionalen Klimamodellsimulationen mit REMO, CCLM und WRF auf die Region  $59,4^{\circ}\text{W}$ - $59,4^{\circ}\text{E}$  und  $44^{\circ}\text{S}$ - $44^{\circ}\text{N}$  ( $271 \times 201$  Gitterboxen) festgelegt. Es umfasst ganz Afrika, um alle für den WAM und die atlantischen Hurrikans wichtigen Einflussfaktoren zu erfassen. Die horizontalen und vertikalen Auflösungen werden auf  $0,44^{\circ}$  und 31 Level gesetzt. Als Hindcast-Zeiträume werden die Dekaden 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 und 2001-2010 untersucht und als Treibhausgasantrieb das schwach-gemäßigte RCP4.5-Szenario angewandt. Die MPI-ESM-Simulationen mit bester, mittlerer und schlechtester Güte der globalen SST-Validierung werden als globale Antriebsdaten ausgewählt. Da die zweite Modellversion MPI-ESM B1 (Baseline 1, Low Resolution LR) die globale SST-Variabilität deutlich besser darstellt (höhere Korrelationen zu Beobachtungen) als Baseline 0, wird diese nun als globaler Antrieb des dynamischen Downscalings mit REMO, CCLM und WRF verwendet.

Um mehrere Jahre Boden Spin-up bei einem direkten Kaltstart von REMO mit MPI-ESM-Antrieb zu verhindern, wird der REMO-Boden zuerst sechs Jahre mit ERA40- oder ERA-Interim-Reanalysen eingeschwungen und dann als Startboden für die zu simulierende Hindcast-Dekade mit MPI-ESM-Antrieb angewandt. Der Boden Spin-Up des REMO-Laufs mit ERA40-Antrieb im Zeitraum 1960-1965 wird anhand der Bodentemperaturen der untersten Bodenschichten und der Lufttemperatur untersucht, gemittelt über das Modellgebiet. Ein starker Spin-Up von  $\sim 2,5$  K wird deutlich in der untersten Bodenschicht ( $-9,834\text{m}$  bis  $-4,134\text{m}$ ), der im sechsten Jahr das Gleichgewicht erreicht. In der zweit-untersten Bodenschicht ( $-4,134\text{m}$  bis  $-1,232\text{m}$ ) fällt der Spin-Up mit  $\sim 1,5$  K geringer und mit fünf Jahren leicht kürzer aus. In der Lufttemperatur (2m) zeigt sich der Spin-Up nur leicht mit 0,5 K und erreicht das Gleichgewicht bereits im vierten Jahr. Also kann das Bodengleichgewicht in der REMO-Simulation mit ERA40-Antrieb im Zeitraum 1960-1965 erfolgreich erreicht und für Simulationen mit MPI-ESM-Antrieb im Zeitraum 1966-1975 angewandt werden.

Insgesamt wurden an der Universität Würzburg nach Festlegung des Modell-Setups für vier Hindcast-Dekaden jeweils drei REMO-Simulationen und ein dazugehöriger Spin-up-Lauf durchgeführt, der zum Vergleich ebenfalls für die Hindcast-Dekade weitergerechnet wurde.

### III.4. Bias und Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags

Für alle DEPARTURE-Simulationen wird der WAM-Niederschlag (Juni-Juli-August-September JJAS) in den drei westafrikanischen Regionen West-Sahel (17.6°W-7.0°W, 10.1°N-20.2°N), Zentral-Sahel (7.0°W-30.4°E, 10.1°N-20.2°N) und Guinea-Küste (13.6°W-10.1°E, 4.4°N-10.1°N) und allen vier Hindcast-Dekaden bestimmt und der Bias zu Beobachtungen von Willmott-Matsuura der University of Delaware (WMMA) berechnet. Abb. III.4 zeigt den Bias des Globalmodells MPI-ESM und aller Regionalmodelle (RCM): CCLM-ERA, REMO-ERA (ERA-Antrieb), CCLM, WRF, REMO-W (Würzburg, Standardversion), REMO-H (Hamburg, an Tropen angepasste Parametrisierung), REMO-O1 und REMO-O2 (zwei REMO-H-Versionen mit gekoppeltem Ozean) und RCM-MM (RCM-Multi-Modell-Mittel). Der Bias ist konsistent über alle Dekaden. MPI-ESM zeigt eine leichte Unterschätzung im Sahel und eine leichte Überschätzung über der Guinea-Küste aufgrund einer deutlichen Überschätzung der SSTs im Südost-Atlantik nahe der Kaltwasserzunge des Benguela-Stroms. In beiden Sahelregionen finden sich RCMs, die den Bias von MPI-ESM verbessern. Über der Guinea-Küste zeigen alle RCMs deutlich stärkere Überschätzungen als MPI-ESM aufgrund von Veränderungen in Bodendruck, Wind und Verdunstung über dem Atlantik in den hochaufgelösten RCMs. Die Kopplung von REMO-H an das Ozeanmodell MPIOM zeigt eine klare Verbesserung der Niederschlagsüberschätzung über Guinea-Küste und Zentral-Sahel aufgrund einer deutlichen Verbesserung des SST-Bias im Südost-Atlantik durch die Berücksichtigung hochaufgelöster Wechselwirkungen zwischen Regional- und Ozeanmodell.

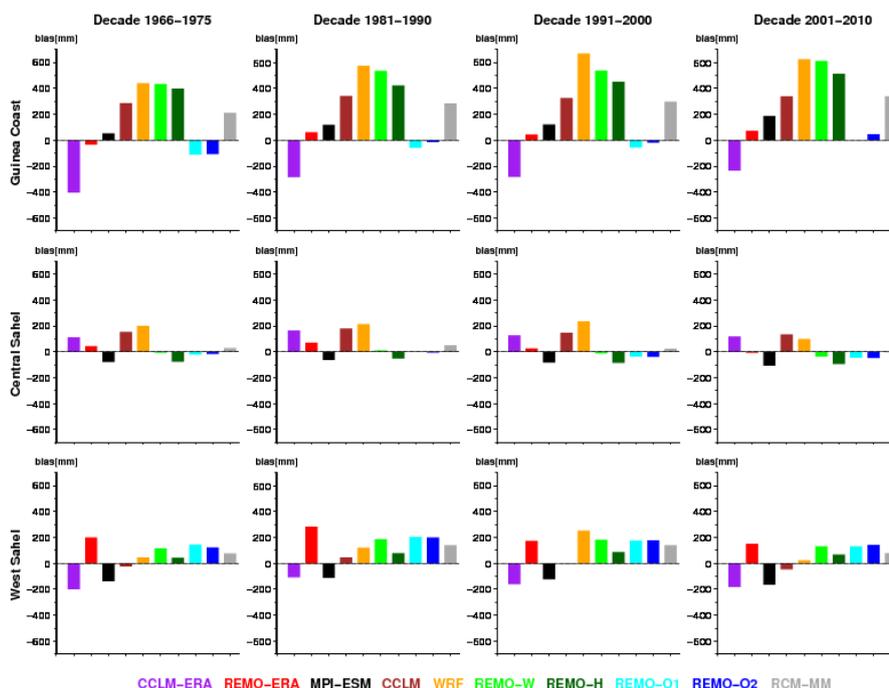


Abb. III.4: Bias zwischen simuliertem und beobachtetem WAM-Niederschlag für unterschiedliche Modellensembles (siehe Beschriftung) und WMMA-Beobachtungen in drei westafrikanischen Regionen und vier Hindcast-Dekaden.

Die dekadische Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags in Global- und Regionalmodellen wird anhand des Korrelationskoeffizienten über die gesamte Hindcast-Dekade analysiert (Abb. III.5). Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen allen Regionen und Dekaden. MPI-ESM erreicht nur in zwei Fällen eine signifikant positive Korrelation zu WMMA-Beobachtungen (Guinea-Küste 2001-2010, Zentral-Sahel 1966-1975). Die ERA-getriebenen

RCMs zeigen wie erwartet häufig gute Übereinstimmungen mit der beobachteten Variabilität, vor allem über Guinea-Küste und Zentral-Sahel. Das Muster der RCMs mit MPI-ESM-Antrieb ist sehr variabel. In fast allen Regionen und Dekaden finden sich RCMs, welche die dekadische Vorhersagbarkeit von MPI-ESM verbessern, vor allem im West-Sahel und in 1966-1975, allerdings werden nur selten signifikant positive Korrelationen erreicht (Guinea-Küste und Zentral-Sahel 1966-1975). Der gekoppelte Ozean von REMO-O1/2 zeigt manche verbesserte Korrelationen im Vergleich zu REMO-H, vor allem über Guinea-Küste und West-Sahel, jedoch nicht konsistent über alle Dekaden. Auch das RCM-Multimodell-Ensemblemittel kann nur selten MPI-ESM verbessern und erreicht keine signifikant positiven Korrelationen.

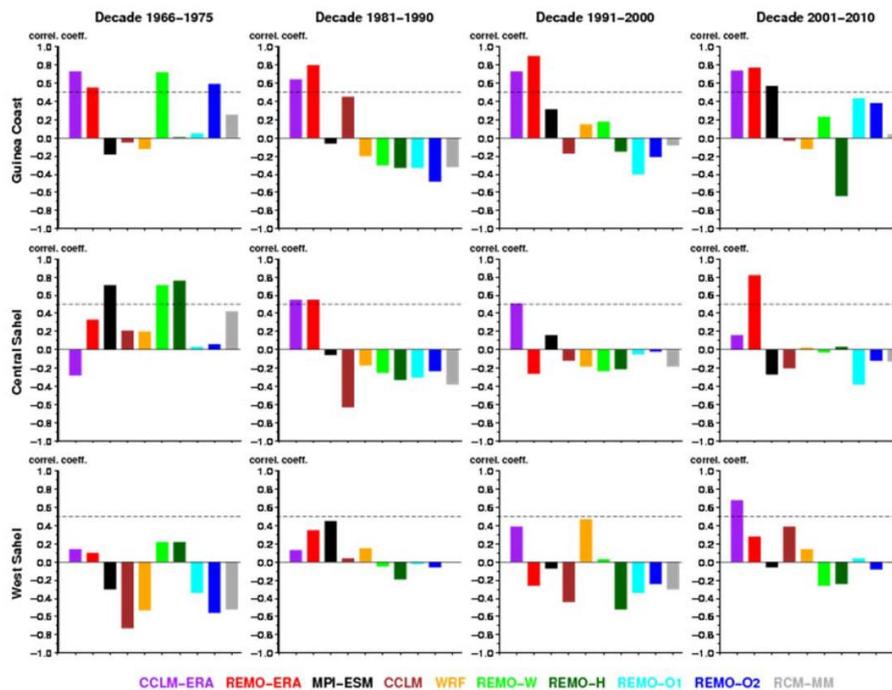


Abb. III.5: Korrelationskoeffizienten zwischen simuliertem und beobachtetem WAM-Niederschlag für unterschiedliche Modellensembles (siehe Beschriftung) und WMMA-Beobachtungen in drei westafrikanischen Regionen und vier Hindcast-Dekaden. Die gestrichelte Linie markiert das 5% Signifikanzniveau.

Aufgrund der eher ungünstigen dekadischen Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags über eine gesamte Dekade werden im Folgenden die intra- und interdekadische Vorhersagbarkeit untersucht. Die intradekadische Vorhersagbarkeit beschreibt diejenige von kürzeren Subperioden innerhalb einer Dekade, die voraussichtlich höhere Korrelationen aufweisen als die gesamte Dekade. Dabei werden nur Subperioden von mindestens drei Jahren berücksichtigt. Die Korrelationen sind sehr variabel und in fast jeder Region und Dekade finden sich RCMs, die MPI-ESM verbessern, weshalb die Ergebnisse zur Verbesserung der Aussagekraft über alle vier Dekaden gemittelt wurden. Abb. III.6 zeigt für jede Region die Korrelationsmuster von MPI-ESM und dem besten RCM. Über der Guinea-Küste zeigt MPI-ESM schwach positive Korrelationen, außer für die ersten Jahre einer Dekade, welche durch REMO-W überall deutlich erhöht werden. Im Zentral-Sahel weist MPI-ESM hohe Korrelationen fast über alle Subperioden auf. Diese werden selbst von den besten RCMs REMO-H und REMO-W nicht erreicht und nur von WRF in den ersten Jahren einer Dekade übertroffen. Im West-Sahel ergeben sich eher negative Korrelationen für MPI-ESM, welche durch WRF stark und REMO-W leicht in den ersten Jahren und über die ganze Dekade verbessert werden. Also zeigen sich in der intradekadischen Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags deutliche Added Values

der RCMs über Guinea-Küste und West-Sahel, im Zentral-Sahel jedoch nur in den ersten Jahren einer Dekade.

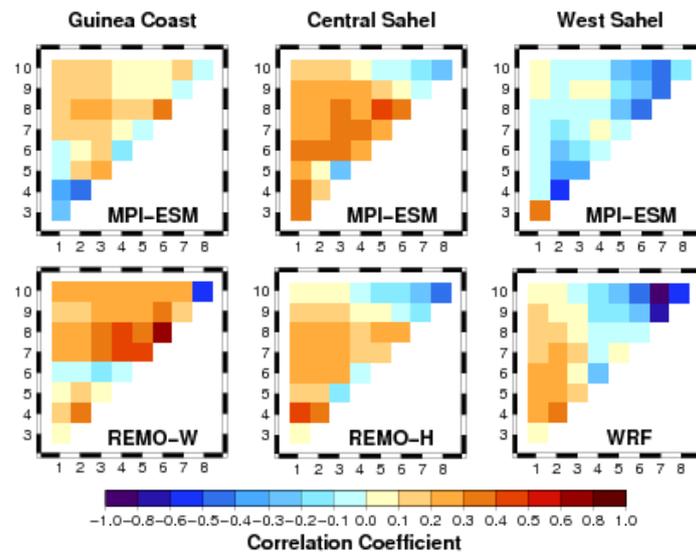


Abb. III.6: Korrelationskoeffizienten zwischen simuliertem und beobachtetem WAM-Niederschlag für MPI-ESM, bestes RCM und WMMA-Beobachtungen für drei westafrikanische Regionen, gemittelt über alle vier Hindcast-Dekaden. Die x-/y-Achse zeigt das erste/letzte Jahr der Subperiode einer Dekade, die zur Korrelation herangezogen wurde.

Die interdekadische Vorhersagbarkeit untersucht diejenige zwischen allen vier Hindcast-Dekaden. Dazu werden alle möglichen Subperioden jeder Dekade gemittelt und die Korrelation über die vier Subperioden-Mittelwerte der vier Dekaden bestimmt. Es sollten höhere Werte als in Abb. III.5 auftreten, da die schwer vorhersagbare kleinskalige interne Variabilität durch die Mittelung ausgeblendet wird. Abb. III.7 zeigt für jede Region die Korrelationsmuster von MPI-ESM und dem besten RCM. Über der Guinea-Küste zeigt MPI-ESM positive Korrelationen für die letzten Jahre einer Dekade, sonst negative Werte. Diese werden durch CCLM für fast alle Mittelungsperioden deutlich und durch REMO-O1 für die dekadischen Mittel leicht verbessert. Im Zentral-Sahel weist MPI-ESM stark positive Korrelationen in den ersten Jahren einer Dekade und für die dekadischen Mittel auf, welche durch alle RCMs (außer WRF) erhalten und durch REMO-H vor allem in den letzten Jahren einer Dekade übertroffen werden. Im West-Sahel ergeben sich für MPI-ESM und REMO-H ähnliche Korrelationsmuster zum Zentral-Sahel, die von allen anderen RCMs jedoch kaum erreicht werden. Folglich werden in der interdekadischen Vorhersagbarkeit des WAM-Niederschlags deutliche Added Values der RCMs in allen drei westafrikanischen Regionen gefunden.

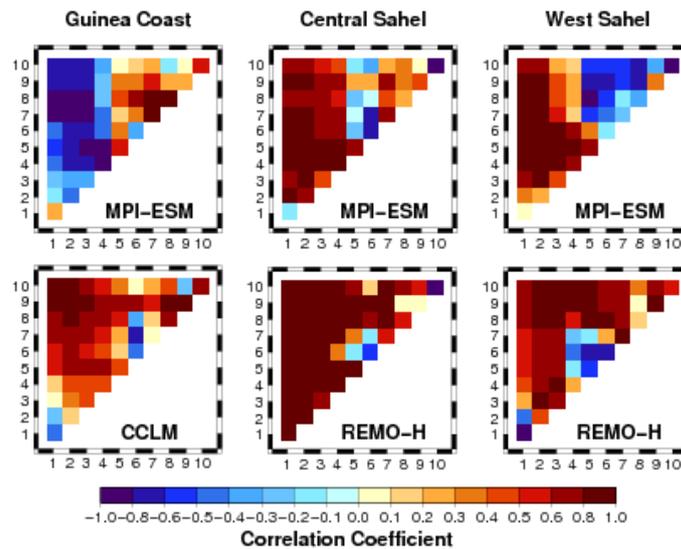


Abb. III.7: Korrelationskoeffizienten zwischen simuliertem und beobachtetem WAM-Niederschlag für MPI-ESM, bestes RCM und WMMA-Beobachtungen über alle vier Hindcast-Dekaden für drei westafrikanische Regionen. Die x-/y-Achse zeigt das erste/letzte Jahr der Mittelungsperiode einer Dekade, die zur Korrelation herangezogen wurde.

Eine Unsicherheit stellt die relativ kleine Stichprobe aus drei Ensemble-Simulationen und vier Hindcast-Dekaden dar, die aufgrund beschränkter Rechenzeit und unterschiedlicher Modelle und Modellversionen nicht erhöht werden konnte. Der Bias ist konsistent über verschiedene Ensemble-Simulationen und Dekaden, die Korrelation zeigt jedoch eine große Streuung. Da die Anzahl der RCM-Simulationen nicht erhöht werden kann, wurde die Analyse der interdekadischen Vorhersagbarkeit für alle verfügbaren 10 Ensemble-Simulationen und 41 Dekaden (1961-1970 bis 2001-2010) von MPI-ESM durchgeführt, um die statistische Aussagekraft zu erhöhen und Zufälle auszuschließen. Die Korrelationsmuster entsprechen denjenigen von MPI-ESM aus Abb. III.7, wirken nur mehr geglättet und weisen mehr negative/positive Korrelationen über der Guinea-Küste/im Sahel auf. Also sind die MPI-ESM-Korrelationen der kleineren Stichprobe aus Abb. III.7 repräsentativ für die maximale Stichprobe. Für die RCMs kann dies nur angenommen aber noch nicht getestet werden.

Somit zeigen die RCMs einige Added Values beim WAM-Niederschlagsbias im Sahel, aber eine Verstärkung des positiven MPI-ESM-Bias über der Guinea-Küste. Letzterer beruht auf einem positiven SST-Bias im Südost-Atlantik und wird durch die Ozeankopplung von REMO-O1/2 reduziert. Die dekadische Vorhersagbarkeit einer gesamten Dekade variiert über Regionen und Dekaden. Einzelne RCMs zeigen Added Values gegenüber MPI-ESM, z.B. im West-Sahel und in 1966-1975, jedoch selten signifikant positive Korrelationen. Der gekoppelte Ozean von REMO-O1/2 kann manche Korrelationen von REMO-H verbessern. Die intradekadische Vorhersagbarkeit kürzerer Subperioden innerhalb der Dekaden zeigt Added Values von RCMs (v.a. REMO-W und WRF) über Guinea-Küste und West-Sahel, im Zentral-Sahel nur in den ersten Jahren einer Dekade. Bei der interdekadischen Vorhersagbarkeit gemittelter Subperioden zwischen den Dekaden werden Added Values von RCMs (v.a. CCLM und REMO-H) in allen drei Regionen gefunden.

### III.5. Bias und Vorhersagbarkeit bei verbesserten Anfangs- und Randbedingungen

Um das Vorhersagepotential von Ozean, Atmosphäre und Landoberfläche zu nutzen, wurde CCLM mit verbesserten Anfangs- und Randbedingungen in der Dekade 2001-2010 und teilweise auch weiteren Dekaden angetrieben: Die Aerosol Optische Dicke von Tanré wurde durch die neuere Version von AeroCom substituiert (CCLM-AOD) und die MPI-ESM SSTs

zusätzlich durch ERA40/ERA-Interim SSTs ersetzt (CCLM-AOD/SST). Eine optimierte Initialisierung von Bodentemperatur und -feuchte wurde eingeführt (CCLM-SOIL) und das SVAT-Modul TERRA\_ML durch die neuere Version VEG3D substituiert (CCLM-VEG). Die jährlich konstanten Landnutzungsklassen von ECOCLIMAP wurden durch GLC2000 ersetzt (CCLM-LUC) und durch ein statistisches Modell zusätzlich die jährliche Variabilität der Landnutzung ergänzt (CCLM-LUV).

Abb. III.8 zeigt den WAM-Niederschlagsbias der CCLM-Simulationen mit realistischeren Anfangs- und Randbedingungen in der Dekade 2001-2010. Der CCLM-Bias kann in jeder westafrikanischen Region durch bestimmte verbesserte Randbedingungen reduziert werden: SSTs (deutlich) und Landnutzung in der Guinea-Küste, Vegetation im Zentral-Sahel und Aerosole im West-Sahel. Dagegen zeigt die verbesserte Bodeninitialisierung nur geringe Effekte. Diese Ergebnisse sind konsistent über unterschiedliche Dekaden. Weiterhin wird auch die bereits erwähnte Verbesserung des Bias durch die Ozeankopplung in REMO in der Guinea-Küste und im Zentral-Sahel gezeigt.

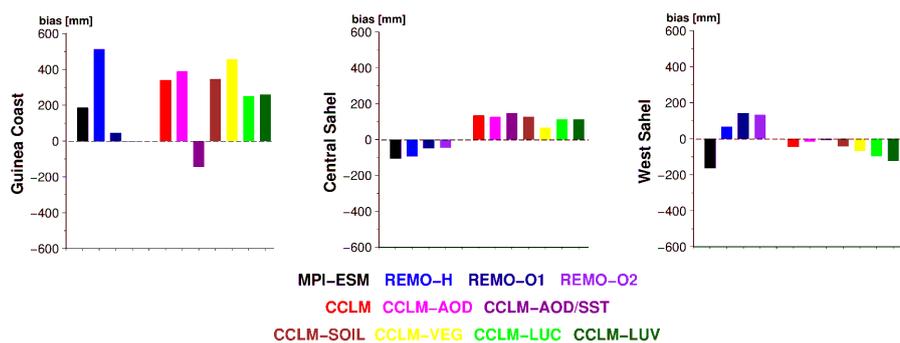


Abb. III.8: Bias zwischen simuliertem und beobachtetem WAM-Niederschlag für unterschiedliche globale und regionale Modellensembles in Standardversion, mit Ozeankopplung und mit unterschiedlichen verbesserten Anfangs- und Randbedingungen (siehe Beschriftung) und WMMa-Beobachtungen in drei westafrikanischen Regionen in der Hindcast-Dekade 2001-2010.

Bei der dekadischen Vorhersagbarkeit zeigen die verbesserten Anfangs- und Randbedingungen variable Korrelationskoeffizienten über unterschiedliche Dekaden und Regionen, aber erreichen einige signifikante Added Values gegenüber CCLM: SSTs (1966-1975, 2001-2010) und Aerosole (2001-2010) in der Guinea-Küste, Landnutzung im Zentral-Sahel (1966-1975) und Landnutzung und Boden (2001-2010) im West-Sahel. Dagegen zeigt eine verbesserte Vegetation nur geringe Einflüsse. Diese Ergebnisse sollten auch in weiteren Dekaden geprüft werden. Bei der intradekadischen Vorhersagbarkeit unterschiedlicher Subperioden innerhalb einer Dekade zeigen alle verbesserten Anfangs- und Randbedingungen deutliches Potential für starke Added Values gegenüber CCLM, weil sich manche Verbesserungen nur in kürzeren Subperioden und nicht über die gesamte Dekade zeigen. Verbesserte Vegetation zeigt beispielsweise im West-Sahel in der Dekade 2001-2010 erhöhte Korrelationen für Jahr 1-7, aber nicht für die gesamte Dekade.

Somit kann der CCLM-Bias in jeder Region konsistent über die Dekaden durch verbesserte Randbedingungen reduziert werden: SSTs und Landnutzung in der Guinea-Küste, Vegetation im Zentral-Sahel und Aerosole im West-Sahel. Bei der dekadischen Vorhersagbarkeit zeigt sich eine große Variabilität über Dekaden und Regionen aber signifikante Added Values gegenüber CCLM: SSTs und Aerosole in der Guinea-Küste, Landnutzung im Zentral-Sahel und Landnutzung und Boden im West-Sahel. Bei der intradekadischen Vorhersagbarkeit weisen alle verbesserten Anfangs- und Randbedingungen Potential für Added Values auf.

### III.6. Bias und Vorhersagbarkeit der atlantischen tropischen Stürme und Hurrikans

Zur Ermittlung von atlantischen tropischen Stürmen und Hurrikans wird ein Tracking-Algorithmus eingesetzt, der simulierte Windgeschwindigkeiten und Vorticities auf unterschiedlichen Höhenleveln zur Detektion des warmen Kerns und die 925 hPa Winde für den Schwellwert der Windgeschwindigkeit heranzieht. Es werden nur die Stürme gezählt, die sich über dem Ozean im DEPARTURE-Modellgebiet entwickeln. Dabei wird die Accumulated Cyclone Energy (ACE) [10.000 kn<sup>2</sup>] als Summe der quadrierten maximalen 6-stündigen Windgeschwindigkeiten für alle Stürme des Modellgebiets berechnet.

Abb. III.9 zeigt den Bias der Anzahl aller Hurrikans, der Gesamtintensität aller Hurrikans ACE und der durchschnittlichen Intensität eines Hurrikans ACE/Anzahl für unterschiedliche RCMs in der Hurrikan-Jahreszeit Juli-August-September-Oktober (JASO) der Dekade 2001-2010. Die ungekoppelten RCMs CCLM, REMO-W und REMO-H zeigen einen deutlich positiven Bias gegenüber den HURDAT2-Beobachtungsdaten in allen drei Variablen, schwächer im nicht-hydrostatischen CCLM als im hydrostatischen REMO. Die Ozeankopplung von REMO-H an MPIOM zeigt eine deutliche Verbesserung bei allen Variablen. Diese Ergebnisse sind konsistent über unterschiedliche Dekaden, Hurrikan-Jahreszeiten und ebenso gültig für die gemeinsame Betrachtung von Hurrikans und tropischen Stürmen. Die Ergebnisse von MPI-ESM und WRF wurden dabei leider noch nicht berechnet.

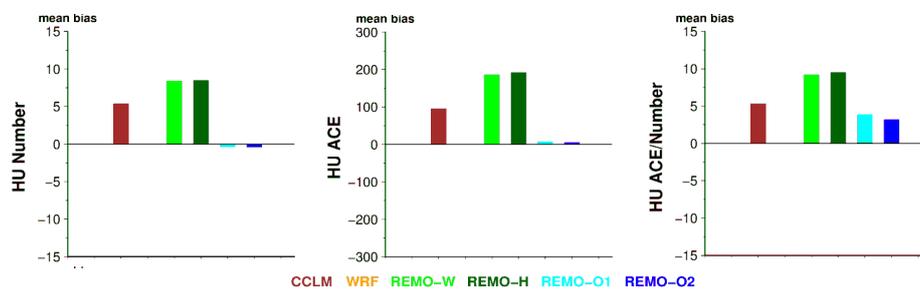


Abb. III.9: Bias zwischen simulierter und beobachteter Anzahl aller Hurrikans, Gesamtintensität aller Hurrikans ACE und durchschnittlicher Intensität eines Hurrikans ACE/Anzahl für unterschiedliche regionale Modellensembles in Standardversion und mit Ozeankopplung (siehe Beschriftung) und HURDAT2-Beobachtungen für die Hurrikan-Jahreszeit Juli-August-September-Oktober (JASO) in der Hindcast-Dekade 2001-2010.

Die dekadische Vorhersagbarkeit aller Variablen schwankt deutlich über die Dekaden und leicht über die Hurrikan-Jahreszeiten und bei der Betrachtung von Hurrikans samt tropischen Stürmen gegenüber nur Hurrikans und erreicht selten signifikant positive Korrelationen zu HURDAT2-Beobachtungen. Beispielsweise erreichen CCLM und REMO-W signifikante Korrelationen von 0,6-0,8 für Hurrikans in der JASO-Jahreszeit der Dekade 2001-2010. Bei der intradekadischen Vorhersagbarkeit kürzerer Subperioden zeigen sich bei allen drei Variablen leicht positive Korrelationen für REMO in den ersten Jahren der Dekaden und deutlich höhere, signifikante Korrelationen von 0,4-0,8 für CCLM in den ersten Jahren und der gesamten Dekade. Bei der interdekadischen Vorhersagbarkeit zwischen allen Dekaden ergeben sich unklare Korrelationsmuster für alle drei Variablen, jedoch meist signifikant positive Korrelationen für REMO bei den Dekadenmitteln und für CCLM in den ersten und letzten Jahren der Dekaden.

Somit zeigen alle ungekoppelten RCMs konsistent über alle Dekaden einen deutlich positiven Bias bei Anzahl und Intensität atlantischer Hurrikans, geringer im nicht-hydrostatischen CCLM. Die Ozeankopplung von REMO kann den Bias deutlich verbessern. Die dekadische Vorhersagbarkeit schwankt stark über die Dekaden und erreicht selten signifikant positive Korrelationen. Bei der intradekadischen und interdekadischen Vorhersagbarkeit zeigen sich

einige signifikante Korrelationen bei Anzahl und Intensität für unterschiedliche RCMs, wobei CCLM bei Ersterer deutlich höhere Korrelationen erreicht als REMO.

## **IV. Ergebnisbericht des Teilprojekts des MPI-M (01LP1129B)**

### IV.1. Einleitung

Der Beitrag des Max-Planck-Instituts für Meteorologie zu DEPARTURE sind Simulationen mit dem gekoppelten regionalen Atmosphären-Ozean-Modell ROM (Sein et al., 2015). Ziel des Projektes ist, den Einfluss eines interaktiven Ozeans auf die dekadische Vorhersagbarkeit im tropischen Atlantik und Westafrika zu untersuchen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Vorhersage der tropischen Zyklonogenese. Die für den Vergleich notwendigen ungekoppelten Referenzsimulationen werden von anderen Partnern in DEPARTURE vorgenommen. Die Entwicklung der ROM Version für DEPARTURE wurde in 2013 abgeschlossen. In 2014 wurden alle für das Projekt geplanten Simulationen durchgeführt und zur Auswertung bereit gestellt. Eine kleine Auswahl der Ergebnisse wird im folgenden dargestellt.

### IV.2. Das ROM Modell

ROM ist ein gekoppeltes regionales Atmosphären-Ozean-Modell (engl. RAOCM) und besteht aus dem regionalen Atmosphären-Modell REMO, dem Ozeanmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie MPIOM und dem hydrologischen Abflussmodell HD. Abgesehen von REMO werden die Modelle in einer globalen Konfiguration gerechnet. MPIOM ist dabei so konfiguriert, dass der Ozean im Kopplungsgebiet mit REMO eine hohe Auflösung besitzt. Außerhalb des Kopplungsgebiets wird MPIOM mit vorgegebenem atmosphärischen Antrieb (entweder durch globale Zirkulationsmodelle oder Reanalysen) im so genannten „stand-alone“ Modus betrieben. Eine detaillierte Beschreibung von ROM ist in Sein et al. (2015) zu finden.

### IV.3. Simulationen für den tropischen Atlantik

Für DEPARTURE wurde eine Anzahl von Simulationen mit verschiedenen Konfigurationen von MPIOM und REMO durchgeführt (ein Beispiel ist in Abb. IV.1 links gegeben). Die horizontale Auflösung von MPIOM erreicht in der gezeigten TR04 Konfiguration im tropischen Atlantik 10 km. In der vertikalen wurden 40 Modelllevel genutzt. Für REMO wurde die Standardkonfiguration wie in DEPARTURE vereinbart verwendet. Als Antrieb wurden verschiedene Realisationen des MiKlip Vorhersagesystems MPI-ESM sowie ERA40 Reanalysen genutzt.

In DEPARTURE wurden aus vier Dekaden (1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 und 2001-2010) jeweils drei Ensemblemitglieder des globalen Vorhersagesystems mit ROM. Bei Simulationen mit ROM besteht dabei das Problem, dass das Modell zunächst geeignet initialisiert werden muss. In DEPARTURE wurden zwei Techniken zur Initialisierung getestet. Bei Methode 1 werden die Anfangsfelder aus der MPI-ESM Assimilationssimulation genommen (im folgenden REMO-O1 genannt). Methode 2 wird mit ERA-40 Feldern initialisiert (REMO-O2).

In beiden Fällen wurde ROM nur an den Rändern mit den Feldern aus MPI-ESM angetrieben. Zum Vergleich mit dem ungekoppelten Modell wurden die gleichen Simulationen auch mit REMO durchgeführt (REMO-H). Insgesamt sind dabei 36 dekadische Simulationen also 360 Modelljahre gerechnet worden.

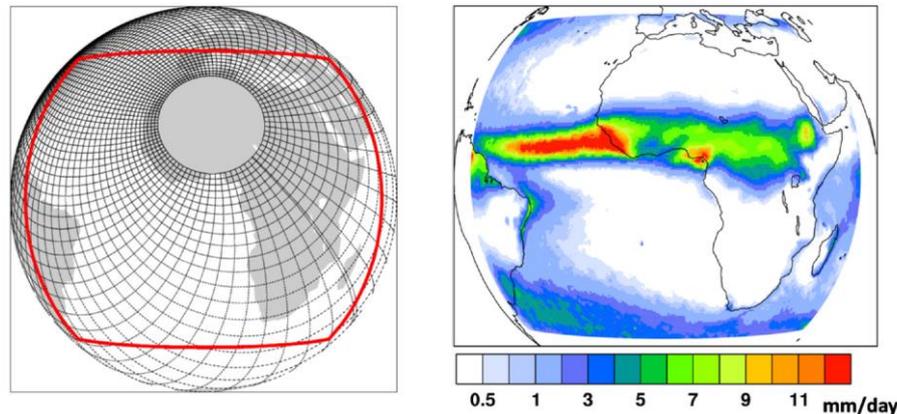


Abb. IV.1: Die linke Abbildung zeigt die Gitterkonfiguration von MPIOM (jede zwölfte Gitterlinie in schwarz) und die REMO-DEPARTURE Region ist als rote Linie. In der rechten Abbildung ist der beobachtete Sommerniederschlag aus CRU/HOAPS dargestellt, der zur Modellevaluation benutzt wurde.

Eine der Hauptschwierigkeiten bei dekadischen Vorhersagen ist die Modellinitialisierung. Im speziellen muss der Ozean möglichst nah dem natürlichen Ozeanzustand zum Zeitpunkt der Initialisierung entsprechen, darf auf der anderen Seite aber auch nicht zu sehr vom Modellklima abweichen, da das Modell sonst zu stark in Richtung Modellklima driftet und mögliche Signale überlagert.

Für DEPARTURE wurden zwei verschiedene Initialisierungsmethoden getestet. Zunächst wurde ROM mit der Assimilationssimulation von MPI-ESM baseline1 für die Startzeitpunkte der Simulationen eingeschwingen. In einem zweiten Ansatz wurden ERA40 Reanalysen zum Einschwingen des Modells genutzt. In beiden Fällen wurden die Antriebe nur außerhalb des REMO Gebietes aufgeprägt.

#### IV.4. Ergebnisse

Ratnam et al. (2008) haben gezeigt, dass RAOCMs neben einer verbesserten Simulation der Oberflächentemperatur auch einen Mehrwert für den simulierten Monsun Niederschlag über Indien erzielen können. In einer Studie für DEPARTURE wurde untersucht, ob dieser Mehrwert auch für den westafrikanischen Monsun zu finden ist. Ein Vergleich zwischen MPI-ESM, REMO und ROM in Abb. IV.2 zeigt, dass ROM deutlich näher an den Beobachtungen (siehe Abb. IV.1 rechts) liegt als die anderen beiden Modelle. Besonders deutlich sind die Verbesserungen über dem tropischen Atlantik. Darüber hinaus wird die innertropische Konvergenzzone (engl. ITCZ) in ROM besser als in REMO simuliert. Daraus ergibt sich, dass RAOCMs besonders dort einen Mehrwert liefern, wo Ozean-Atmosphären Wechselwirkungen eine wichtige Rolle spielen.

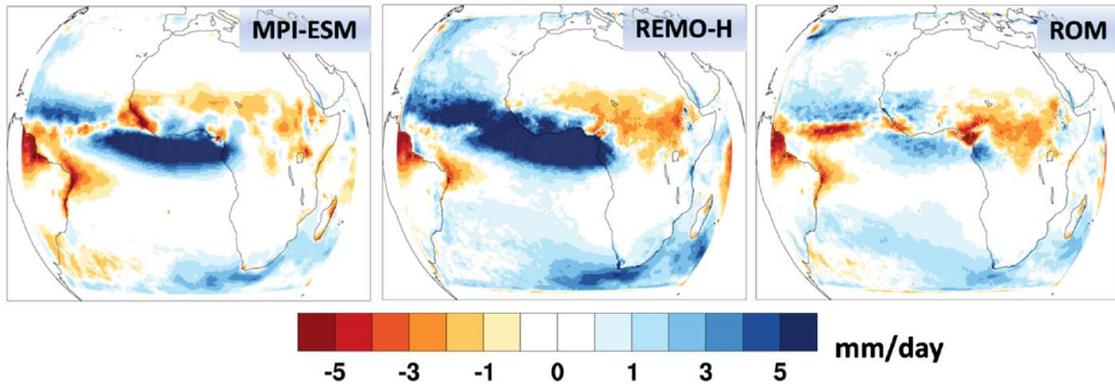


Abb. IV.2: Abweichungen vom Sommerniederschlag gegenüber Beobachtungen (vgl. Abb. IV.1) dargestellt als Differenz (Modell-Beobachtungen) für MPI-ESM (links), REMO (mitte) und ROM (rechts).

Der Mehrwert von ROM beschränkt sich nicht nur auf atmosphärische Größen. Auch für den Ozean können Verbesserungen gefunden werden. ROM simuliert eine bessere Klimatologie und eine realistischere interannuale Variabilität im tropischen Atlantik. Abb. IV.3 zeigt die Korrelation der Ozeanoberflächentemperatur (engl. SST) zwischen ORSA4 (Ozean Reanalysen) und MPI-ESM sowie ROM (angetrieben durch MPI-ESM) aus dekadischen Ensemble Simulationen. ROM zeigt hierbei eine deutlich verbesserte Variabilität der SST im tropischen Atlantik. Besonders in der für die tropische Zyklonogenese wichtigen Region vor Afrika zeigt sich der Mehrwert von ROM.

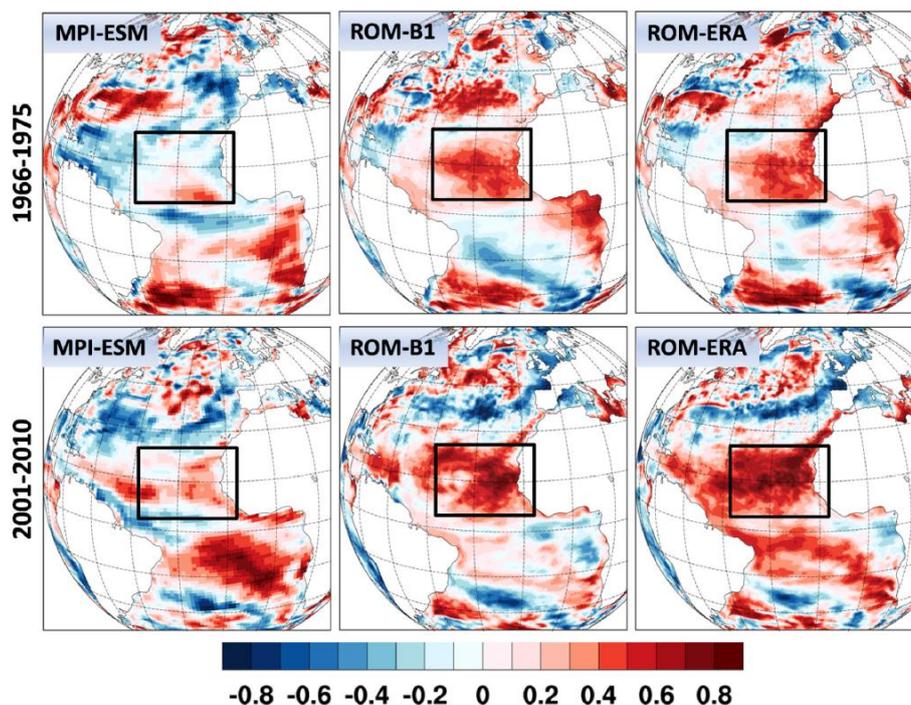


Abb. IV.3: SST Korrelation zwischen ORSA4 und MPI-ESM (linke Spalte), sowie zwischen ORSA4 und ROM mit Initialisierung aus MPI-ESM (mittlere Spalte) und zwischen ORSA4 und ROM mit Initialisierung aus ERA40 (rechte Spalte) für zwei verschiedene Perioden. Der schwarze Kasten markiert die Region maximaler Dichte in der tropischen Zyklonogenese (Mangallo et al., 2012).

Die Simulation wurde mit dem Schwerpunkt auf tropische Zyklonen ausgewertet. Tropische Zyklonen werden dabei folgendermaßen definiert: Ein für zwei Tage oder länger existieren-

des Maximum in der 850 hPa Vorticity, warmer Kern zwischen 850 hPa und 200 hPa, Windgeschwindigkeiten von mindestens 17 m/s. Zum Vergleich mit Beobachtungen wurde der HURDAT 2.0 Datensatz verwendet.

Abb. IV.4 zeigt die Anzahl der in der DEPARTURE Region generierten tropischen Zyklonen für die Monate Juni-November. Alle Simulationen überschätzen die Zahl der tropischen Zyklonen. Es ist jedoch zu erkennen, dass die gekoppelten Simulationen mit ROM (REMO-O1 und REMO-O2) wesentlich näher an den Beobachtungen liegen. In den meisten Fällen simuliert REMO-H ungefähr doppelt so viele tropische Zyklonen wie ROM.

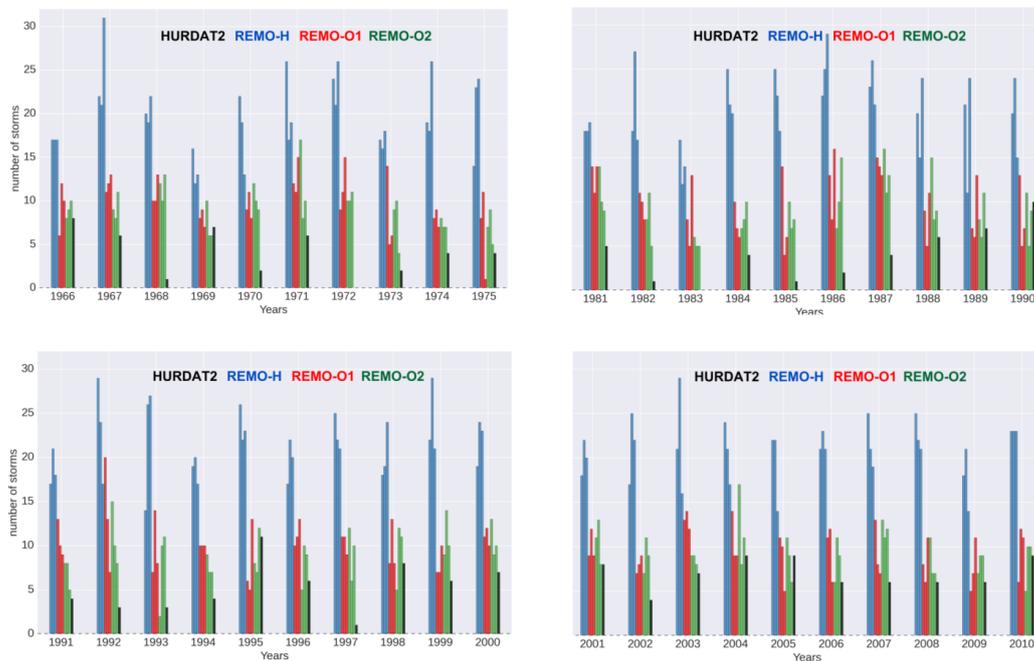


Abb. IV.4: Zahl der tropischen Zyklonen von Juni-November im DEPARTURE Gebiet simuliert von REMO-H (blau) und ROM (rot und grün) im Vergleich zu HURDAT Beobachtungen (schwarz) für die vier simulierten Dekaden.

Um die Unterschiede zwischen ROM und REMO zu verstehen, wurden die Zugbahnen der tropischen Zyklonen untersucht. Abb. IV.5 zeigt die Zugbahnen für beide Modelle. Es zeigt sich, dass sich in REMO die Zone der Zyklonogenese weiter nach Süden erstreckt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Simulation der innertropischen Konvergenzzone (engl. ITCZ) in beiden Modellen. In allen vier Dekaden zeigt REMO eine signifikante Verschiebung der ITCZ nach Süden. Es ist bekannt, dass die Position der ITCZ einen starken Einfluss auf die Zyklonogenese von tropischen Zyklonen hat.

Im Vergleich zu Beobachtungen mit GPCP Niederschlag zeigt sich, dass ROM die Position der ITCZ realistischer simuliert (Abb. IV.6). Diese Tatsache könnte dazu führen, dass ROM die Zahl der tropischen Zyklonen wesentlich besser simuliert als REMO und zeigt den Mehrwert eines regionalen gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modells.

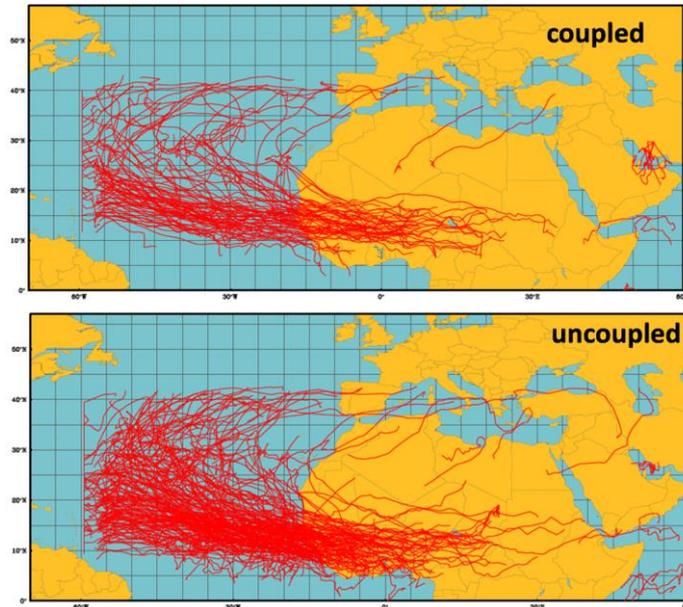


Abb. IV.5: Zugbahnen der tropischen Zyklonen (Juni-November) in ROM (oben) und REMO (unten) für die Jahre 2001-2010.

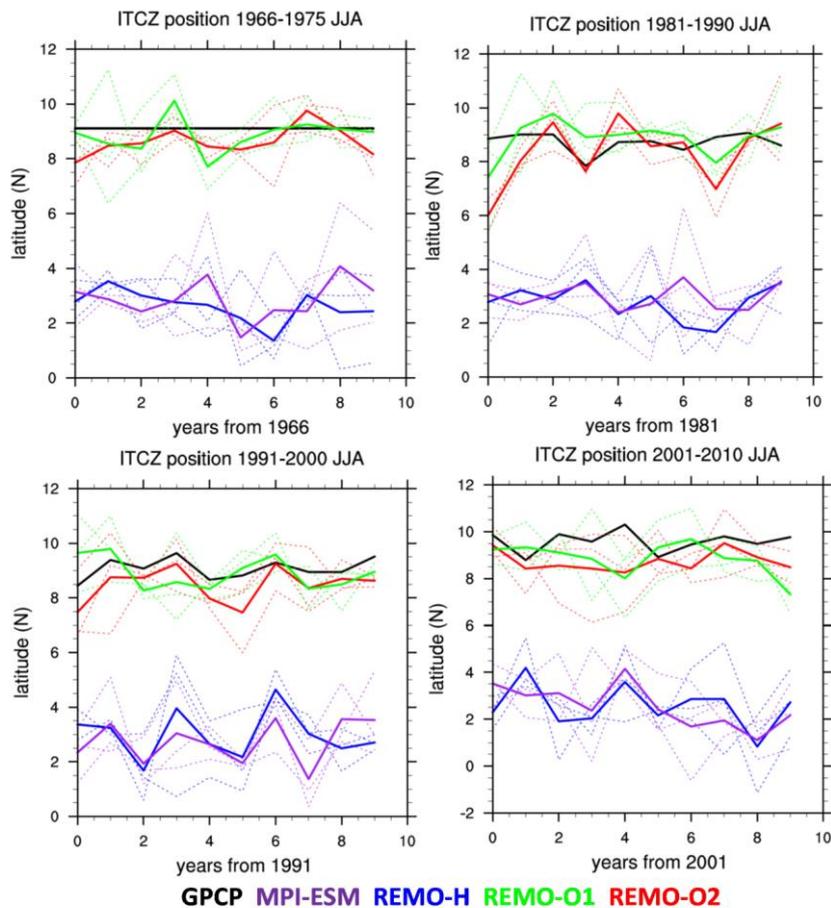


Abb. IV.6: Zonal gemittelte Position der ITCZ im tropischen Atlantik definiert über das Niederschlagsmaximum. Für Beobachtungen aus GPCP (schwarz), MPI-ESM (violett), REMO (blau) und ROM (grün und rot).

#### IV.5. Fazit

Die interaktive Kopplung zwischen Atmosphäre und Ozean durch ROM bietet einen weiteren Mehrwert für REMO im Vergleich zu MPI-ESM. Die besser aufgelösten Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean führen zu einer verbesserten Simulation des Niederschlags, besonders über dem tropischen Atlantik. Aber auch die Simulation der SST in der für die tropische Zyklogene wichtigen Region vor Afrika wird durch ROM verbessert. Während MPI-ESM keine Vorhersagegüte für die SST in dieser Region zeigt, gibt es in ROM ein signifikantes Signal. Dies kann für die Vorhersagbarkeit von tropischen Zyklonen eine wichtige Rolle spielen.

Die Kopplung zu einem interaktivem Ozean ergibt einen weiteren Mehrwert gegenüber der Regionalisierung mit REMO im Vergleich zum globalen Vorhersagesystem MPI-ESM. Die kleinskaligen Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre im gekoppelten Modell führen zu einer Verbesserung des Niederschlags besonders über dem Ozean. Zusätzlich werden die Meeresoberflächentemperaturen speziell in der Region der tropischen Zyklogene in ROM deutlich besser simuliert als in MPI-ESM. Daraus ergibt sich eine deutliche Verbesserung in der Statistik der tropischen Zyklonen. Abschließend lässt sich feststellen, dass die Kopplung sehr wichtig für die Vorhersagbarkeit von tropischer Zyklonen Aktivität ist.

### V. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Universität zu Köln (01LP1129C)

#### V.1. Entwicklung des Advanced Stochastic Land Use Change Model

Für die Erstellung realistischer Szenarien von Landnutzungsveränderungen (Land Use and Cover Changes, LUCCs), die durch menschliche Einflüsse wie Urbanisierung, Agrarwirtschaft, Abholzung, Straßenbau usw. gesteuert werden, wurde an der Universität zu Köln aufbauend auf dem einfachen stochastischen Modell von Paeth et al. (2009) das *Advanced Stochastic Land Use Change Model* (ASLUCM) für MiKlip DEPARTURE entwickelt, das zeitlich variable untere Randbedingungen für dekadische Klimasimulationen der regionalen Klimamodelle (regional climate models, RCMs) COSMO-CLM (CCLM), REMO und WRF liefert. Um mit den unterschiedlichen Landnutzungsdaten der RCMs kompatibel zu sein, wurde das ASLUCM so entwickelt, dass es auf verschiedene Landnutzungsklassifikationen wie GLC2000 (Mayaux et al. 2004, Bartholomé and Belward 2005), ECOCLIMAP (Masson et al. 2003, Champeaux et al. 2005), IGBP (Loveland and Belward 1997, Loveland et al. 2000) oder GlobCover (Defourny et al. 2006) gleichermaßen anwendbar ist. Hierfür werden die individuellen Landnutzungsklassen jedes Datensatzes zu Gruppen von Landnutzungsformen zusammengefasst, für die ähnliche LUCCs angenommen werden können: Urban, Agrarland, Wald, Buschland, Savanne, Grasland, Wüste und sonstige. Dies vereinfacht die Handhabung der einzelnen Landnutzungsklassen innerhalb des Modells.

Das ASLUCM nutzt Aufzeichnungen bzw. Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung der Vereinten Nationen und zu Wald- und Agrarflächen der Food and Agriculture Organization (FAO) auf nationaler Ebene, um die Landnutzungsverteilung vergangener Jahrzehnte plausibel zu reproduzieren und der Zukunft zu simulieren. Hierzu werden die hochauflösenden (meist 1x1km) Landnutzungsdaten, die zur Berechnung der Vegetationsparameter in den Präprozessoren der Klimamodelle verwendet werden, manipuliert, indem Gitterpunkte, an denen LUCCs am wahrscheinlichsten sind, mit einer neuen Landnutzungsform versehen werden.

In der ersten Entwicklungsphase wurde ausgehend von Landnutzungsformen wie urbanen Räumen oder Agrarflächen, die auf einen Einfluss des Menschen hinweisen (sog. Trigger), innerhalb eines vorgegebenen Radius nach Pixeln gesucht, deren Landnutzung verändert werden soll. Diese Methode führte nach einer gewissen Simulationszeit zu kreisförmigen Ob-

jekten um jene Trigger, die z.B. eine vollständige Umwandlung in Agrarland aufwiesen, während andere Regionen weitgehend unverändert blieben. Darüber hinaus war die Integration zusätzlicher Parameter, die ein Eingreifen des Menschen in die Natur signalisieren (z.B. Straßen), aufgrund der Programmstruktur sehr umständlich.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurde das ASLUCM vollständig überarbeitet. Die wichtigste Veränderung hierbei bestand in der Berechnung mehrerer Gewichtungen, die zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit der Landnutzungsänderung verwendet werden. Diese Gewichtungen umfassen die Distanz zu urbanen Räumen, landwirtschaftlicher Aktivität und Straßen sowie die Bevölkerungsdichte, Orographie und klimatologische Bodenfeuchte. Hierzu werden neben den Landnutzungsdaten nun zusätzliche Datenquellen hinzugezogen: Topographiedaten aus GTOPO30, die Bevölkerungsdichte des Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3) Datensatzes, Straßenverläufe aus den Rohdaten des Open Source Projektes OpenStreetMaps (OSM, [www.osm.org](http://www.osm.org)), sowie Bodenfeuchte aus ERA-Interim. Zuletzt wurde die potentielle Vegetation, d.h. die natürliche Vegetation ohne Eingriff des Menschen, von Ramankutty and Foley (1999) in das Modell integriert, um das Auftauchen von Pflanzen in hierfür ungeeigneten Klimazonen zu verhindern.

Die Pixel werden anhand der berechneten Übergangswahrscheinlichkeiten stochastisch selektiert und anhand vorgeschriebener Übergangsregeln mit einer neuen Landnutzungsform (z.B. Savanne) versehen. Da das ASLUCM verschiedene Landnutzungsklassen eines Datensatzes zu solchen Gruppen zusammenfasst, wird mithilfe eines Histogramms die neue Landnutzungsklasse stochastisch ausgewählt. Der resultierende Datensatz mit manipulierter Landnutzung entspricht somit genau dem Klassifikationsschema des ursprünglichen Datensatzes, so dass keinerlei Anpassungen in Programmen notwendig sind, die diese Landnutzungsdaten weiterverarbeiten. Auf diese Weise erhält man jährlich variierende Karten der Landnutzung, deren relative Veränderungen den Angaben der UN und FAO entsprechen und direkt zur Verwendung mit den Präprozessoren der Klimamodelle genutzt werden können.

Zur Steigerung der Performanz wurde das ASLUCM massiv-parallelisiert. Die Ein- und Ausgaberroutinen wurden überarbeitet, so dass die Landnutzungsdaten nun sowohl als netCDF-Datei als auch binär genutzt werden können. Die überarbeitete Version des ASLUCM wurde verwendet, um jährlich variierende Landnutzungsdatensätze zu generieren, die den Zeitraum 1960-2020 der dekadischen Klimasimulationen in MiKlip abdecken.

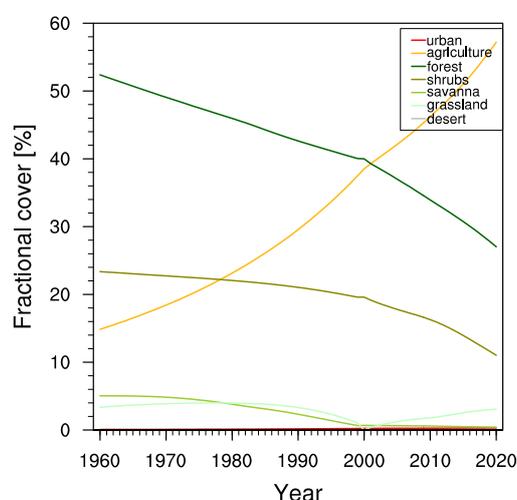


Abb. V.7: Bedeckungsanteile verschiedener Landnutzungsformen an der Guineaküste (GCO) zwischen 1960 und 2020.

Abb. V.1 zeigt die Veränderung des fraktionellen Anteils der verschiedenen Landnutzungsformen urban, Landwirtschaft, Wald, Buschland, Savanne, Grasland und Wüste zwischen 1960 und 2020 an der Guineaküste, wie das ASLUCM sie mithilfe der FAO-Daten auf die

GLC2000-Landnutzungsverteilung überträgt. Am auffälligsten sind die starke Zunahme landwirtschaftlicher Nutzung und Reduktion der Waldfläche, die mit dem enormen Bevölkerungszuwachs in Westafrika verbunden sind. Hier wird ersichtlich, dass ein Großteil der heute landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Guineaküste durch die Abholzung von Waldflächen gewonnen wurde; in anderen Regionen wie dem Westsahel ist die Ausbreitung der Landwirtschaft stärker mit der Umwandlung von Busch- und Grasland verknüpft (nicht gezeigt).

Der Vergleich mit dem Erdsystemmodell MPI-ESM, das zum Antreiben der regionalen Klimamodelle verwendet wurde, zeigt ein recht unnatürliches Verhalten des Landoberflächenmodells JSBACH. Abb. V.2 zeigt hierzu den Anteil an Baumbedeckung und Ackerland an der Guineaküste für jeden Initialisierungszeitpunkt der baseline1-Simulationen. Der Flächenanteil unmittelbar nach der Initialisierung zeigt einen geringen Rückgang bis in die 90er Jahre, der dann innerhalb von 10 Jahren rapide abfällt. Dies geht einher mit einer massiven Zunahme an Brachland bzw. Wüsten (nicht gezeigt). Zum Ende der 2000er hin stabilisiert sich der Baumanteil bei rund 30% wieder. Die zeitliche Entwicklung der einzelnen dekaden Simulationen hingegen zeigen nach 2005 einen deutlichen Anstieg, entgegen der Beobachtungen. Zur gleichen Zeit sinkt der Anteil an Ackerland rapide ab, nachdem er zuvor langsam, aber konstant anstieg.

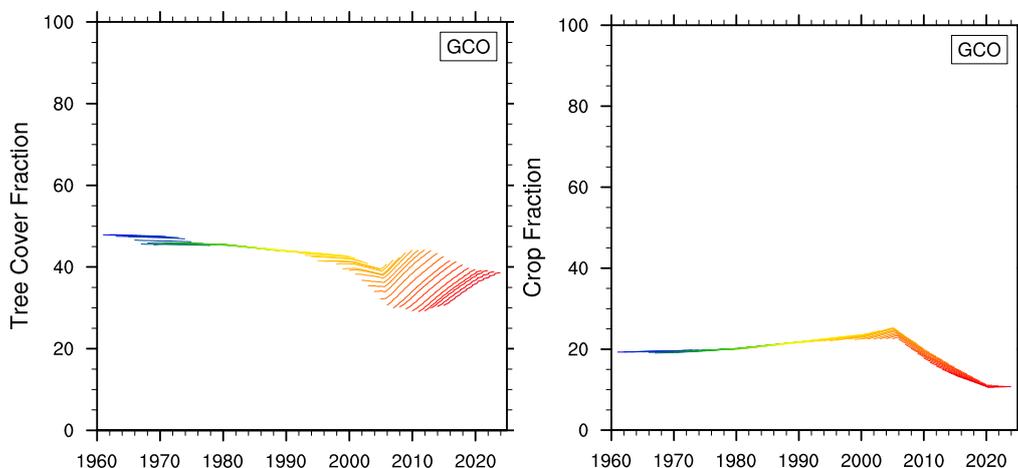


Abb. V.8: Anteil an Baumbedeckung (links) und Ackerland (rechts) [%] an der Guineaküste aus dekaden baseline1-Simulationen mit JSBACH. Jede Farbe steht für einen neuen Initialisierungszeitpunkt.

Solche Landnutzungsänderungen beeinflussen die Interaktion zwischen Boden und Atmosphäre und wirken sich damit auch auf das Klimasystem aus. Veränderungen des Leaf Area Index (LAI), der Rauigkeitslänge  $z_0$ , des stomatalen Widerstands oder der Wurzeltiefe verändern die Stärke der Wärmeflüsse und des Feuchtetransports.

## V.2. Dekadische Simulationen mit COSMO-CLM

Um die Hypothese, ob die Vorhersagbarkeit dekaden Klimaprojektionen des Westafrikanischen Monsuns (WAM) mit regionalen Klimamodellen durch die Einbindung von LUCCs verbessert kann, zu untersuchen, wurden eine Reihe von Simulationen durchgeführt. Tab. V.1 listet die an der Universität zu Köln durchgeführten Experimente mit dem Regionalmodell COSMO-CLM (Version 4.21) auf, die für die Untersuchung des Einflusses von LUCCs auf die dekaden Vorhersagbarkeit durchgeführt wurden. Die Experimente DEP, die im folgenden zur Evaluierung der Simulationen hinzugezogen wurden, sind am KIT durchgeführt worden. Alle Simulationen haben eine horizontale Auflösung von  $0.44^\circ$  (dies entspricht ca. 50km am Äquator).

CTL1 und CTL2 sind hierbei Kontrollsimulationen, die zur Evaluierung der Performanz von COSMO-CLM gegenüber dem Globalmodell dienen und keinerlei LUCs beinhalten. Beide Experimente nutzen die Vegetationsverteilung aus GLC2000, wobei CTL1 die in EXTPAR standardmäßig eingestellte und CTL2 eine experimentelle, auf ECOCLIMAP basierende Lookup-Tabelle zur Berechnung der Vegetationsparameter verwendet. Zusätzlich wurden in der Auswertung die am KIT durchgeführten COSMO-CLM Simulationen verwendet (im folgenden als DEP bezeichnet), deren Vegetationsparameter komplett aus dem ECOCLIMAP-Datensatz ermittelt wurden.

*Tab. V.1: LUC-Experimente mit COSMO-CLM an der Universität zu Köln*

<i>Experiment</i>	<i>Landnutzungsdatensatz</i>	<i>Beschreibung</i>
<i>CTL1</i>	<i>GLC2000</i>	<i>Kontrollsimulation mit unveränderter Landnutzung</i>
<i>CTL2</i>	<i>GLC2000</i>	<i>Wie CTL1, jedoch mit alternativer Look-up Tabelle</i>
<i>E8</i>	<i>GLC2000</i>	<i>LUC Experiment, ausgehend vom Jahr 2000, basierend auf FAO Statistiken, unter Annahme einer Desertifikationsrate von 0.5%/Jahr</i>
<i>E9</i>	<i>GLC2000</i>	<i>Wie E8, jedoch ohne Desertifikation</i>
<i>E9A</i>	<i>GLC2000</i>	<i>Wie E9, mit alternativer Look-up Tabelle</i>
<i>TOTDEF</i>	<i>GLC2000</i>	<i>Sensitivitätsexperiment, bei der sämtlicher Wald durch Grasland ersetzt wurde</i>

E8, E9 und E9A sind LUC-Experimente, bei denen eine mit ASLUCM simulierte jährlich variierende Vegetation genutzt wird. Hierbei geht E8 von einem Szenario von einer Ausbreitung von Wüsten um 0.5% pro Jahr aus, während E9 und E9A keine Desertifikation beinhalten. Bei E9A wurde ähnlich bei CTL2 die alternative Loopup-Tabelle verwendet. Bei TOTDEF wurden als Sensitivitätsstudie sämtliche Waldflächen durch Grasland ersetzt, um die Reaktion von COSMO-CLM auf eine hypothetische vollständige Entwaldung zu untersuchen.

Abb. V.3 zeigt die Verteilung der Vegetationsparameter, die aus dem GLC2000-Datensatz ermittelt wurden, sowie die Differenzen zu den aus ECOCLIMAP generierten. Auffällig sind die Unterschiede besonders im äquatorialen Regenwald des Kongobeckens, wo ECOCLIMAP deutliche höhere Werte für die Pflanzenbedeckung (PLCOV\_MN, PLCOV\_MX), Leaf Area Index (LAI\_MN, LAI\_MX), Rauigkeitslänge (Z0), den minimalen stomatalen Widerstand (RSMIN), Anteil immergrünen Waldes (FOR\_E) sowie die Wurzeltiefe (ROOTDP). ECOCLIMAP weist eine niedrigen Anteil laubwechselnden Waldes (FOR\_D) im südlichen Kongobecken auf, dafür einen höheren Anteil immergrünen Waldes (FOR\_E) im gesamten Kongobecken. GLC2000 zeigt eine dichtere Pflanzenbedeckung im Sahel und liefert dort höhere LAI-Werte. Die räumliche Verteilung des maximalen LAI zeigt hier die höchsten Werte, obwohl diese eher in den dichten tropischen Wäldern des Kongobeckens zu erwarten sind. Um dieser Problematik entgegenzuwirken wurde eine für CTL2, E9A und TOTDEF verwendete alternative Lookup-Tabelle zur Berechnung der Vegetationsparameter verwendet, die lediglich LAI\_MX und RSMIN beeinflusst.

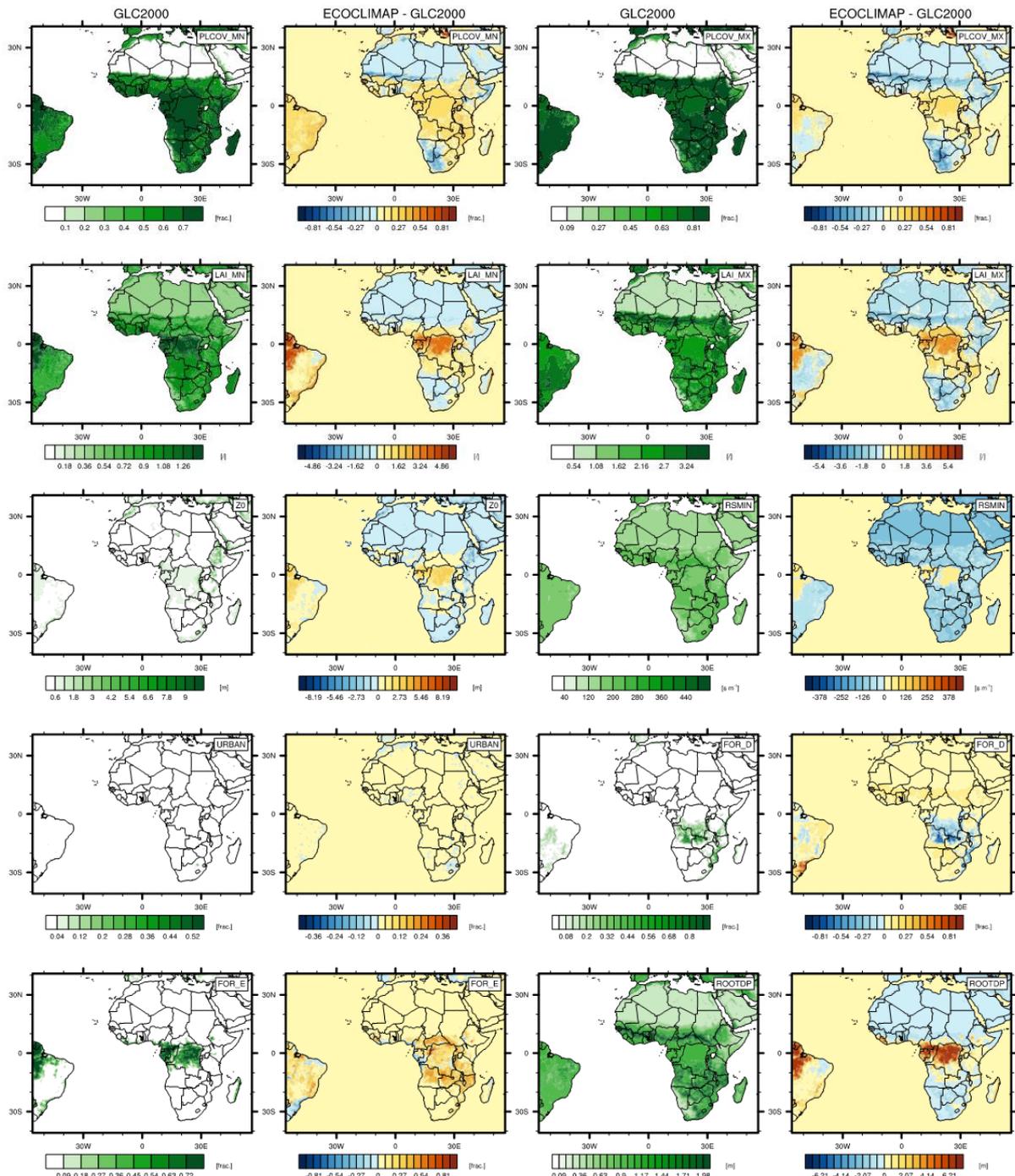


Abb. V.9: Mit EXTPAR ermittelte Landoberflächenparameter aus GLC2000 und Differenzen zwischen ECOCLIMAP und GLC2000.

Die Topographie des CCLM-Simulationsgebietes ist in Abb. V.4 dargestellt. Um den zeitlichen Verlauf des Westafrikanischen Monsuns zu untersuchen, werden Flächenmittel über drei Auswertungsregionen betrachtet: Die Guineaküste (GCO), der Westsahel (WSA), und der Zentralsahel (CSA). Diese sind in Abb. V.4 als rote Boxen dargestellt.

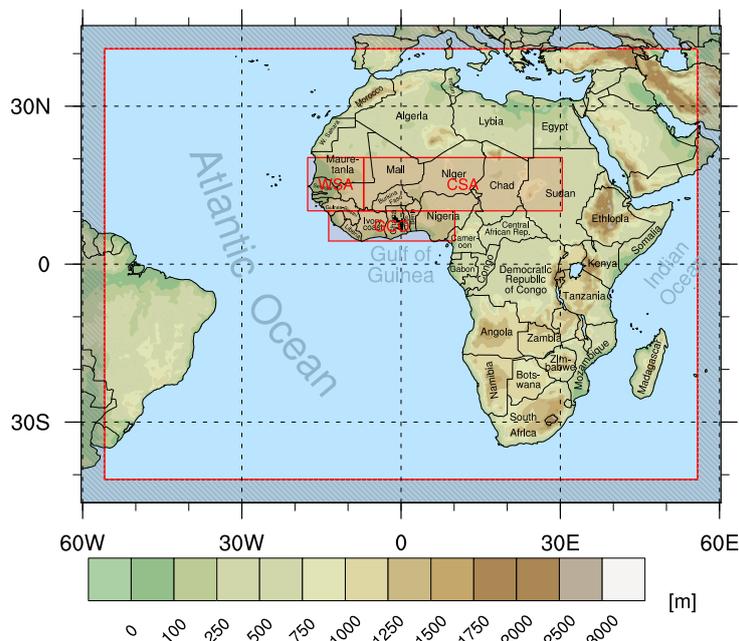


Abb. V.10: Topographie [m] des Simulationsgebiets. Die Boxen zeigen die Auswertungsregionen der Guineaküste (GCO), des Westsahels (WSA) und des Zentralsahels (CSA). Der graue Außenbereich wird in den Auswertungen nicht berücksichtigt.

Die Kontrollsimulationen CTL1 und CTL2 dienen u.a. der Validierung des COSMO-CLM. Abb. V.5 zeigt hierzu den mittleren Niederschlag zwischen Juni und September (JJAS) der Dekade 2001-2010 für Beobachtungen von Willmott-Matsuura, University of Delaware (U-DEL), die Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), das Ensemblemittel der MPI-ESM-LR Baseline1-Simulationen r4,r5,r8 und der damit angetriebenen CCLM-Experimente DEP, CTL1 und CTL2. Wesentliche Aspekte wie lokale Maxima über dem äthiopischen Hochland und der Küste Guineas und Sierra Leones werden von den Modellen gut erfasst. Aufgrund der höheren Auflösung kann das Regionalmodell einige Muster besser wiedergeben als das MPI-ESM-LR. Gegenüber den Beobachtungen simuliert CCLM jedoch sehr viel mehr Niederschlag über der Guineaküste und dem zentralen Atlantik im Bereich der ITCZ. Unterschiede zwischen DEP, CTL1 und CTL2 sind kaum erkennbar, was auf einen vergleichsweise geringen Einfluss der Landoberfläche auf die Simulationen gegenüber dem Globalmodellantrieb hinweist.

Dies zeigt sich auch im mittleren Jahresgang über den drei Auswertungsregionen GCO, WSA und CSA. Abb. V.6 zeigt das über die Regionen gemittelte dekadische Mittel der monatlichen Niederschlagssumme aus Beobachtungs- und Modelldaten. Zwar überschätzt das CCLM genau wie das MPI-ESM-LR den Niederschlag an der GCO, ist im Gegensatz zu diesem jedoch in der Lage die Bimodalität wiederzugeben; das Timing der beiden Niederschlagsmaxima ist jedoch um jeweils einen Monat verschoben. Dieser verspätete Peak ist auch im WSA sichtbar, wo die Modelle den Niederschlag jedoch allesamt unterschätzen. Im Zentralsahel zeigt CCLM eine Überschätzung, obwohl MPI-ESM-LR hier zu wenig Niederschlag anzeigt.

Unterschiede aufgrund der verschiedenen unteren Randbedingungen durch die Verwendung unterschiedlicher Landnutzungsdatensätze ist erneut kaum zu erkennen. Lediglich an der Guineaküste führt die Verwendung des ECOCLIMAP-Datensatzes zu einer Verstärkung des Niederschlags gegenüber GLC2000.

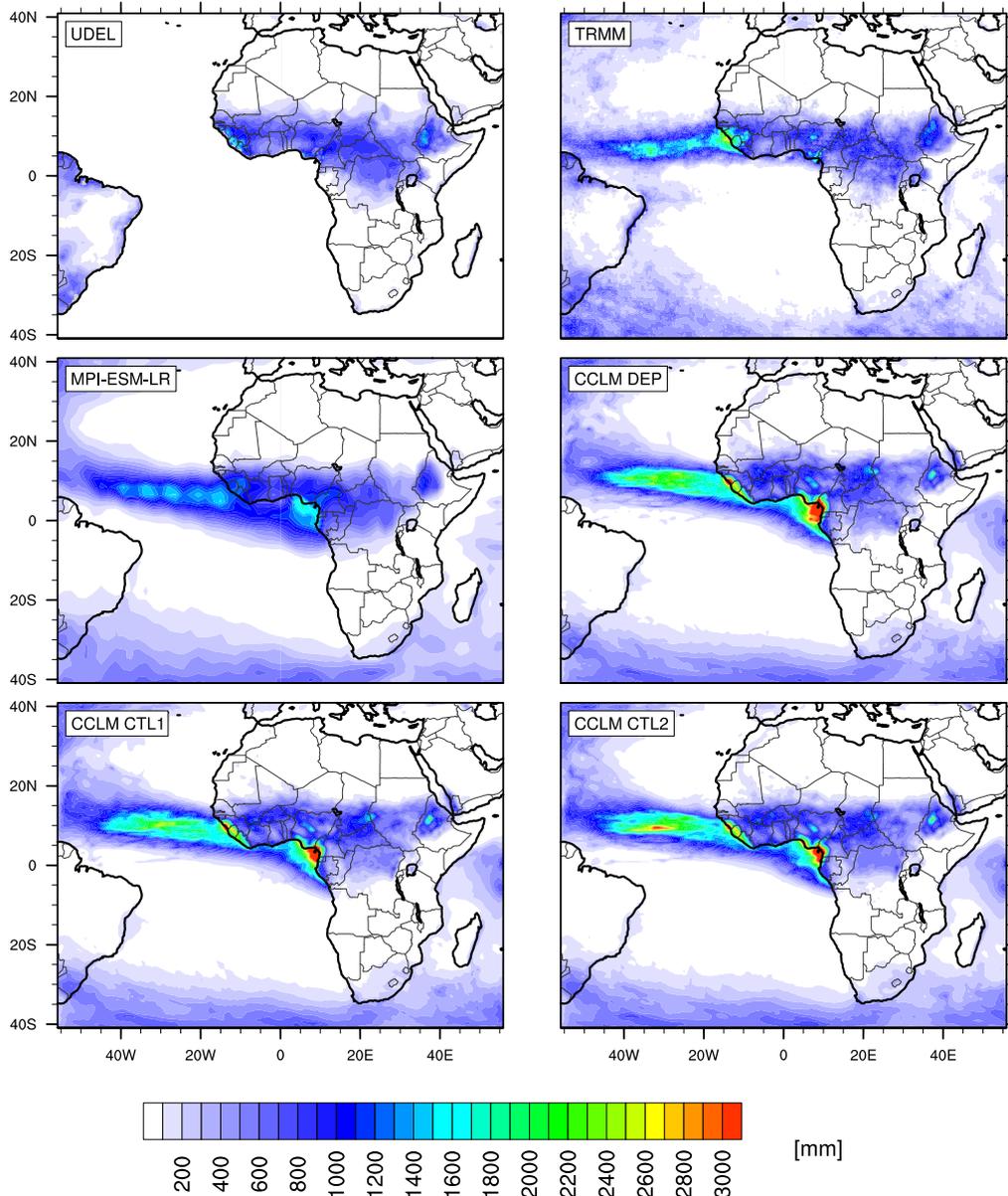


Abb. V.11: Mittlere JJAS-Niederschlagssumme [mm] in UDEL, TRMM, MPI-ESM-LR, DEP, CTL1 und CTL2 für den Zeitraum 2001-2010.

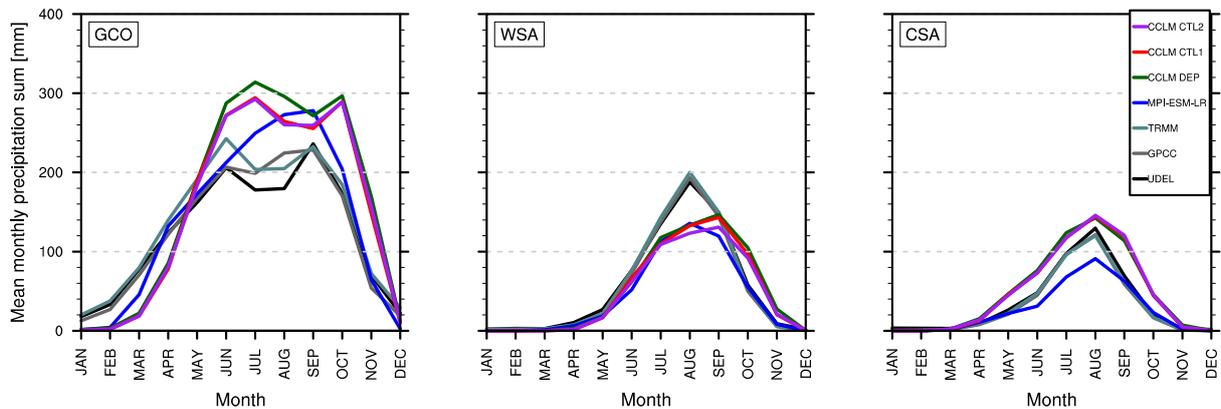


Abb. V.12: Dekadisches Mittel der monatlichen Niederschlagssummen [mm], gemittelt über die Auswertungsregionen GCO, WSA und CSA, für 2000er Dekade aus UDEL, GPCC, TRMM, MPI-ESM-LR, DEP, CTL1 und CTL2.

Die Modelle weisen ähnliche Stärken und Schwächen auch für andere Dekaden auf, weswegen diese hier nicht explizit aufgeführt werden.

Differenzen der mittleren JJAS-Niederschlagssumme zwischen den Kontrollsimulationen CTL1 und CTL2 und den LUC-Experimenten E8, E9 und E9A sind in Abb. V.7 für die Dekade 1966-1975 gezeigt. Obwohl die LUCs ausschließlich Landmassen betreffen wird der Niederschlag vor allem über dem zentralen Atlantik im Bereich der ITCZ beeinflusst. Für E8 und E9 sind positive Anomalien von bis zu 200mm zwischen 5 und 10°N sichtbar, während nördlich davon negative von bis zu 300mm erkennbar sind, die jedoch allesamt nicht statistisch signifikant (auf dem 95% Level) sind. Hierdurch ist die ITCZ weiter südlich gelegen als in den CTL1, wo diese zu weit nach Norden reichte gegenüber Beobachtungen. E9A hingegen zeigt ein komplett umgekehrtes Bild mit negativen Anomalien im Süden und positiven nördlich davon.

Über Land beschränken sich die Veränderungen hauptsächlich auf Westafrika. Hier sind Reduktionen des Niederschlag im Bereich der Guineaküste sichtbar, leichte Zunahmen hingegen im Sahel. Allerdings zeigen sich meist kaum klar erkennbare Muster.

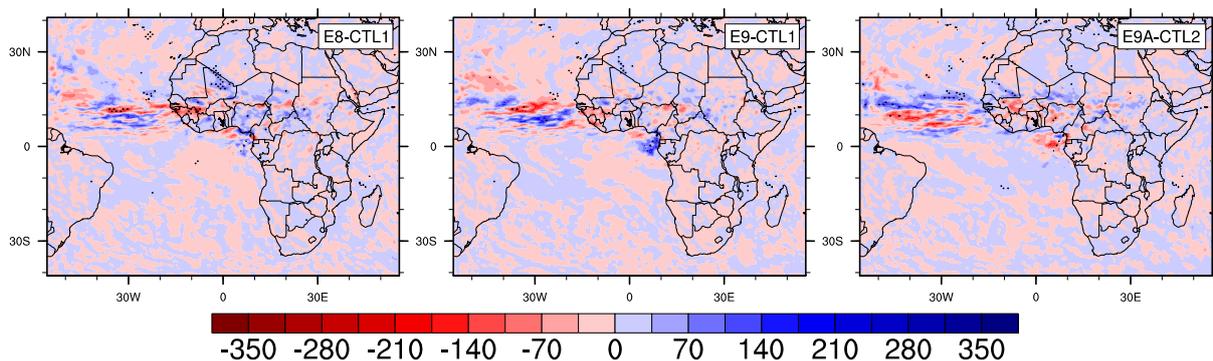


Abb. V.13: Mittlere JJAS-Niederschlagsanomalie [mm] in E8, E9 und E9A gegenüber CTL1 bzw. CTL2 für Dekade 1966-1975. Gepunktete Regionen sind signifikant auf dem 95%-Level.

Dies wird auch anhand der flächengemittelten Niederschlagssummen der Dekade 1966-1975 für die drei Auswertungsregionen in Abb. V.8 deutlich. Die Unterschiede zwischen den Kontrollsimulationen und Experimenten E8, E9 und E9A sind kaum erkennbar und um ein vielfaches geringer als die Abweichungen von den Beobachtungen.

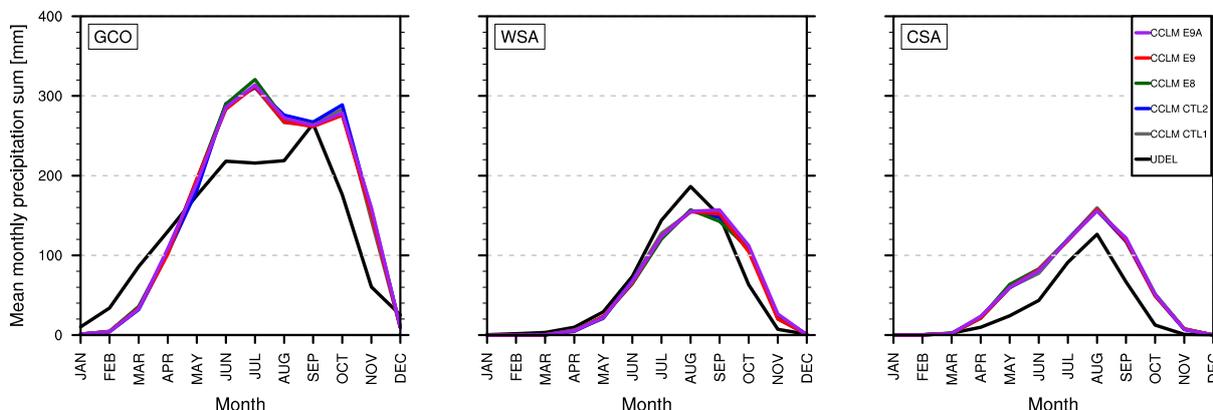


Abb. V.14: Dekadisches Mittel der monatlichen Niederschlagssumme [mm], gemittelt über die Auswertungsregionen GCO, WSA und CSA, für 1965er Dekade aus UDEL, CTL1, CTL2, E8, E9 und E9A.

Selbst das Szenario einer vollständigen Umwandlung afrikanischer Waldflächen in Grasland, das als Extrembeispiel für menschlich hervorgerufene Landnutzungsänderungen dienen soll,

zeigt relativ geringfügige Veränderungen des JJAS-Niederschlags, wie in Abb. V.9 zu sehen ist. Ein signifikanter Rückgang ist lediglich über dem Golf von Guinea und nordwestlichen Kongobecken sichtbar, ein Anstieg ist über dem nordöstlichen Kongobecken zu erkennen. Offenbar verlagert sich ein Großteil des Niederschlags vom Ozean auf das Land, besonders nach Osten hin. Die veränderten Landoberflächencharakteristika könnten hier eine Zirkulation mit aufsteigenden Luftmassen im Osten und Absinken über dem Golf von Guinea hervorrufen, ähnlich den Ergebnissen von Cook and Vizy (2015). Wieder ist eine Fernwirkung auf die atlantische ITCZ zu sehen, allerdings zeigen sich hier keinerlei Strukturen und kaum signifikante Veränderungen.

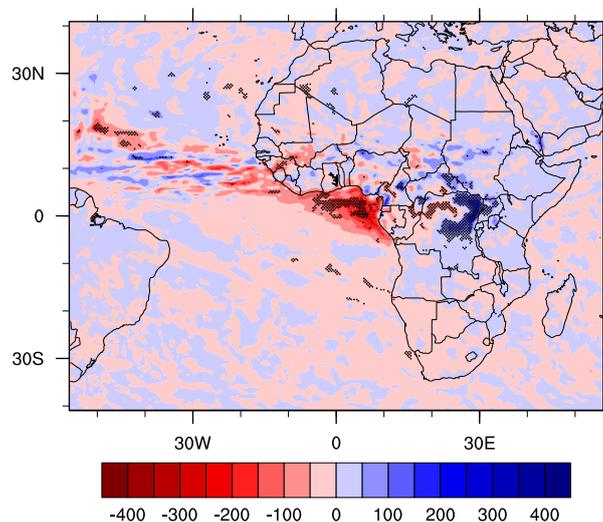


Abb. V.15: Mittlere JJAS-Niederschlagsanomalie [mm] in TOTDEF gegenüber CTL2 für Dekade 1966-1975. Gepunktete Regionen sind significant auf dem 95%-Level.

Als Fazit der Sensitivitätsstudien lässt sich zusammenfassen, dass realistische Landnutzungsänderungen sich eher geringfügig auf die Ergebnisse dekadischer Klimaprojektionen mit COSMO-CLM auswirken. Besonders ließ sich keine signifikante Verbesserung der Vorhersagbarkeit des Niederschlags in Westafrika nachweisen, selbst wenn die Ensemblegröße von jeweils 3 Simulationen für eine aussagekräftige statistische Analyse zu klein ist. Allerdings zeigte sich, dass bereits die Wahl des Landnutzungsdatensatzes und der Lookup-Tabelle, die für die Ermittlung der unteren Randbedingungen verwendet werden, einen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann und daher genau überprüft werden muss, welcher Datensatz die besten Resultate liefert. Angesichts der Sensitivität, die Paeth et al. 2009 gefunden haben, ist es gut denkbar, dass andere regionale Klimamodelle wie REMO oder WRF anders auf die als untere Randbedingungen unterlegten LUCs reagieren, was aufgrund der Entwicklung des ASLUCM und damit verbundener technischer Komplikationen sowie fehlender Rechenkapazitäten jedoch im Rahmen des DEPARTURE-Projekts nicht überprüft werden konnte. Auch die in COSMO-CLM verwendeten Parametrisierungen der Landoberfläche, Grenzschicht und Konvektion sowie andere Modelleinstellungen könnten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

## VI. Ergebnisbericht des Teilprojekts der Goethe-Universität Frankfurt (01LP1129D)

Die folgende Darstellung beschreibt eingehend die wissenschaftlich-technischen Arbeiten der GUF innerhalb von DEPARTURE und die daraus gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse.

## VI.1. Analyse zu Beginn bestehender Simulationen, Sensitivitätsstudien und Ensemble-Simulationen mit COSMO-CLM

Der initiale Beitrag der Goethe-Universität Frankfurt zum MiKlip Modul C DEPARTURE Projekts bestand im Jahr 2011 vor allem in der Analyse von existierenden ECHAM5 und COSMO-CLM Läufen. Zu diesem Zweck wurden zunächst vorhandene ECHAM5- und ERA-Interim- angetriebene COSMO-CLM Läufe für das CORDEX-Afrika-Gebiet ausgewertet. Weiterhin wurde im Projektverlauf, gemeinsam mit dem KIT Karlsruhe, die Sensitivität der bezüglich des Aerosolantrieb untersucht, indem verschiedene Aerosolklimatologien getestet wurden. Die im Rahmen von DEPARTURE geplanten Ensembles zum regionalen Downscaling mit COSMO-CLM wurden am KIT durchgeführt. An der GUF wurde ein Teil des Ensembles zusätzlich mit den im Verlauf des Projekts neu erzeugten Bodenanfangsbedingungen wiederholt, um ihren Einfluss auf die dekadische Vorhersagbarkeit zu evaluieren.

### VI.1.1. Reproduktion des Westafrikanischen Monsuns in Modellsimulationen und Reanalysen

Ein erster wichtiger Schritt war die Analyse der Simulationen hinsichtlich der Fähigkeit des COSMO-CLM wichtige atmosphärische Prozesse, wie den Westafrikanischen Monsun (WAM), mit ausreichender Qualität zu reproduzieren. Der Vergleich mit Beobachtungs- und Reanalysedaten der letzten 20 bis 40 Jahre hatte zum Ziel, den Ist-Zustand als Ausgangsbasis für die geplanten Arbeiten innerhalb von DEPARTURE und MiKlip zu bestimmen und die dekadische Variabilität von Klimaprozessen, wie dem WAM, abzuschätzen. Dabei zeigte sich, dass das COSMO-CLM durchaus in der Lage ist, die wichtigsten Eigenschaften des WAM wiederzugeben. Die Untersuchungen zeigten aber auch Defizite in den Modellergebnissen auf. So war etwa die konvektive Aktivität, gemessen durch die ausgehende langwellige Strahlung, zu stark und der Niederschlag wurde in großen Teilen der afrikanischen Tropen unterschätzt. Die Tab. VI.1 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der Zeitreihe verschiedener Monsun-Indizes für die Monsunzeit (Juni bis September). Die Standardabweichung ist dabei ein Maß für die Variabilität der Zeitreihe innerhalb des Zeitraums.

*Tab. VI.1.1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Zeitreihe (in Klammern) der Monsun-Indizes für Niederschlag (PI), konvektive Aktivität (OLRI) und Windscherung für die Monsunzeit (Juni – September, 1961-2000 für ECHAM5 Antrieb, 1990 – 2008 für ERA-Interim Antrieb). "Referenz" bezieht sich auf GPCC für PI, NASA/GEWEX SRB für OLRI und NCEP für WAMI.*

	PI [mm]	OLRI [W/m <sup>2</sup> ]	WAMI × 100 [1]
<i>Referenz</i>	136 (30)	254 (12)	-0 (106)
ERA	124 (32)	264 (11)	-33 (87)
CCLM_ERA	113 (25)	224 (9)	109 (103)
ECHAM5	116 (31)	232 (12)	-0 (85)
CCLM_EC5	125 (30)	219 (11)	57 (92)
CCLM_EC5_ALB	116 (26)	225 (13)	55 (92)

### VI.1.2. Einfluss des Bodens auf die regionale Klimamodellierung in Afrika

Das primäre Ziel der Goethe-Universität Frankfurt im DEPARTURE Projekt war eine verbesserte Initialisierung des Bodens im TERRA-ML Bodenmodell des COSMO-CLM. Hierzu wurden die unter VI.1.1. genannten Modellsimulationen im Schritt M1 in Bezug auf den möglichen Einfluss der Bodenoberfläche auf die Simulationsergebnisse untersucht. Die be-

reits existierenden Modellergebnisse erlaubten keine direkte Untersuchung von Bodenparametern, gaben aber indirekte Hinweise auf die Wichtigkeit dieser Größen. Es zeigte sich, dass Überschätzungen von Konvektion und Niederschlag im Modell stark von der Meeresoberflächentemperatur abhängen. Das Hitzetief im Sommer über der Sahara wird wiederum stark von der Bodenoberflächentemperatur in dieser Region beeinflusst. Der daraus resultierende Gradient zwischen Atlantik und Sahara beeinflusst im großen Maße die Monsunzirkulation in Westafrika. Für eine gute Simulation des WAM ist es deshalb enorm wichtig, dass sowohl Meeresoberflächentemperatur (SST, bestimmt durch die Antriebsdaten), als auch Bodenoberflächentemperatur (bestimmt u.a. durch Bodenalbedo und TERRA-ML Bodenmodell) möglichst korrekt repräsentiert werden. Unsere Untersuchungen zeigten z.B., dass ein Temperaturfehler in der Sahara durch verbesserte Eingangsdaten für die Bodenalbedo deutlich reduziert werden konnte (Abb. VI.1.1). Dies wiederum reduzierte eine Überschätzung des Niederschlags in der Sahelregion. Durch die im COSMO-CLM vorhandene Kopplung der Bodenalbedo an die Bodenfeuchte bewirkte eine Änderung des Niederschlags eine zusätzliche Änderung der Bodenalbedo. Dies spiegelt die überaus komplexen Rückkopplungen im Modell und insbesondere im Modellboden wieder. Die gefundenen Ergebnisse legen nahe, dass eine verbesserte Initialisierung von TERRA-ML großes Potential zur Verbesserung von Projektionen auf der dekadischen Zeitskala hat.

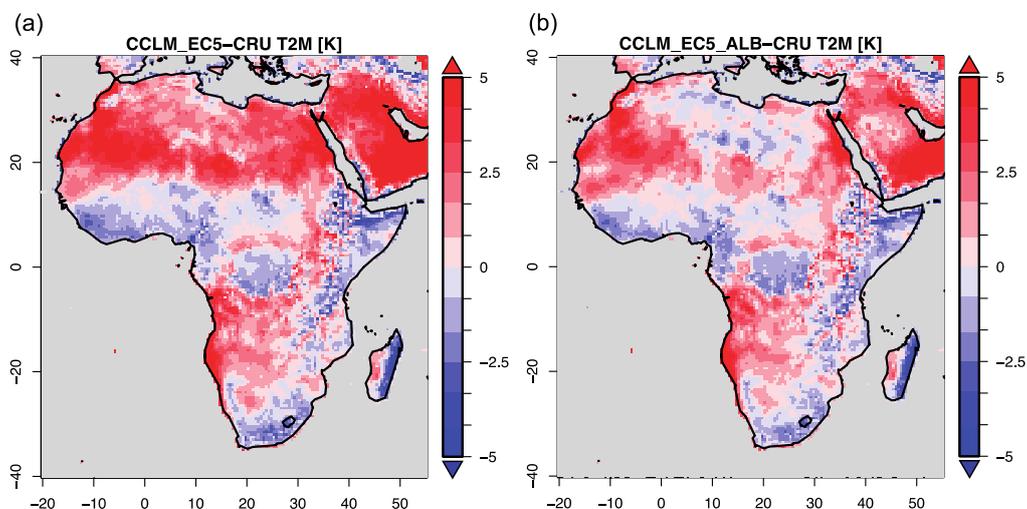


Abb. VI.1.1: Räumliche Unterschiede (Modellergebnis minus Beobachtung) der mittleren 2m Temperatur für die Monsunzeit (Juni-September) für (a) CCLM\_EC5 - GPCC 2m Temperatur von 1961 bis 2000, und (b) mit verbesserter Bodenalbedo CCLM\_EC5\_ALB - GPCC 2m Temperatur 1961 – 2000.

### VI.1.3. Einfluss des Globalmodells auf die regionale Klimamodellierung in Afrika

Ein Hauptfokus des MiKlip Moduls C liegt in der Regionalisierung des globalen Klimamodells ECHAM6. Da zu Beginn des MiKlip-Projektes noch keine Simulationsergebnisse für das COSMO-CLM mit ECHAM6-Antrieb zur Auswertung zur Verfügung standen, war ein weiteres Ziel unserer Voruntersuchungen den Einfluss des antreibenden Modells auf die Simulationsergebnisse zu analysieren. Zum Vergleich wurden zwei regionale Klimasimulation mit dem COSMO-CLM für Afrika verwendet, die zum einen mit Daten des globalen Klimamodells ECHAM5 und zum anderen mit ERA-Interim Reanalysedaten angetrieben wurden. Ein Vergleich der verwendeten ECHAM5 und ERA-Interim Daten zeigte z.B. größere Unterschiede in der Meeresoberflächentemperatur (SST) beider Datensätze. Die SST im COSMO-CLM wird direkt vom antreibenden Modell vorgeschrieben, weshalb dies ein Parameter ist, der den Einfluss der Antriebsdaten besonders deutlich zeigen kann. Die Unterschiede in der SST führten in den beiden COSMO-CLM Simulationen u.a. zu Unterschieden

in der konvektiven Aktivität (Abb. VI.1.2) und dem Niederschlag über dem Atlantik, sowie zu unterschiedlichen Gradienten in der Oberflächentemperatur, der sich auch auf die Monsoonzirkulation auswirkte. Die Ergebnisse des COSMO-CLM werden also auch durch die Wahl des antreibenden Modells beeinflusst. Dieses Ergebnis wurden bei die Planung späterer Modellrechnungen innerhalb MiKlips berücksichtigt.

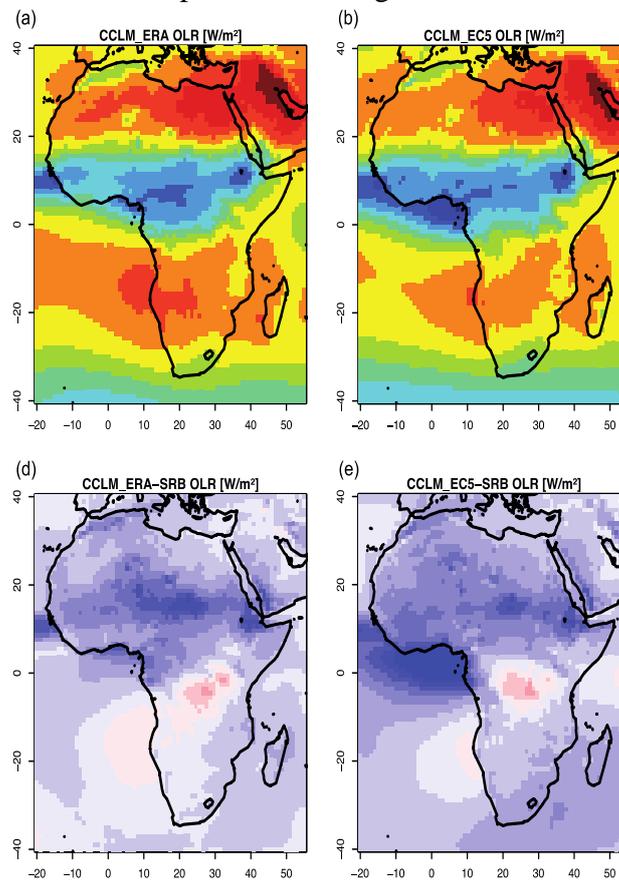


Abb. VI.1.2: Räumliche Unterschiede (Modellergebnis minus Beobachtung) der mittleren ausgehenden langwelligen Strahlung (OLR) für die Monsunzeit (Juni-September) für (a) CCLM\_ERA - SRB OLR von 1990 bis 2008, und (b) CCLM\_EC5 - SRB OLR 1984-2000. OLR wird als Maß für die konvektive Aktivität verwendet.

#### VI.1.4 Sensitivitätsstudien mit COSMO-CLM bezüglich Aerosolklimatologie

Ein Schlüsselparameter für das Strahlungsschema ist die Verteilung der optischen Aerosoldicke (aerosol optical depth, AOD), welches in COSMO-CLM durch die Tanré-Klimatologie (langjähriger Mittelwert) repräsentiert wird. Die Qualität der Strahlungssimulation hat direkte Auswirkungen auf die MiKliP-Zielvariablen. Am KIT wurden COSMO-CLM-Läufe mit der neueren Kinne-Klimatologie (monatliche Mittelwerte) durchgeführt, was zu einem deutlich geringeren Bias in der 2M-Temperatur führte.

An der GUF wurde eine Sensitivitätsstudie bezüglich der AOD für Afrika mit COSMO-CLM durchgeführt, deren Ergebnisse bereits publiziert sind (Kothe et al. 2014). Es wurde demonstriert, dass die AOD einen erheblichen Einfluss auf Strahlungsbudget und Oberflächentemperatur hat, und dass die Verwendung einer weiteren optimierten AOD-Klimatologie (MACC-Reanalyse des ECMWF, <http://www.copernicus-atmosphere.eu>), insbesondere in Kombination mit einer verbesserten Bodenparameterisierung, einen deutlichen Beitrag zur Verringerung des Vorhersagefehlers leisten kann, wie Abb. VI.1.3 zeigt. Diese Resultate unterstreichen die Bedeutung der in M3 in DEPARTURE anvisierten Optimierung des Aerosolantriebs für dekadische Projektionen.

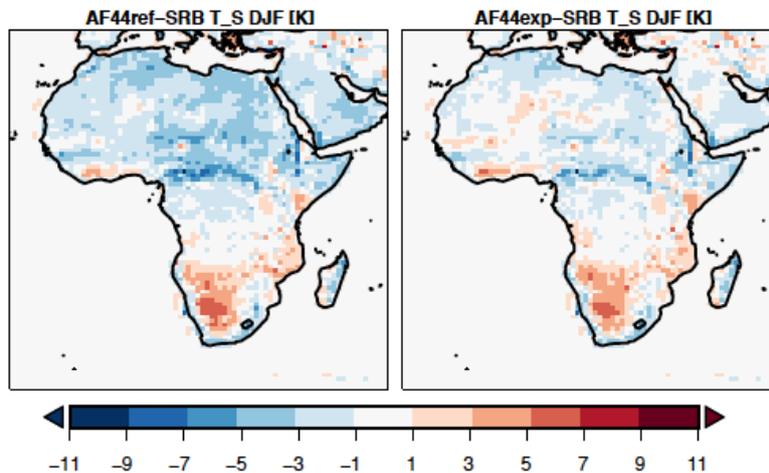


Abb. VI.1.3: Unterschiede der Bodenoberflächentemperatur [K] im Winter (DJF, 2003-2007) zwischen Referenz (SRB-Datensatz, [http://gewexsrb.larc.nasa.gov/common/php/SRB\\_methodology.php](http://gewexsrb.larc.nasa.gov/common/php/SRB_methodology.php)) und COSMO-CLM mit Tanre-AOD (links) und MACC-AOD (rechts). Der Bias wird konsistent verringert.

#### VI.1.5 Sensitivitätsstudie mit COSMO-CLM bezüglich unterer Randbedingung für Bodentemperatur

Im Projektverlauf wurde festgestellt, dass die standardmäßig in TERRA-ML verwendete untere Randbedingung für die Bodentemperatur für Klimasimulationen unpassend ist. Daher wurde eine neue Formulierung der Randbedingung entwickelt und implementiert. Im Anschluss wurde ihr Einfluss auf die Simulation des Klimas in Afrika in einer Sensitivitätsstudie mit COSMO-CLM untersucht. Diese Thematik wird in Abschnitt VI.3. näher beschrieben.

#### VI.1.6 Ensemble-Simulationen mit COSMO-CLM

Aufgrund des großen DEPARTURE-Modellgebiets und des Multi-Modell-Ansatzes (COSMO-CLM, WRF, REMO) konnten in DEPARTURE aus Gründen der verfügbaren Rechenkapazität nur eine begrenzte Anzahl an Hindcast-Dekaden hinunterskaliert werden. Hierbei wurde gemeinsam eine Beschränkung auf die wissenschaftlich und gesellschaftlich relevanten Dekaden 1965-1974, 1981-1990, 1991-2000 sowie 2001-2010 beschlossen. Weiterhin werden von jedem der verwendeten Regionalmodelle jeweils drei Realisierungen des Globalmodells MPI-ESM als Antrieb genutzt. Hierzu wurde die beste, schlechteste und durchschnittliche Realisierung für jede der genannten Dekaden gewählt, um die auftretenden Unsicherheiten durch das Globalmodell möglichst gut abdecken zu können.

Tab. VI.1.2: Verwendete Dekaden und Realisierungen des Globalmodells (MPI-ESM-LR) für die dynamische Regionalisierung in Afrika mit den Regionalmodellen WRF, REMO und COSMO-CLM in DEPARTURE.

Dekade	1965-1974			1981-1990			1991-2000			2001-2010		
MPI-ESM Realisierung	R5	R6	R7	R5	R8	R10	R4	R3	R9	R4	R5	R8

Alle in der Tabelle genannten Realisierungen wurden mit folgenden Modellen durch die DEPARTURE-Projektpartner durchgeführt:

- COSMO-CLM (→ KIT Karlsruhe)
- WRF (→ KIT / Uni Augsburg)
- REMO (→ Uni Würzburg)
- REMO (→ MPIM Hamburg)

- REMO gekoppelt mit MPIOM (→ MPIM Hamburg)
- REMO gekoppelt mit MPIOM, Szenario B1 (→ MPIM Hamburg)

Insbesondere die Kopplung des Regionalmodells mit einem Ozeanmodell anstatt der Verwendung der globalen SST als Randbedingung stellte sich im Projektverlauf als besonders relevant zur Verbesserung des Vorhersagebias dar (siehe VI.7.).

Seitens der GUF war somit keine initiale Beteiligung an den grundlegenden Ensembleläufen eingeplant. Jedoch wurden im Jahr 2014 an der GUF ein Teil der oben aufgeführten COSMO-CLM-Läufe mit im Verlauf des Projekts wiederholt, wobei nun die optimierten Feldern zur Initialisierung der Bodentemperatur und -feuchte verwendet wurden. Der Vergleich mit dem originalen COSMO-CLM-Ensemble erlaubt einen Rückschluss auf die Wirkung der neuen Initialisierung auf die dekadische Vorhersagbarkeit. Diese neuen Simulationen sowie ihre Ergebnisse werden im Detail in Abschnitt VI.6. dargestellt.

#### VI.1.7. Zusammenfassung

Die untere atmosphärische Randbedingung (Ozean und Boden) erwies sich als Schlüsselkriterium für dekadische Vorhersagbarkeit. Dies bestätigt die in DEPARTURE anvisierte Kopplung mit einem interaktiven Ozean sowie die an der GUF durchgeführte optimierte Initialisierung der Landoberfläche.

### VI.2. Theoretische Untersuchungen zur Zustandsschätzung im tiefen Boden

Innerhalb von DS1 wurden anschließend an der GUF die wissenschaftliche Durchführbarkeit der unter I.1. und I.3. vorgestellten Idee untersucht. Hierbei geht es insbesondere um die Vorbereitung von Sensitivitätsstudien mit dem Bodenmodell in COSMO-CLM, die den Vorteil solcher weiterentwickelter Verfahren zeigen können.

#### VI.2.1. Grundsätzliche Fragestellung

Die Bodeninitialisierung mithilfe von Datenassimilationsmethoden wird heutzutage von den meisten Wetterzentren zur Verbesserung der Wettervorhersage durchgeführt. Hierbei ist vor allem die Anpassung des oberflächennahen Bodens relevant, da dieser durch direkte Rückkopplung die bodennahen atmosphärischen Variablen signifikant beeinflusst.

Im Hinblick auf das Ziel einer dekadischen Vorhersagbarkeit innerhalb MiKlip ergibt sich jedoch eine grundsätzlich neue Fragestellung bei der Bodenassimilation, da nun der Fokus auf dem tiefen Boden liegt. Dies stellt eine neue Herausforderung dar, da flächenmäßig verfügbare Beobachtungen (Satelliten-Retrievals) ausschließlich den oberflächennahen Boden erfassen können, und zudem noch durch vergleichsweise große Unsicherheiten ausgezeichnet sind (z.B. Rebel et al. 2012). Es ist somit zunächst zu untersuchen, ob und unter welchen Voraussetzungen die in den oberflächennahen Beobachtungen enthaltene Information zur Schätzung des tiefen Bodens genutzt werden kann. Diese zentrale Frage stand im Mittelpunkt unserer ersten Arbeiten innerhalb des ersten Projektjahres 2012.

#### VI.2.2. Zustandsschätzung des tiefen Bodens aus theoretischer Sicht

Die wissenschaftliche Fragestellung lautete somit abstrahiert, inwiefern sich ein unbeobachtetes, langsames Subsystem (wie der tiefe Boden) durch die partielle Beobachtungen eines schnell-variablen Subsystems (wie der oberflächennahe Boden) schätzen lässt. Zur Beantwortung führten wir Experimente durch, bei dem zwei stark nichtlineare Lorenzmodelle mit verschiedenen Zeitskalen (Lorenz 1963, Pena und Kalnay 2004) gekoppelt wurden (Abb. VI.2.1). Die für MiKlip relevanten Ergebnisse lauten.

- Die Zustandsschätzung von unbeobachteten, langsamen Subsystemen ist grundsätzlich möglich, wenn die Kopplung der Subsysteme nicht zu schwach ist.
- Ein bestimmender Faktor neben der Kopplungsstärke ist der Fehler der

Beobachtungen im schnellen System. Ist dieser verhältnismäßig groß, ist eine hohe Kopplung nötig, um realistische Analysen zu erzeugen. (Abb. VI.2.2)

- Auch wenn das langsame System an einem völlig falschen Zustand gestartet wird, was komplette Unwissenheit simuliert, wird durch den Informationstransfer der Beobachtungen eine schnelle Anpassung an den wahren Zustand gewährleistet.

Diese Ergebnisse stützten somit das anvisierte Projektziel: Obwohl über den Zustand des tiefen Bodens zunächst keine Informationen vorliegen, ist eine indirekte Schätzung mittels Datenassimilation dennoch Erfolg versprechend. Da die prognostischen Gleichung im Bodenmodell einen deutlich geringeren Grad an Nichtlinearität aufweisen als das verwendete Lorenzmodell, ist zu folgern, dass dort die Assimilation sogar unter noch strengeren Bedingungen möglich sein sollte.

Nach der positiven Beantwortung der grundlegenden Fragestellung stand somit eine Untersuchung dieser Boden-Gleichungen für Temperatur und Feuchte im Hinblick auf Zustandsschätzung an. Die Kopplung zwischen oberflächennahem und tiefem Boden ergibt sich durch das Verhältnis der grundlegende Parameter Kapazität und Leitfähigkeit (Wärme oder Wasser), die vom Bodentyp (Textur) abhängen und damit von der Region.

Um die Schätzung des tiefen Bodens zu untersuchen, wurden Experimente mit den prognostischen Gleichungen des Bodenmodells (Wärmeleitungsgleichung für Bodentemperatur und Richards-Gleichung für Bodenfeuchte) durchgeführt. Dies beschränkt das gesamte, komplexe Bodenmodell auf seinen wesentlichen Kern. Die daraus erzielten Erkenntnisse bildeten die wissenschaftliche Grundlage zum Aufbau des DA-Systems (siehe VI.4. und VI.5.) bilden.

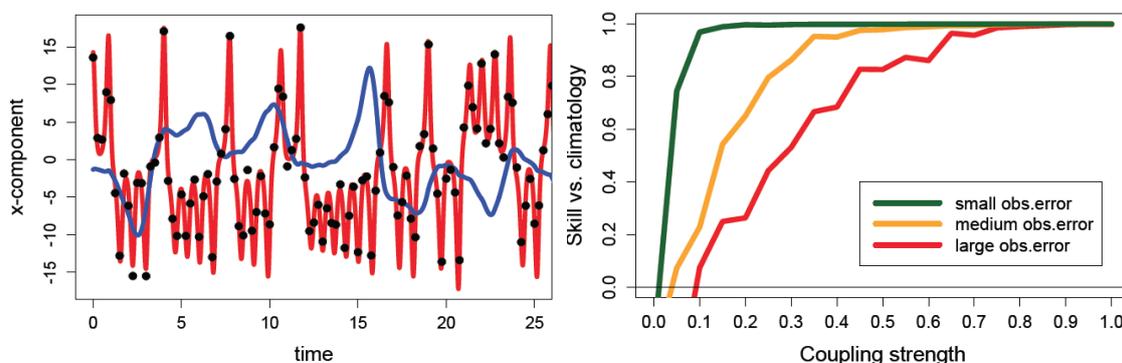


Abb. VI.2.1: Kopplung zweier Lorenzsysteme schneller/langsamer Zeitskala, mit Beobachtungen ausschließlich im schnellen System.

Abb. VI.2.2: Qualität der Analyse im unbeobachteten, langsamen Subsystem, gemessen anhand des Skills des MSE im Vergleich zum Referenzlauf.

### VI.2.3. Vorteile der Methodik „Datenassimilation“ und Vergleich mit Initialisierung durch Spin-Up

Aufgrund der nahezu vollständigen Unwissenheit über den initialen Bodenzustand wird in Klimasimulationen oft eine eher pragmatische Lösung gewählt, indem ein Vorlauf des gesamten gekoppelten Atmosphäre-Land-Modells über mehrere Jahre zum Einschwingen („Spin-Up“) des Bodens durchgeführt wird. Hierfür ist also ein hoher Rechenaufwand für nicht-verwertbare Modelljahre erforderlich. Eine Diagnostik über den Erfolg des Spin-Ups oder eine Parameteroptimierung sind nicht auch möglich.

Hier bietet der Ansatz über Datenassimilation (für den Preis des höheren wissenschaftlichen und technischen Aufwandes) eine wesentlich bessere Lösung: Anhand des diagnostischen Outputs von Ensemble-DA-Verfahren ist erkennbar, wann die Unsicherheit hinreichend reduziert ist; parallel ist die Parameteroptimierung- und Anpassung möglich. Es kann ein offline-Bodenmodell verwendet werden, was den hohen Rechenaufwand von mehrjährigen Si-

mulationen des Gesamtmodells vermeidet, zudem kann die Zeitskala deutlich reduziert werden.

Einige wichtige Resultate der Experimente mit bezüglich der Bodentemperatur:

- Die Schätzung des tiefen Bodenzustands mittels fehlerbehafteten, oberflächennahen Beobachtungen kann erfolgreich durchgeführt werden. Es war bereits eine einzige Beobachtung der obersten Bodenschicht pro Tag ausreichend, um Konvergenz zu erzielen.
- Die charakteristische Zeitskala der Konvergenz (Abb. VI.2.3) zur wahren Lösung hängt primär von der Kopplungsstärke ab, also den unbeeinflussbaren Bodeneigenschaften. Sie beträgt zwischen einigen Wochen bis Monaten (bei ausschließlicher Beobachtung der obersten Schicht). Verkürzt werden kann diese durch qualitativ bessere Beobachtungen und eine durch höhere zeitliche Beobachtungsdichte. Der Effekt ist aber begrenzt, beispielsweise brachte eine Erhöhung der Dichte um den Faktor 24 lediglich eine halbierte Konvergenzzeit (Abb. VI.2.3).
- Die Art der unteren Randbedingung im tiefen Boden beeinflusst besonders die Spin-Up-Läufe:
- Die Spin-Up-Methode stellten sich in den Experimenten als teils unzuverlässig dar: Insbesondere wenn als untere Randbedingung „kein Wärmefluss“ gewählt wurde (typisch in vielen SVATs), ergab sich keine Konvergenz, sondern ein systematischer, nicht zu behebbender Bias beim Spin-Up-Lauf in allen Bodenschichten (Abb. VI.2.4 als Beispiel). Somit ist diese oft angewandte Technik zumindest kritisch zu hinterfragen. Der Assimilationslauf hingegen konnte auch mit der Fluss-Randbedingung gut umgehen, die Konvergenz dauert etwas länger bei sonst gleichen Bedingungen. (Abb. VI.2.4)
- Wird als untere Randbedingung ein fester, klimatologischer Temperaturwert gewählt, konvergieren die Spin-Up-Läufe zwar ebenfalls, benötigen jedoch deutlich mehr Zeit (Abb.3), bis zu mehreren Jahren, abhängig von der Kopplungsstärke (Bodentyp).
- Die korrekte Wahl der unteren Boden-Randbedingung stellte sich als erheblich für eine erfolgreiche Zustandsschätzung heraus. Ein Fehler etwa in der vorgegebenen tiefsten Bodenschicht führte zu einem signifikanten Bias insbesondere im Spin-Up-Run. Mit Ensemble-DA-Verfahren hingegen kann auch die Unsicherheit in der unteren Randbedingung besser berücksichtigt werden.

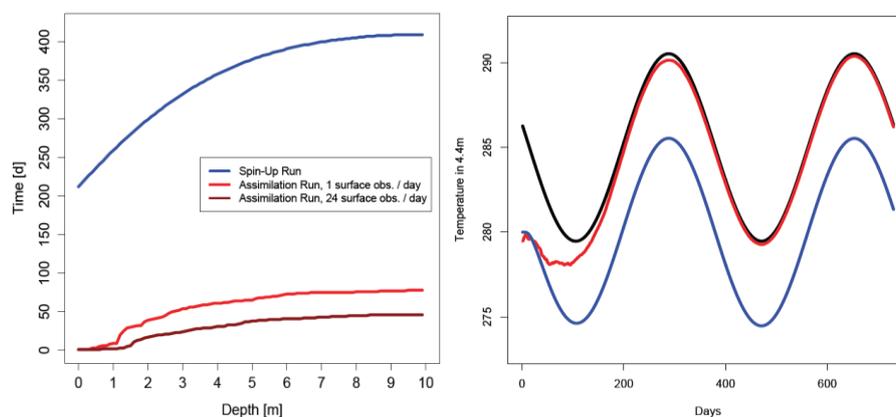


Abb. VI.2.3: Dauer der Konvergenz (in Tagen) von Assimilationsläufen und Spin-Up-Lauf. Als Maß hierfür wurde der Tag ermittelt, an dem der Fehler erstmals kleiner 10% der Amplitude in der jeweiligen Schicht war.

Abb. VI.2.4: Bodentemp. In 4.4m Tiefe über 2 Jahre (schwarz, Referenzlösung): Assimilation (rot) mit 2 Beob./Tag der obersten Schicht, versus Spin-Up (blau) bei einer No-Flux-Randbedingung. Der Bias im Spin-Up-Lauf bleibt systematisch erhalten.

Aus den experimentellen Ergebnissen lässt sich somit folgern, dass bereits bei der Zustandsschätzung ein Assimilationslauf mit einem Bodenmodell bei deutlich geringerem Rechenaufwand in deutlich kürzerer Zeit zuverlässigere Ergebnisse liefert und somit als Strategie zur Initialisierung des Bodens vorzuziehen ist. Die klassische Strategie des Spin-Up-Laufs hingegen läuft größere Gefahr, einen systematischen Bias in den Bodenzuständen zu erzeugen, was sich in der Regel durch verfälschte Austauschflüsse mit der Atmosphäre negativ auf anschließende Simulationen und damit dekadische Vorhersagbarkeit auswirken würde. Aufgrund der gefundenen Relevanz der unteren Boden-Randbedingung wurde zur Untersuchung ihrer Auswirkungen auf Klimasimulationen in Afrika eine Sensitivitätsstudie mit COSMO-CLM eingeplant und durchgeführt, siehe auch VI.3.

#### VI.2.4. Implikationen für den weiteren Projektverlauf

Die Schlussfolgerungen der Untersuchungen an simplifizierten Modellen lauten somit:

- Die geplante Strategie, d.h., die Verbesserung der potentiellen dekadischen Vorhersagbarkeit durch Verbesserung der unteren atmosphärischen Randbedingung „Boden“ hinsichtlich Anfangszustand und Parametern, mittels optimaler Kombination von Bodenmodell (TERRA-ML) und Beobachtungen (Datenassimilation mit dem Ensemble Kalman Filter), kann bestätigt und fortgeführt werden.
- Die Informationen aus oberflächennahen, schnellen Beobachtungen lässt sich so grundsätzlich in den langsamen, tiefen Boden transferieren, um den dortigen Zustand dynamisch zu ermitteln.
- Die Methode ist deutlich zuverlässiger und konvergiert auf kürzeren Zeitskalen als durch Spin-Up-Läufe zum „Einschwingen des Boden“. Letztere kann potentiell zu einem signifikanten systematischen Bias im Bodenzustand führen.
- Die Unsicherheiten in der unteren Randbedingung im Boden sollten stärker berücksichtigt werden, da sie Simulationen merklich beeinflussen können.

Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den im Berichtszeitraum gemachten Erfahrungen innerhalb DEPARTURE (siehe auch VI.8.), dass die SST (Randbedingung über Ozean) aus Baseline-0, die durch Nudging an Reanalysen (also auch ein Spin-up) erzeugt wurde, deutliche Defizite aufweist. Die Baseline-1 SST, die aus Assimilationsläufen hervorgeht, erwies sich hingegen als deutlich verlässlicher. Hier konnte nun gezeigt werden, dass auch für die untere Randbedingung „Boden“ ähnliches gilt und somit ebenfalls beachtet werden sollte.

#### VI.2.5. Zusammenfassung

Die grundsätzliche Machbarkeit der an der GUF geplanten Gesamtziele in DEPARTURE – die optimierte Initialisierung des tiefen Bodens mittels Datenassimilationsmethoden (EnKF) – konnte bestätigt werden.

### VI.3. Anpassung des Bodenmodells TERRA-ML

Dieser Abschnitt beschreibt die Umsetzung einer wesentlichen technischen Voraussetzung der unter I.3. vorstellten Idee zur Initialisierung des tiefen Bodens, auf Basis der unter VI.2 diskutierten Erkenntnisse. Hierzu musste zunächst das verwendete Bodenmodell (auch Soil-Vegetation-Atmosphäre-Transfer-Modell, SVAT) derartig modifiziert werden, dass es auf der DEPARTURE-Region angewendet werden kann.

#### VI.3.1 Verwendung einer Offline-Version

Das in COSMO-CLM integrierte Bodenmodell ist TERRA-ML (Doms et.al. 2011). Die zentralen prognostischen Variablen sind Bodentemperatur- und Feuchte, die durch die numerische Lösung der vertikalen Wärmeleitungsgleichung bzw. Richards-Gleichung erhalten wer-

den. Hinzu kommen Parametrisierungen, um den Einfluss der Vegetation und die Randbedingungen zu berücksichtigen.

Zur Schätzung von Bodenzustand- und Parametern mithilfe von DA kann nicht das volle COSMO-CLM verwendet werden, da eine nicht-assimilierte Atmosphäre über längere Zeiträume nur noch klimatologisch zuverlässig sein kann und somit keinen realistischen Antrieb des Bodenmodells liefern kann. Daher verwenden wir eine vom COSMO-CLM separierte Offline-Version des TERRA-ML. Dieses Modell benötigt atmosphärische Daten (Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Feuchte, Wind) als obere Randbedingung („Forcing“). Hierfür kann man etwa vorhandene Reanalysen (wie ERA) verwenden. Deren Unsicherheit kann bei der Assimilation mit dem EnKF durch Störung der Antriebsdaten berücksichtigt werden. Für Experimente an gut beobachteten Stationen können ebenfalls deren Daten als Forcing verwendet werden. Weiterentwicklungen des Modellcodes und Fehlerausbesserungen wurden innerhalb unserer Arbeitsbetriebe, wie im Folgenden ausgeführt.

### VI.3.2. Gitterpunkt-Modus und neue Randbedingung für Temperatur

Die bisher verfügbare TERRA-ML Version lässt sich auf Gitterpunktebene, z.B. am Gitterpunkt Lindenberg, wo ausreichend atmosphärische Antriebsdaten sowie Bodenmessungen vorhanden sind, bereits anwendbar (Schulz et al. 2015). Es wurde lediglich eine alternative Randbedingung für die Wärmeleitungsgleichung, welche die Bodentemperatur prognostiziert, eingebaut, wie bereits unter VI.2. diskutiert. Diese nimmt an, dass am untersten Rand keine Wärmefluss mehr vorhanden ist. Dies verbessert die vorher verwendete Version, in der ein externer Datensatz nötig war, um die Temperatur in der letzten Bodenschicht zu fixieren. Mit der „no-flux“-Randbedingung hingegen ist dies nicht nötig, und sie ist zudem realistischer, da sie sich an das aktuelle Klima anpassen kann, weswegen diese Formulierung auch in den meisten Klimamodellen Standard ist. Im Projektverlauf wurde diese neue Randbedingung zudem in Sensitivitätsstudien in Afrika getestet und hierbei ein positiver Einfluss auf die Simulationen der Oberflächentemperatur festgestellt, siehe Abb. VI.3.1. Die neue Formulierung reduziert einen Großteil des warmen Biases im Referenzlauf mit der Standardformulierung (in Südafrika, Nordafrika und Saudi-Arabien). Zusätzlich kann dem kalten Bias im Westsahel entgegengewirkt werden. Auf Basis dieser erfolgreichen Sensitivitätsstudie wurde diese Einstellung für alle folgenden Simulationen mit TERRA-ML bzw. COSMO-CLM verwendet.

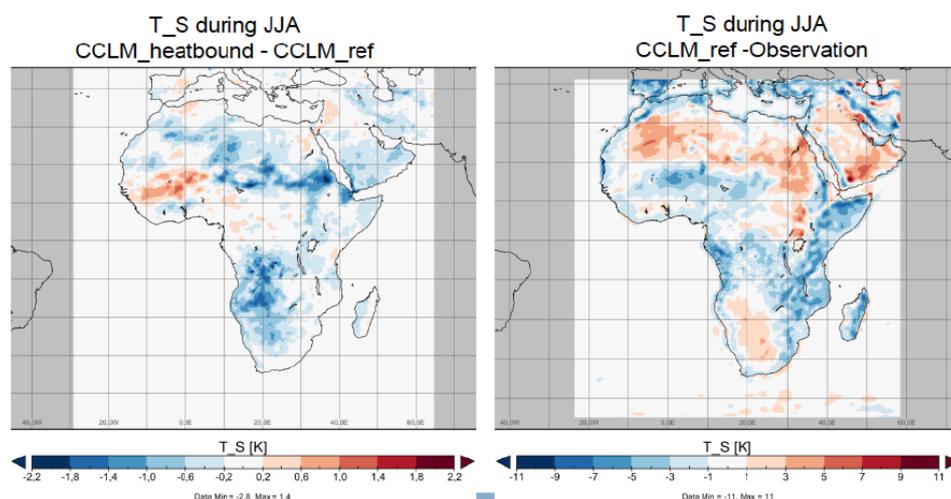


Abb. VI.3.1.: Sensitivität der Bodenoberflächentemperatur ( $T_S$ , Mittelwert in JJA) in einer COSMO-CLM-Simulation für Afrika (2008-2010). Das linke Bild zeigt die Differenz zwischen dem Lauf mit neuer („no-flux“) und alter („fixed“) Formulierung der unteren Randbedingung für Bodentemperatur, während das rechte Bild die Fehler von COSMO-CLM durch Vergleich zur Beobachtung zeigt. In vielen Regionen kann die neue Formulierung somit dem rechts zu sehenden Modellbias entgegenwirken.

### VI.3.3. Adaption von TERRA-ML zur Anwendung auf die DEPARTURE-Region

Da die verfügbare TERRA-ML Version jedoch ursprünglich nur für Tests auf Gitterpunkten oder auf kleinen Regionen entwickelt wurde, waren für die Anwendung in MiKliP waren technische und inhaltliche Änderungen am Quellcode erforderlich:

- Anpassung des Transferschemas: Für die Parameterisierung der Energie- und Feuchteflüsse an der Landoberfläche (Verbindung zur Atmosphäre) in TERRA-ML ist die Berechnung der Transferkoeffizienten nötig. In ersten Tests auf der DEPARTURE-Region zeigte sich, dass TERRA-ML teilweise numerisch instabil lief und insbesondere in der obersten Bodenschicht unphysikalisches Verhalten zeigt (Oszillationen). Die Kopplung an die Atmosphäre ist explizit, in Verbindung mit der dünnen Schicht ist die numerische Stabilität sensitiv gegenüber dem Transferschema, welches jedoch teilweise (insbesondere in Regionen mit hoher Rauigkeitslänge) um mehrere Größenordnungen zu große Transferkoeffizienten errechnete. Daher wurde das komplette Transferschema überarbeitet, indem eine modifizierte Version des in COSMO-CLM enthaltenen Loius-Schemas entwickelt wurde. In anschließenden Tests zeigt die neue Version stabile und physikalisch sinnvolle Simulationsergebnisse, womit TERRA-ML nun für großskalige Anwendungen wie für DEPARTURE einsatzbereit ist.
- Antrieb: Auf großen Regionen wie die DEPARTURE-Region kann hierfür nicht auf Beobachtungen zurückgegriffen werden. Als Alternative wurde der als Antrieb für Landoberflächenmodelle prädestinierte WATCH-WFDEI-Datensatz (Weedon et al. 2014, <http://www.eu-watch.org/>) identifiziert. Dieser liefert global im Zeitraum 1979-2012 bodennahe atmosphärische Variablen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Bodendruck, Niederschlag Regen/Schnee, abwärts gerichtete kurz- und langwellige Strahlung). Die Daten basieren auf der ERA-Interim Reanalyse (Dee et al. 2011) sowie Stationsmessungen und sind in der nötigen räumlichen und zeitlichen Auflösung das beste verfügbare Produkt.
- Zeitliche Interpolation: TERRA-ML benötigt zu jedem Zeitschritt atmosphärische Antriebsdaten, während die WATCH-Daten in 3-stündiger Auflösung verfügbar sind. Für alle acht Antriebsvariablen wurden einfache zeitliche Interpolationen implementiert. Für den Strahlungsantrieb wurde eine energieerhaltende, kontinuierliche lineare Interpolation mithilfe eines Drei-Zeitschritt-Antriebs entwickelt.
- Parallelisierung: Aufgrund der bisherigen Anwendung in kleinem Maßstab war TERRA-ML nur als serieller Code verfügbar. Um die Anwendung auf einer großen Region wie DEPARTURE (mit Zustandsdimensionalität von größer  $10^6$ ) effizient rechnen zu können, wurde eine einfach zu nutzende, auf Gebietszerlegung und der rein vertikalen Modellphysik basierende Parallelisierung eingebaut und validiert.
- Modellphysik: Die Modellphysik wurde in mehreren Punkten anhand der Erfahrungen in Testsimulationen verbessert. Insbesondere wurde die untere Randbedingung der Bodentemperatur auf „kein Fluss“ gesetzt, anstatt einem vordefinierten klimatologischen Wert. In ersten COSMO-CLM-Simulationen wurden hiermit eine Verbesserung der Temperaturvorhersagen erzielt (Schulz et al. 2014).
- NetCDF: Der komplette Input (Antriebsdaten, Anfangsdaten, externe Parameter) sowie der Modelloutput von TERRA-ML wurde auf NetCDF-Routinen umgestellt. Dies ermöglicht verbesserte Effizienz und die Lesbarkeit sowie Kompatibilität zu COSMO-CLM (gleiche Variablennamen), sodass Ausgabefelder direkt in COSMO-CLM verwendet werden können.

Im Anschluss wurde eine Software-Umgebung programmiert und validiert, um, TERRA-ML auf der DEPARTURE-Region zu rechnen. Folgende Schritte werden meist automatisiert durchgeführt (siehe auch Abb. VI.3.2 für ein Flusschema):

1. Eingabe von räumlichen Daten (Gitter) und Zeitraum der Simulation.
2. Präprozessierung der WATCH-Antriebsdaten (räumliche Interpolation, korrektes Dateiformat)
3. Präpierung von Anfangsbedingungen und externen Parametern für TERRA-ML.
4. Durchführung der TERRA-ML Simulation mit Parallelisierung.
5. Postprozessierung der Output-Daten.

Die Umgebung wurde allgemein programmiert und ist für eine beliebige Region nutzbar, sie besitzt damit eine potentielle Anwendbarkeit über MiKlip hinaus.

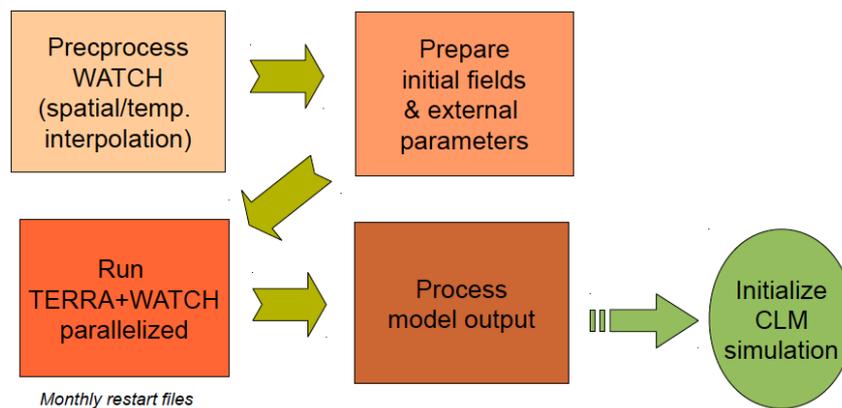


Abb. VI.3.2: Automatisierte Arbeitsschritte zur Rechnung von TERRA-ML auf der DEPARTURE-Region, als Voraussetzung für Assimilationsläufe.

#### VI.3.4. Zusammenfassung

Es waren somit umfangreiche Änderung sowohl technischer als auch modellphysikalischer Art an dem ursprünglichen TERRA-ML-Quellcode erforderlich, um das Modell auf großen Gebieten wie der DEPARTURE-Region anwenden zu können. Diese wurden Anfang 2014 durch finale Tests validiert. Es wurde festgestellt, dass das neue Transferschema physikalisch konsistente Resultate gewährleistet. Die neuen NetCDF-I/O-Routinen sowie die Parallelisierung erlauben eine vergleichsweise zügige Simulation langer Zeiträume trotz des großen Modellgebiets.

### VI.4. Assimilationsexperimente mit TERRA-ML auf Gitterpunktsebene

#### VI.4.1. Datenassimilation mit TERRA-ML

Die Entwicklung und der Betrieb eines Landoberflächen-Assimilationssystems (z.B. Kumar et.al. 2008) stellt eine besondere wissenschaftliche und technische Herausforderung dar und nahm einen wesentlichen Teil im Rahmen von M9 ein. Daher wurde die Umsetzung in zwei Arbeitsschritte mit steigender technischer und wissenschaftlicher Komplexität aufgeteilt.

#### Gitterpunkt-Modus

Die offline-Version von TERRA-ML ist ursprünglich zur Verifikation von Wettervorhersagen an Stationen mit hoher Dichte an Beobachtungsdaten entwickelt worden („Gitterpunkt-Modus“). Zum Erzielen von wissenschaftlichen Erkenntnissen hinsichtlich der oben definierten Ziele bietet sich somit die Möglichkeit, das zukünftige Datenassimilationssystem entsprechend intensiv zu testen und zu kalibrieren.

Hierzu wurden zunächst die nötigen technischen Arbeiten mit PDAF (s.u.) durchgeführt, um mit TERRA-ML im Gitterpunkt-Modus Assimilations-Läufe zu ermöglichen. Dieses System

war erstmals Anfang 2013 technisch einsatzbereit und ermöglichte die unten vorgestellten Experimente geplant. Hierbei wird insbesondere auch im Hinblick auf kommende Simulationen für DEPARTURE Rücksicht genommen (Wahl der Bodenparameter, Beobachtungsunsicherheiten, Antriebsunsicherheiten).

#### Fläche

Eine Datenassimilation mit TERRA-ML für ein gesamtes Modellgebiet ist technisch deutlich aufwendiger (Abb. VI.4.1). Hier für DS2 der Einbau des Modells in das Parallel Data Assimilation Framework (PDAF, Neger and Hiller 2013, <http://pdaf.awi.de/>) des AWI Bremerhaven geplant. Hierbei handelt es sich um eine Fortran-Umgebung für sequentielle Datenassimilations-Methoden, welches die modulare Trennung von Vorhersage- und Analyseschritten ausnutzt und in der bereits verschiedene Ensemble-basierte Algorithmen (EnKF, LETKF) auf effiziente Weise (hinsichtlich paralleler Berechnung) integriert sind.

#### VI.4.2. Assimilation von Satelliten-Retrievals von Bodentemperatur und -feuchte

Wie unter Teil I. aufgezeigt, bestand die Aufgabe der GUF u.a. im Aufbau des Assimilationsystems mit einem Ensemble Kalman Filter. Es besteht aus einer Iteration von Vorhersagen (Ensemble-Integration) sowie Analysen (Assimilation der Beobachtung zum aktuellen Zeitpunkt). Hierzu wurde TERRA-ML mit dem Parallel Data Assimilation Framework (PDAF) verbunden, eine Software zur effizienten und parallelisierten Umsetzung des Analyseschrittes. Als Filter wurde der Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF), zurzeit state-of-the-art, gewählt (Sun et al. 2009). Zunächst wurde eine experimentelle Testumgebung am Gitterpunkt Lindenberg erstellt. Die Auswertung von Datenassimilations-Experimenten mit synthetischen Beobachtungen der obersten Bodenschicht ergaben folgende Implikationen:

- Prinzipiell ist es möglich, durch Filtertechniken die Information von Beobachtungen der oberen Schichten in den tiefen Boden zu transferieren, um dort eine Konvergenz zur Wahrheit zu erreichen. Bei 1-2 Beobachtungen pro Tag kann dies bereits auf einer Skala von Monaten erreicht werden, während die Spin-Up-Technik mehrere Jahren an Simulationszeit erfordert.
- Der Erfolg erfordert jedoch im COSMO-CLM-Standard-Setup (bis 15m Tiefe) vergleichsweise hochwertige Beobachtungen (z.B. Temperaturfehler  $< 0.1K$ ), die in Realität nicht zu erwarten sind. Bei höherem, eher typischen Beobachtungsfehlern (bis  $1K$  für Temperatur) ist keine Konvergenz mehr zu beobachten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die jährliche Amplitude im tieferen Boden wesentlich kleiner als der Beobachtungsfehler ist, sodass die Beobachtung dann keine zusätzliche Information mehr liefern kann. Eine Lösung hierzu stellt die Reduzierung der Simulationstiefe dar: Abb. VI.4.2 illustriert die Konvergenz für beide Zielvariablen und zeigt den Vorteil des ETKF gegenüber Spinup hinsichtlich der Zeitskalen bis zur Konvergenz.

Diese Resultate lassen den Schluss zu, dass die Datenassimilationsmethodik mit EnKF als Vorteil aufweist, dass sie innerhalb eines Jahres zur Konvergenz der Schätzungen führen können. Die Spin-Up-Methode kann hingegen mehrere Jahre, ist aber rechentechnisch ähnlich effizient, da sie kein Ensemble benötigt. Sie ist somit ebenfalls eine valide Methode zur Bodeninitialisierung, bietet aber keine ausreichende Diagnostik und auch nicht die Möglichkeit der Parameterschätzung.

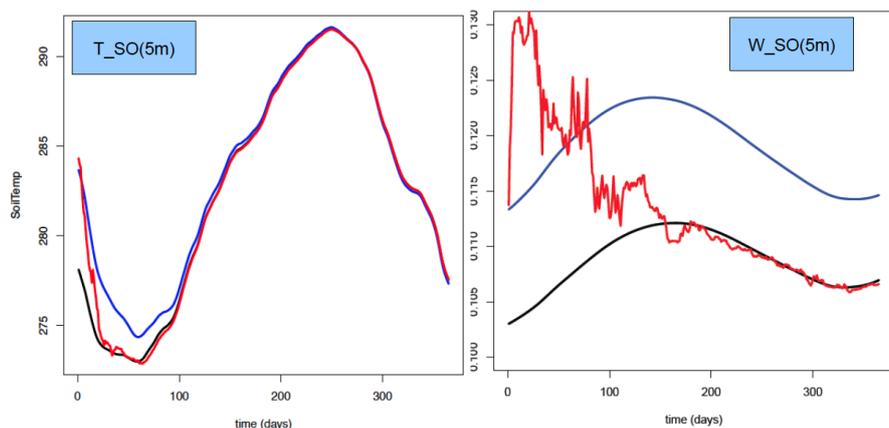


Abb. VI.4.2: Vergleich von ETKF-Analyse (rot) mit oberflächennahen Beobachtungen (1x / Tag) und Spin-Up (blau) mit der Wahrheit (schwarz) in der tiefsten Schicht. Die Konvergenz zur Wahrheit kann mit dem Filter deutlich schneller erreicht werden.

### VI.4.3 Parameterschätzung

Die in VI.4.2. beschriebene Technik dient originär der Zustandsschätzung, d.h., der Bestimmung der dynamischen Variablen Bodentemperatur und -feuchte. Mithilfe des LETKF lassen sich prinzipiell zusätzlich nicht-dynamische Modellparameter schätzen. Da viele der in TERRA-ML benötigten Parameter eine hohe Unsicherheit aufweisen, bietet sich folglich ein Potential zur weiteren Optimierung der Simulationen. Als Zielparameter wurde die Wurzeltiefe (ROOTDP) gewählt, da sie – insbesondere in afrikanischen Tropen und Subtropen – maßgeblich die Verdunstung der Bodenfeuchte auch aus größeren Tiefen bestimmt (Hupet et al. 2003, Schelle et al. 2013). Hierzu wurde im Berichtszeitraum zunächst die prinzipielle Machbarkeit innerhalb des Datenassimilationsexperiments am Gitterpunkt Lindenberg getestet (siehe VI.4.2). Die entsprechenden technischen Veränderungen am TERRA-PDAF-System für die Parameterschätzung wurden durchgeführt und getestet. Hierbei zeigte sich, dass der LETKF (trotz einer Normalverteilungsannahme, die für bgegrenzte Parameter nicht vollständig gültig sein kann) grundsätzlich in der Lage ist, innerhalb eines Jahres anhand der Beobachtungen eine Konvergenz des Parameters zur Modellwahrheit zu erreichen. Dies ist in Abb. VI.4.3 anhand der zeitlichen Entwicklung der besten Schätzung demonstriert. Die Ensemblevarianz (rechts im Bild) kann hierbei verwendet werden, um eine Konvergenz der Schätzung zu diagnostizieren.

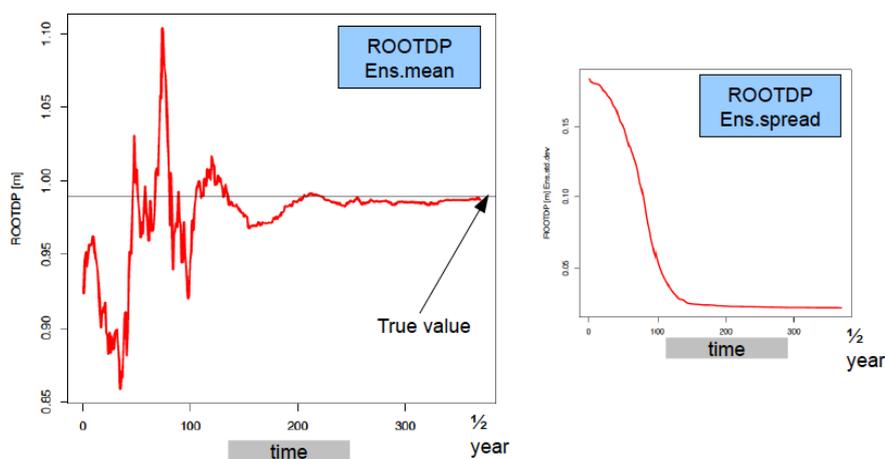


Abb. VI.4.3: Experiment zur Parameterschätzung für die Wurzeltiefe im idealisierten Fall mit simulierten Oberflächenbeobachtungen in Lindenberg (2x täglich). Das LETKF-Parameterensemble konvergiert innerhalb weniger Monate zum wahren Wert, was durch den verschwindenden Ensemblespread bestätigt wird.

#### VI.4.4. Zusammenfassung

Die beiden geplanten Assimilationssysteme (TERRA+WATCH und TERRA+PDAF) konnten als Prototyp auf Gitterpunktebene realisiert werden. Es konnte demonstriert werden, dass der tiefe Boden durch atmosphärischen Antrieb als auch Satellitenbeobachtungen der obersten Schicht grundsätzlich geschätzt werden kann. Diese technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse stellen die Voraussetzung für die anschließende Generalisierung auf die DEPARTURE-Region dar.

#### VI.5. Assimilationssysteme zur Initialisierung der Landoberfläche mit COSMO-CCLM

Der zentrale Beitrag der GUF besteht in der Bereitstellung von mit Beobachtungen optimierter Bodentemperatur- und feuchtefelder zur Initialisierung von CCLM-Simulationen, da hierdurch aus physikalischer Sicht ein positiver Einfluss auf die dekadische Vorhersagbarkeit erwartet werden kann. Aufgrund des Fokusses auf die Landoberfläche wird hierfür eine „offline“-Version des in COSMO-CLM enthaltenen Bodenmodells TERRA-ML verwendet (Schulz et al. 2015), welches durch atmosphärische Felder angetrieben wird. Dies gewährleistet eine hohe modellinterne Konsistenz der erzeugten Felder mit COSMO-CLM. Im folgenden bezieht sich daher die Bezeichnung TERRA-ML stets auf dieses externalisierte Modell.

##### VI.5.1. Landoberflächen-Reanalyse durch Assimilation von WATCH-Antriebsdaten

Zwar kann die Assimilation von oberflächennahen Bodentemperatur oder -feuchte prinzipiell zu einer Verbesserung der Zustandsschätzung im tiefen Boden führen, wie aufgezeigt allerdings unter restriktiven Bedingungen an Datenqualität und -verfügbarkeit. Um im Rahmen des DEPARTURE-Projekts jedoch bereits in DS2 Anfangsbedingungen für COSMO-CLM Simulationen nutzen zu können, wurde an der GUF ein alternativer Ansatz zur Generierung der Anfangsfelder entwickelt und implementiert, bei dem ebenfalls Beobachtungsdaten in das SVAT-Modul TERRA-ML assimiliert werden. Es handelt sich hierbei um „Measurement-Driven Moisture Analysis“ (MSMA, Mitchell et al. 2004), bei der das Landoberflächenmodell über einen ausreichend langen Zeitraum mit atmosphärischen Beobachtungsdaten angetrieben wird, sodass auch der tiefe Boden zu einem realistischen Zustand konvergiert („Spin-up“). Diese Methode kann in der unter VI.3. beschriebenen TERRA-Umgebung umgesetzt werden, da bereits die WATCH-WFDEI-Daten als Antrieb bereitgestellt wurden. Zwar entsprechen die WATCH-Daten nicht direkt einer Beobachtung, jedoch sind auf einer so großen Region über einen mehrjährigen Zeitraum keine durchgängigen Beobachtungen auf jedem Gitterpunkt geben kann, sodass ein Rückgriff auf Reanalysen unvermeidbar ist. Zudem sind im WATCH Datensatz weitere Beobachtungstypen als in der ERA-Interim-Reanalyse einbezogen.

Da im Gegensatz zu den Filter-Techniken kein Ensemble notwendig ist, kann auch eine längere Periode in relativ kurzer Zeit gerechnet werden. Beispielsweise benötigen 30 Jahre Simulation mithilfe der oben beschriebenen Parallelisierung etwa 1 Woche. Ein weiterer Vorteil ist neben der vergleichsweise einfachen technischen Durchführung die direkte Verfügbarkeit unabhängig von Satelliteninformationen, was somit die zügige Erzeugung von Anfangsbedingungen für COSMO-CLM ermöglicht.

Unsere Methode ähnelt dem Verfahren zur Erzeugung der ERA-Interim/Land-Reanalyse (Balsamo et al. 2015), mit dem Unterschied, dass wir eine regionalisierte Landoberflächen-Reanalyse durchführen und mit TERRA-GUF ein anderes Bodenmodell verwenden. Diese Reanalyse entspricht somit einem pragmatischen, effizienten und einfach durchführbaren Ansatz, um konsistente Bodentemperatur- und feuchte zu erhalten, die anschließend innerhalb von DEPARTURE weiterverwendet werden können.

Die WATCH-Daten müssen durch entsprechende räumliche und zeitliche Interpolation zum Antrieb von TERRA-GUF aufbereitet werden, zudem müssen unter anderem geeignete Anfangsfelder und externe Parameter präpariert werden. Hierfür wurde eine entsprechende Software-Umgebung fertiggestellt, die alle nötigen Arbeitsschritte zur Erzeugung der Reanalyse nach Eingabe der Schlüsselparameter weitestgehend automatisiert durchführt. Mithilfe dieses im Berichtszeitraum fertig gestellten Tools wurde die TERRA-GUF-Reanalyse für die DEPARTURE-Region von 1979-2010 (Zeitraum der WATCH-Daten) erstellt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Modellkonfiguration und die externen Parameter mit der Konfiguration von COSMO-CLM in DEPARTURE konsistent sind. Aus dieser können anschließend entsprechende Instantanfelder zur Initialisierung von dekadischen COSMO-CLM-Hindcasts extrahiert (siehe VI.6.).

#### VI.5.2. Assimilation von Satelliten-Retrievals

Mit der unter VI.5.1. beschriebenen Methode wird der Bodenzustand indirekt durch den Einfluss des Antriebs geschätzt. Ein komplexerer Ansatz besteht in der direkten Assimilation von den Boden betreffenden Beobachtungen mittels ensemble-basierten Kalman Filter-Methoden (Evensen 1995, Sun et al. 2009). Die Bodenfeuchte an der Erdoberfläche kann durch Satelliten-Retrievals geschätzt werden. Die CCI-Bodenfeuchte (<http://www.esa-soilmoisture-cci.org/>) stellt einen Datensatz für 1979-2010 dar, der die Messungen von vier passiven und zwei aktiven Mikrowellensensoren kombiniert (Dorigo et al. 2014). Dies erhöht nicht nur die räumliche und zeitliche Abdeckung der Daten, sondern auch die Verlässlichkeit der Retrievals, da eine geschätzte Varianz der Feuchtwerte mitgeliefert wird. Somit stellt das Produkt einen dem Stand der Wissenschaften angepassten und für die Assimilation innerhalb von MiKlip geeigneten Beobachtungsdatensatz dar. Abb. VI.5.1 zeigt als Beispiel die physikalisch plausiblen Satellitenretrievals für einen Tag im Jahr 2000.

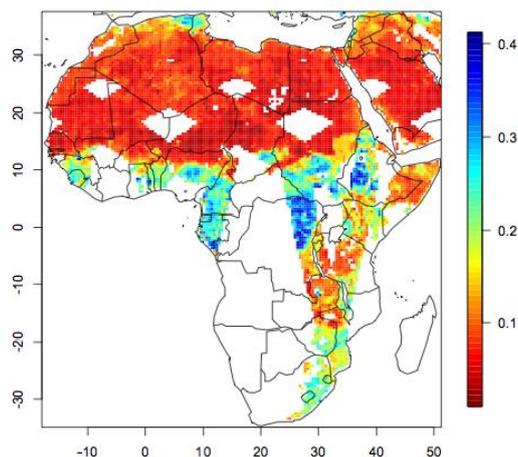


Abb. VI.5.1: Beispiel von Satelliten-Beobachtungen der oberflächennahen Bodenfeuchte (relativer Anteil als volumetrischer Wassergehalt) am Tag 168 im Jahr 2000.

Zur effizienten technischen Realisierung wurde ein Softwaresystem aufgebaut, welches TERRA-GUF mit dem Parallel Data Assimilation Framework (PDAF, Nerger and Hiller 2013) koppelt. Zur Assimilation wird der Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF, Hunt et al. 2007) verwendet. Die unter VI.4. beschriebene Testumgebung für einen Gitterpunkt wurde in 2014 derartig erweitert, dass nun für die gesamte DEPARTURE-Region eine Kombination von TERRA-GUF mit den realen CCI-Beobachtungen durchgeführt werden kann. Hierzu musste insbesondere eine Lokalisierung der Analyse implementiert werden, sodass für den Update der Bodenfeuchte und -temperatur eines Gitterpunktes aufgrund der nur lokalen Gültigkeit der Satellitenpixel lediglich nahe liegende Beobachtungen (im Bereich von 2 Gitterpunkten oder  $0.88^\circ$ ) berücksichtigt werden. Zudem ermöglicht die Lokalisierung die

Berechnung der Analyse mit geringer Ensemblegröße trotz der sehr hohen Zustandsdimension. Die technische Herausforderung besteht hierbei neben der Lokalisierung der Analysen in der aufgrund von Speicherplatz und Rechenzeit erforderlichen parallelisierten Umsetzung. Gemeinsam mit DecReg und PASTLAND wurden Datensätze mit Satelliten-Retrievals von oberflächennaher Bodentemperatur und -feuchte bereitgestellt (siehe oben). Zunächst wurden die Satellitendaten durch Gitterpunktexperimente an zwei Stationen in Europa getestet. Hierbei zeigte sich, dass die Bodenfeuchtebeobachtungen trotz relativ großer Unsicherheit einen Einfluss auf die simulierte Bodenfeuchte auch in tieferen Schichten haben. Zusätzlich wurden Satelliten-Retrievals der Landoberflächentemperatur getestet, diese führten jedoch aufgrund zu großer Beobachtungsfehler zu unphysikalischen Zuständen und werden daher vorerst nicht weiter berücksichtigt. Zudem ist die Bodenfeuchte hinsichtlich dekadischer Vorhersagbarkeit die relevantere Zielvariable (Bellucci et al. 2015), und sie beeinflusst zudem indirekt durch Korrelationen auch die Bodentemperatur, etwa über den feuchteabhängigen Wärmeleitkoeffizienten (Schulz et al. 2015).

Um die in DEPARTURE betrachtete dekadische Zeitscheibe 2001-2010 initialisieren zu können, wurde die Assimilation täglich über das gesamte Jahr 2000 durchgeführt. Das dafür nötige initiale Ensemble aus 40 Mitgliedern wurde durch Extrahieren von Zuständen aus der TERRA-GUF-Reanalyse zwischen 1991-2000 erzeugt, was ein physikalisch und statistisch konsistentes Ensemble mit realistischer Kovarianzstruktur ergibt (Parrens et al. 2014). Die Resultate des Assimilationslaufs wurden auf physikalische Konsistenz geprüft, was zunächst zu Anpassungen der Tuningparameter und wiederholten Experimenten führt. Abschließend konnte eine funktionierende Filterkonfiguration ermittelt werden. Das resultierende Ensemblemittel zum Ende der Assimilationsperiode, d.h. am 01.01.2001 (00 UTC), stellt schlussendlich die mit CCI-Beobachtungen optimierte Bodenansfangsbedingung für die Dekade 2001-2010 dar, die anschließend für die Ensembleläufe in DEPARTURE weiterverwendet wurde (siehe VI.6.).

Abb. VI.5.2 gibt einen abschließenden Gesamtüberblick zu den in VI.5.1 und VI.5.2 beschriebenen Assimilationssystemen, welche in 2014 fertig gestellt wurden:

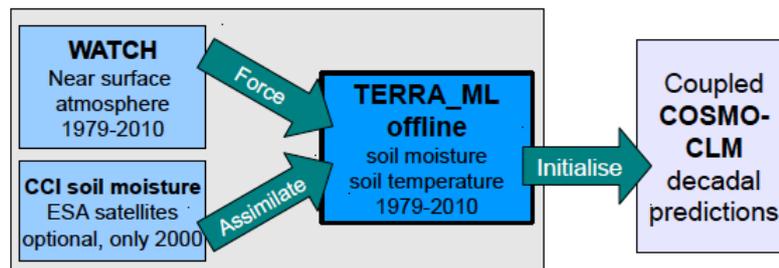


Abb. VI.5.2: Zusammenfassung des Assimilationssystems (graue Box) zur Erzeugung von Bodenfeldern (Reanalyse) zur Initialisierung dekadischer COSMO-CLM-Simulationen. Es verwendet die WATCH-Antriebsdaten sowie optional (im Jahr 2000) die CCI-Bodenfeuchte-Retrievals.

### VI.5.3. Ergänzende Parameterschätzung

Aufgrund der positiven Resultate bezüglich zusätzlicher Parameterschätzung in den Gitterpunktexperimenten (siehe VI.4.3.) wurde diese Parameterschätzung auch im Rahmen des oben beschriebenen Assimilationslaufs implementiert und durchgeführt. Die Analyse der Resultate zeigte jedoch, dass die Wurzeltiefer-Felder teilweise unphysikalische Werte aufwiesen (z.B. negativ wurden). Im Vergleich zu den o.g. Zwillingsexperimenten lässt dies den Rückschluss zu, dass die Ursache in einem systematischen Modellfehler (Bias) von TERRA-ML begründet liegt. Die zusätzliche Parameterschätzung wirkt somit hinsichtlich einer Fehlerkompensation der Feuchteflüsse durch ein Anpassen der Wurzeltiefe, welche als quasi-freier Tuningparameter wirkt. Das hat einen positiven Einfluss auf die ermittelte Bodentem-

peratur und -feuchte, macht aber auch die resultierende ROOTDP-Felder unbrauchbar, weshalb diese für die COSMO-CLM-Simulationen nicht weiter verwendet werden. Ähnliche Erfahrungen sind aus Experimenten zur Parameterschätzungen in PASTLAND (Modul A) bekannt, wie auf dem Statusseminar im Februar 2015 gezeigt wurde.

#### VI.5.4. Zusammenfassung

Die beiden geplanten Assimilationssysteme (TERRA+WATCH und TERRA+PDAF) für die DEPARTURE-Region realisiert werden. Damit ist die technische Voraussetzung zur Erzeugung optimierter Bodenanzfangsbedingungen erfolgreich abgeschlossen worden.

### VI.6. Dekadische Hindcasts mit optimierten Bodenanzfangsbedingungen

#### VI.6.1. Generierung von optimierten Anfangsbedingungen

Nach der Implementierung der unter VI.5.1 beschriebenen technischen Umgebung für mit WATCH angetriebenes TERRA-ML haben wir eine transiente Simulation von 1979 bis 2010 für die DEPARTURE-Region aufgesetzt und durchgeführt. Als Anfangszustand im Jahr 1979 wurden die Instantanfelder eines 40-jährigen COSMO-CLM-Laufs mit ERA-40-Randbedingungen extrahiert. Da innerhalb des DEPARTURE-Projekts die dekadische Zeitscheibe 2001-2010 eine bereits mehrfach simulierte Hindcast-Periode darstellt, wurden die Bodenfelder der TERRA-ML offline Simulation zum 01.01.2001, 0 Uhr, extrahiert, welche anschließend als Anfangsbedingungen für eine dekadische DEPARTURE-Simulation mit COSMO-CLM genutzt werden können.

Zusätzlich wurde mit der unter VI.5.2. beschriebenen Datenassimilationsumgebung mit Ensemble Kalman Filter der dort beschriebene Lauf für das Jahr 2000 durchgeführt und zusätzlich CCI-Bodenfeuchtedaten assimiliert, was ebenfalls in Instantanfeldern 01.01.2001, 0 Uhr, und damit den Anfangsbedingungen für die Dekade 2001-2010, resultiert.

#### VI.6.2. Analyse der neu erzeugten Anfangsbedingungen

Figur VI.6.1 zeigt den Unterschied zu den Standard-Anfangsbedingungen bei der Bodenfeuchte im tiefen Boden, der teilweise mehrere Meter Wassersäule beträgt, was sehr hohe Werten entspricht (vor allem in Relation zur Schichtdicke von 8m, von denen der Großteil für Wasser unzugänglich ist), der ein entsprechendes Langzeitgedächtnis und damit prediktiven Skill für dekadische Simulationen aufweisen könnte. An einem Beispiel in der Sahel-Zone zeigt die Entwicklung der Bodenfeuchte die Konvergenz aufgrund der Assimilation der atmosphärischen Daten, sowie den klaren Bias der Standard-Anfangsbedingungen (rote Linie).

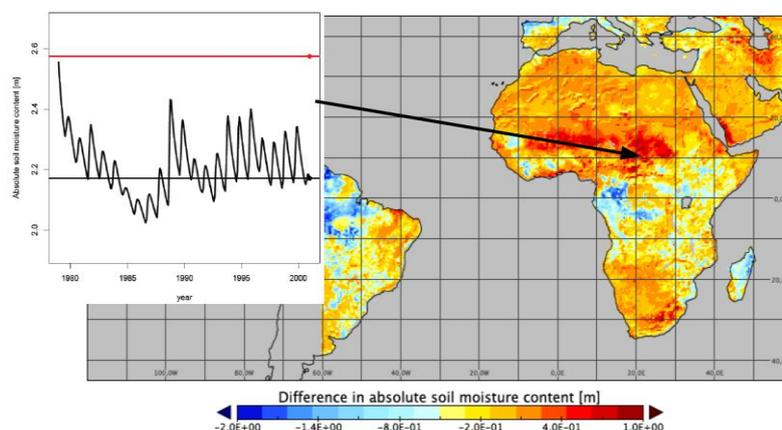


Abb. VI.6.1: Unterschied der Bodenfeuchte [m H<sub>2</sub>O] im tiefen Boden (7.66–15.34m) zwischen dem Resultat einer beobachtungsgesteuerten Assimilation von 1979-2001 und den Standard-Anfangsbedingungen am 01.01.2001. Der Graph links zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Bodenfeuchte 1979-2001 der Analyse im Sahel.

Bei den bisherigen DEPARTURE-Simulationen hat sich bei allen verwendeten Regionalmodellen in den Hindcast-Simulationen mit Baseline 0 bzw. 1, bzw. mit eigenem gekoppelten regionalem Ozeanmodell, herausgestellt, dass die Qualität der Meeresoberflächentemperatur (SST) einen großen Einfluss auf die Vorhersagefehler dekadischer Simulationen hat. Die SST stellt die untere Randbedingung über Meeresflächen dar, während diese über Landflächen durch die Kopplung mit dem Landoberflächenmodell errechnet wird. Für die Landfläche wird eine ähnlich wichtige Bedeutung der unteren Randbedingung erwartet, sodass sich eine Optimierung der Initialwerte von Bodentemperatur und -feuchte positiv auswirken sollte, insbesondere aufgrund der hier gezeigten deutlichen Unterschiede.

### VI.6.3. Dekadische Simulationen mit neuen Anfangsbedingungen

Wie unter VI.6.1 beschrieben, wurden zwei Ansätze realisiert, mit denen durch Beobachtungen optimierte Bodentemperatur und -feuchtefelder für COSMO-CLM erzeugt wurden, im folgenden als (1) TW (=TERRA+WATCH) und (2) TW\_DA (=TERRA+WATCH+CCI) gekennzeichnet werden. Die verbleibende Aufgabe besteht darin, die Auswirkung der verbesserten Anfangsbedingungen auf die dekadische Vorhersagbarkeit zu evaluieren. Dazu wurde das DEPARTURE-Standard-Setup für COSMO-CLM verwendet und lediglich die Anfangsbedingungen für den Boden durch die neuen Feldern ersetzt. Die folgende Tabelle zeigt das in 2014 erzeugte, umfassende Hindcast-Ensemble zur Auswertung der neuen Initialisierung. Es wurden jeweils die drei innerhalb von DEPARTURE verwendeten MPI-Realisierungen genutzt.

*Tab. VI.6.3: Übersicht zu den zusätzlich (zu den Standard-Ensemble-Läufen) durchgeführten dekadischen COSMO-CLM-Simulationen, um die Auswirkung der optimierten Bodeninitialisierung zu untersuchen.*

Dekade	Bodeninitialisierung (Methodik)	MPI-ESM-LR (Realisierung)	Status (August 2015)
2001- 2010	TW (TERRA-WATCH - regional reanalysis)	4	Fertig, CMORized
		5	Fertig, CMORized
		8	Fertig, CMORized
2001- 2010	TW_DA (TERRA-WATCH + daily CCI soil moisture retrievals)	5	Fertig, CMORized
1991- 2000	TW (TERRA-WATCH- Reanalyse)	3	Fertig, CMORized
		4	Fertig, CMORized
		9	Fertig, CMORized
2001- 2010	CCLM+ERA spinup (standard)  MPI-ESM  ERA-Interim	4	Fertig, CMORized
		4	Fertig, CMORized
		4	Fertig, CMORized

Die letzten drei Simulationen stellen zusätzliche Referenzen dar (Kothe et al. 2015), in denen zum einen der Standardlauf (mit Standard-Bodeninitialisierung) wiederholt wurde sowie zum anderen die Bodenfelder aus MPI-ESM bzw ERA-Interim direkt nach Interpolation wurden.

#### VI.6.4. Auswertung hinsichtlicher dekadischer Vorhersagbarkeit

Die koordinierte Auswertung in DEPARTURE ist auf die Zielvariablen Temperatur und Niederschlag in den Regionen Guinea Coast (GC), Central Sahel (CS) und West Sahel (WS) fokussiert, wo jeweils Feldmittel betrachtet werden. Hierzu wurde der Modelloutput entsprechend prozessiert. Zur Evaluation wird zum einen der Mean Square Error Skill Score (MSSS, Goddard et al. 2013) verwendet, der auf Basis der Anomalien berechnet wird, um Bias und Vorhersagbarkeit zu trennen. Weiterhin wird in DEPARTURE die Korrelation verwendet. Diese ist, im Gegensatz zum MSSS, unabhängig von der Varianz und eignet sich damit besser, um die reine Vorhersagbarkeit zu bewerten, da sie lediglich die Phasenbeziehung zwischen Modell und Beobachtung betrachtet. Beispielsweise neigen Regionalmodelle zur Überschätzung der Niederschlags-variabilität, wodurch der MSSS deutlich schlechter werden kann, auch wenn die Korrelationen besser ist als beispielsweise im Globalmodell (Paeth et al. 2015). Als Beobachtung wird der in DEPARTURE vereinbarte Wilmott-Matsura-Datensatz (monatliche Temperatur- und Niederschlagsfelder) verwendet. Die folgenden beiden Figuren zeigen den MSSS für die Anomalien der mit TERRA-WATCH initialisierten COSMO-CLM-Simulation in Referenz zum Standardsetup für die Jahre 1-5 (Abb. VI.6.3) sowie die volle Dekade (Abb. VI.6.4). Ein positiver Skill zeigt hier eine Verbesserung der Vorhersagbarkeit gegenüber der Referenzsimulation auf. In den ersten fünf Jahren ist diese nahezu für alle Regionen und beide Variablen erkennbar (außer für die Temperatur in CS), aber auch über die gesamte Dekade kann die Vorhersagbarkeit teils deutlich verbessert werden. Ausnahme bei Niederschlag stellt hier jedoch der Westsahel dar.

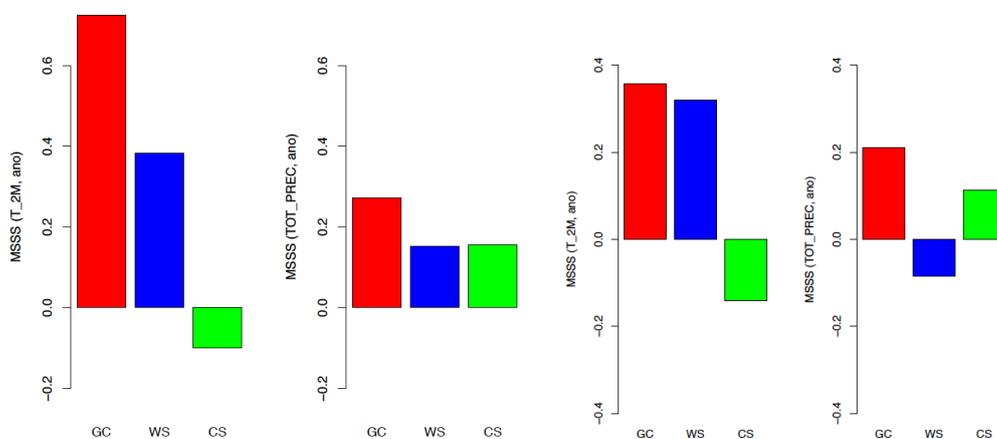


Abb. VI.6.3: Verbesserung der jährlichen 2M-Temperatur bzw. des Niederschlags durch die neue Bodeninitialisierung im Vergleich zum Standardsetup für die ersten fünf Jahre der Dekade 2001-2010, gemessen am relativen MSSS.

Abb. VI.6.4: Verbesserung der jährlichen 2M-Temperatur bzw. des Niederschlags durch die neue Bodeninitialisierung im Vergleich zum Standardsetup für die gesamte Dekade 2001-2010, gemessen am relativen MSSS.

Abb. VI.6.5 gibt eine detailliertere Auswertung durch Betrachtung des Monsunniederschlags in allen möglichen subdekadischen Perioden von mindestens drei Jahren Länge wieder. Betrachtet werden sowohl Ensemblemittel als auch Einzelsimulationen. Diese Auswertung wird zentral an der Uni Würzburg durchgeführt, um maximale Vergleichbarkeit innerhalb des Projekts zu garantieren. Für jede dieser Perioden wird die Korrelation mit der Beobachtung visualisiert, um die Vorhersagbarkeit unabhängig von Bias in Mittelwert und Varianz zu ermitteln. Gezeigt werden jeweils die Korrelationen für alle drei Regionen von COSMO-CLM-Standardlauf und dem experimentellen Lauf. Der Vorteil in dieser Betrachtung liegt insbesondere in der höheren Aussagekraft durch Betrachtung vieler Subperioden einer Dekade. Wie Abb. VI.6.5 zeigt, ergeben die mit optimierten Bodenansfangsbedingungen initialisierten Läufe tendenziell „röttere“ Dreiecke, d.h., sie erzielen - auf Basis der

verfügbaren Daten - öfter größere (bessere) Korrelationen mit der Beobachtung in diesem Zeitraum sowie in allen drei Auswerteregionen (WS, CS, GC).

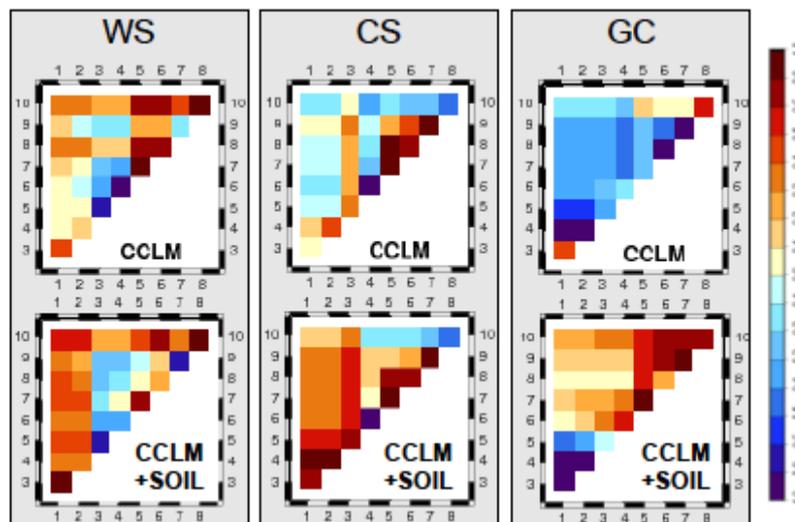


Abb. VI.6.5: Korrelationen zwischen beobachtetem und simuliertem JJAS-Niederschlag in allen Subperioden (X-Achse=Startjahr, Y-Achse=Endjahr) der Dekade 2001-2010. Die obere Reihe zeigt die Ergebnisse für die Standard-COSMO-CLM-Simulationen, während die untere Reihe sich auf die experimentellen Läufe mit neuer Bodeninitialisierung beziehen.

Abschließend zeigt Abb. VI.6.6 die Korrelation zwischen beobachtetem und simuliertem Monsunniederschlag im Sahel für die gesamte Dekade 2001-2010 für die verschiedenen innerhalb von DEPARTURE getesteten Rand- und Anfangsbedingungen. Diese können hier stets die Standard-COSMO-CLM-Simulation verbessern. Hierbei spielt insbesondere die neuen Bodenanfangsbedingungen eine große Rolle. Sie ist im CS sogar als einzige in der Lage, eine positive Korrelation mit der Beobachtung zu erzielen.

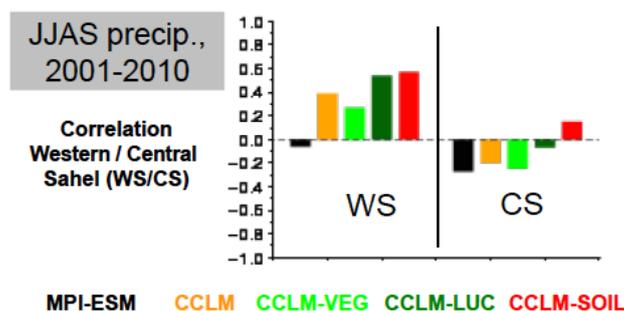


Abb. VI.6.6: Korrelationen zwischen beobachtetem Monsunniederschlag und Hindcasts mit verschiedenen Rand- und Anfangsbedingung: MPI-ESM (globales Modell), CCLM (Standard COSMO-CLM), CCLM-VEG (mit Veg3d statt TERRA-ML), CCLM-LUC (mit veränderter Landnutzung) und CCLM-SOIL (mit neuen Bodenanfängsfeldern).

Im Grundsatz zeigt die Auswertung somit bisher, dass die Bodeninitialisierung prinzipiell, gemäß der physikalischen Erwartung, einen leicht positiven Einfluss erzielen kann. Jedoch ist die relative hohe Unsicherheit der Beobachtungsdaten sowie des Bodenmodells, in Zusatz zu den Modellfehlern in COSMO-CLM, zu beachten, die im Allgemeinen zu einer diversifizierten Performance der Regionalmodelle in der DEPARTURE-Region in den verschiedenen Hindcast-Dekaden führt (Paeth et al. 2015). Dies mildert jedoch nicht die Aussage, dass die zweifelsfrei sinnvolle Optimierung der Initialisierung des Bodens weiter verfolgt werden sollte (Bellucci et al. 2015). Ein gemeinsame Auswertung mit den Ergebnissen des ähnlichen Ansatzes in DecReg konnte die Aussagekraft durch die

Betrachtung zweier verschiedener Regionen der Erde erhöhen und die tendenziellen Aussagen bestätigen (Kothe et al. 2015).

#### VI.6.5. Zusammenfassung

Die mit den Assimilationssystemen TERRA+WATCH bzw. TERRA+PDAF erzeugten Bodenanfängsfelder wurden zur Initialisierung von dekadischen COSMO-CLM-Simulationen verwendet. Sie weisen teils deutliche Unterschiede zu den standardmäßig in DEPARTURE verwendeten Anfängsfelder auf, was somit ein gutes Potential für zusätzliche Vorhersagbarkeit bietet. Dies konnte bei der Auswertung der Simulationen auch tendenziell bestätigt werden, auch wenn sich noch größere Unsicherheiten aufgrund der Modellfehler zeigten.

#### VI.7. Zusatzergebnis: Nonlinear Ensemble Transform Filter (NETF)

Dieser Abschnitt beschreibt eine innerhalb der Tätigkeit für DEPARTURE hervorgegangene Arbeit und Resultate, die über den Antrag hinausreichen und zudem eine vielversprechende Anwendbarkeit aufweisen. Hierbei handelt es sich um einen neuartigen Filter für die nichtlineare Datenassimilation, der grundlegend bereits 2013 im Rahmen der Arbeiten für DEPARTURE abgeleitet werden konnte. In den Jahren 2014 und 2015 wurde diese Entdeckung in zwei Entwicklungsschritten weiter ausgearbeitet und fortgeführt.

##### VI.7.1. Motivation und Herleitung

Im Rahmen der oben beschriebenen Datenassimilations-Experimente für DEPARTURE und der einhergehenden detaillierten Beschäftigung mit Filteralgorithmen und -theorien kam es zu einem zusätzlichen interessanten Forschungsergebnis theoretischer Natur. Der Ensemble Kalman Filter (EnKF, Evensen 1994), bzw. seine deterministische Variante, der Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF, Ott 2004 et al.), bieten zwei wesentliche Vorteile

- Unabhängigkeit von Analyse-Algorithmus und Modell, im Gegensatz zu variationellen Methoden
- Im Vorhersageschritt wird ein Ensemble des vollen, nichtlinearen Modells integriert, womit eine realistischere Schätzung von Analysemittel und Kovarianz erreicht wird.

Jedoch basiert der Analyseschritt auf den Gleichungen des klassischen Kalman Filters, welcher implizit voraussetzt, dass der Zustand vor Assimilation der Beobachtung einer Normalverteilung folgt, was bei nichtlinearen Modellen nie erfüllt sein kann. Eine Alternative besteht im Partikel-Filter (PF), der die Assimilation der Beobachtungen direkt über eine Monte-Carlo-Lösung des Bayes-Theorems durchführt. Problematisch beim PF ist jedoch die Tendenz zur Filterdivergenz (Snyder et al. 2008) für Systeme größerer Dimensionalität. Dies stellt aktuell ein Gebiet hoher Forschungsaktivität dar (z.B. van Leeuwen and Ades 2013).

Der neu abgeleitete NETF ist ein sequentieller, ensemble-basierter Filteralgorithmus. Im Analyseschritt wird die aktuelle Beobachtung assimiliert, indem, ähnlich wie beim ETKF (Bishop 2001), durch eine Matrixtransformation mit einer Wurzelmatrix ein neues Ensemble mit exakt spezifizierten Mittelwert und Kovarianz erzeugt wird. Der ETKF verwendet hierfür die Momente des Kalman Filters, was durch die Gauss'sche Annahme in nichtlinearen Systemen zu einem systematischen Bias führt (Lei and Bickel 2011). Im Gegensatz dazu wird die Transformationsmatrix des NETF derartig bestimmt, dass die ersten beiden Analysemomente exakt den nicht-parametrischen Monte-Carlo-Schätzern entsprechen, wodurch nur auf Bayes' Theorem zurückgegriffen wird. Zur Berechnung dieser Matrix sind ausschließlich die Partikelgewichte, wie sie auch im Partikelfilter (PF) verwendet werden, erforderlich. Weiterhin lässt sich die Analyse in Analogie zum LETKF (Hunt et al. 2007) lokalisieren, wodurch die effektive Dimensionalität signifikant verringert wird. Im Gegensatz zum PF vermeidet

dies, gemeinsam mit der Erzeugung eines neuen Ensembles, das Problem der Filterdivergenz in höheren Dimensionen (Snyder et al. 2008). Aufgrund der formalen Ähnlichkeit zum (L)ETKF ist der NETF nicht nur rechentechnisch effizient, sondern auch sehr einfach zu implementieren. Dies unterscheidet ihn auch vom „Equivalent Weight PF“ (van Leeuwen 2010, Ades and van Leeuwen 2015), dessen modellabhängiger Vorsageschritt eine komplexe Implementierung und weitreichendes Tuning erfordert.

### VI.7.2 Validation und Publikation

Die Eigenschaften des NETF wurden weiterhin empirisch in verschiedenen Testmodellen untersucht. Hierbei bestätigte sich die Stabilität des Filters auch bei kleinen Ensemblegrößen. Weiterhin ist er durch die nichtlineare Transformation in der Lage, Analysen mit kleineren Fehlern als der (L)ETKF zu erzeugen und bietet somit einen potentiellen Vorteil. Die detaillierten Ergebnisse dieser Untersuchungen finden sich in der Dissertation (Tödter 2015) sowie in einer mittlerweile veröffentlichten Publikation (Tödter and Ahrens 2015) wieder.

- Im niedrig-dimensionalen, stark nichtlinearen Lorenz-63 Modell (L63, Lorenz 1963) zeigte sich, dass der neue Filter sowohl hinsichtlich Analysefehler (RMSE) als auch Analysequalität (Konsistenz des Ensembles) deutlich bessere Ergebnisse als der ETKF liefert.
- Im höher-dimensionalen, ebenso stark-nichtlinearen Lorenz-2005-Modell (L2005, Lorenz 2005) zeigte sich, dass der ETPF auch hier stabil bleibt und im Vergleich zum ETKF sowie NLEAF (eine stochastischer nichtlinearer Filter) bereits für 20 Ensemble-Mitglieder oder mehr geringere Analysefehler aufweist, siehe auch Abb. VI.7.1. Dies bestätigt die effiziente Wirkungsweise des NETF mit kleinen Ensemblegrößen.

Der Grund für diese motivierenden Ergebnisse liegt im nicht-parametrischen Ansatz begründet, und die Transformationsmethode sorgt für Filterstabilität.

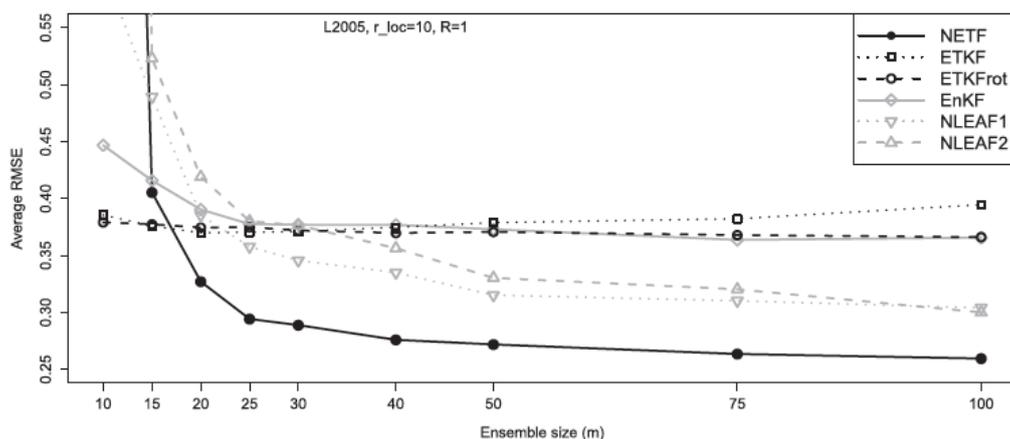


Abb. VI.7.1: Performance des NETF (schwarz) im L2005-Experiment – gezeigt ist Analysefehler (RMSE) in Abhängigkeit von der Ensemblegröße im Vergleich zu anderen Filtervarianten. Ab  $m=20$  ist der NETF der beste Filter.

### VI.7.3. Untersuchung der Anwendbarkeit in großskaligen Assimilationsproblemen

Nachdem die grundsätzliche Nützlichkeit des NETF demonstriert worden war, bestand der nächste Schritt in seiner Anwendung in hochdimensionalen Systemen, was typische Assimilationsprobleme in der Geophysik charakterisiert. Da eine derartige Anwendung technisch deutlich komplexer ist, wurde der NETF in Zusammenarbeit mit dem AWI Bremerhaven (siehe I.1.5) in das PDAF implementiert und anschließend mit dem NEMO-Ozeanmodell gekoppelt. Hierbei wurde einfache, windgetriebene Ozeanconfiguration mit etwa  $3 \cdot 10^5$  Zustandsvariablen (Temperatur, Meereshöhe, Geschwindigkeiten) gewählt, und zur Assimilati-

on wurden realistische Satelliten- und ProfilerNetzwerke nachgebildet (cf. Yan et al. 2014). Es wurde festgestellt, dass der NETF bei einer realistisch kleinen Ensemblegröße ohne weitere modellabhängige Modifikationen nicht nur stabil bleibt, sondern auch den Analysefehler deutlich reduzieren kann (Abb. VI.7.2.). Damit ist grundsätzliche Anwendbarkeit demonstriert. Die Ergebnisse wurden bereits in einer Dissertation (Tödter 2015) verwendet, zudem wurde eine bereits eingereichte Publikation erstellt (Tödter et al. 2015). Eine dritte Publikation, die sich mit der Erweiterung des NETF zu einem Glätter beschäftigt, ist zudem für die zweite Hälfte 2015 anvisiert (Kirchgessner et al. 2015)

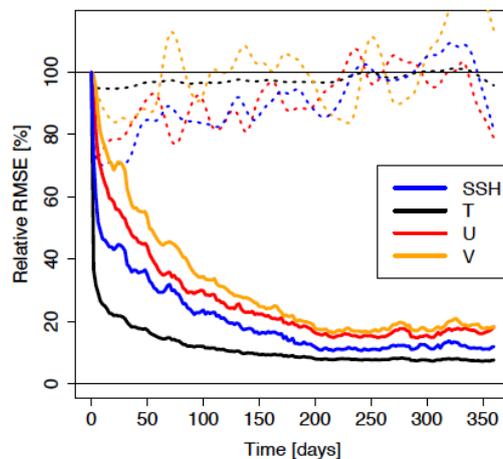


Abb. VI.7.2: Fehlerreduktion des NETF (anhand des Root-Mean-Square-Errors RMSE) im Ozean-Assimilations-Experiment für alle prognostischen Variablen (T, U, V, SSH). Die gestrichelten Linien gelten für einen freien Lauf ohne Assimilation der Beobachtungen (aber gleiches Anfangsensemble) und verdeutlichen den starken Einfluss der Assimilation auf die Fehlerreduktion.

#### VI.7.4. Zusammenfassung

Ein neue, einfache Filtermethode mit hohem Potential für nichtlineare Datenassimilation wurde im Projektverlauf abgeleitet und bietet vielfache Anwendungsmöglichkeiten.

#### VI.8. Ausblick: Initialisierung des interaktiven Ozeans auf regionaler Skala

Die gemeinsame Auswertung des DEPARTURE-Ensembles zeigte auf, dass die Verwendung der SST aus dem Globalmodell zu teilweise sehr hohen Fehlern bei der Simulation des Westafrikanischen Monsuns führte, weswegen am MPI Hamburg die Kopplung von REMO an das Ozeanmodell MPI-Om auf regionaler Skala einen Arbeitsschwerpunkt im Projekt darstellte. Motiviert von diesen Resultaten wurde an der GUF zum Abschluss in 2015 noch eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, welche die Rolle der Initialisierung des regionalen Ozeans untersucht und zugleich eine mögliche Lösung aufzeigt.

##### VI.8.1 Relevanz der regionalen Ozeans

Die Ergebnisse in DEPARTURE haben klar aufgezeigt, dass die Kopplung des regionalen Atmosphärenmodells mit einem Ozeanmodells den Vorhersagebias des westafrikanischen Monsuns aufgrund der realistischeren SST-Randbedingung deutlich reduzieren kann, im Vergleich zur Verwendung fester SST aus dem globalen Vorhersagesystem, die sich nicht an das Regionalmodell anpassen können. Hauptursache der Verbesserung des Bias ist eine deutliche bessere Simulation des ITCZ im Regionalmodell, wenn es dynamisch mit einem Ozean gekoppelt wird. Somit ist es empfehlenswert, dekadische Vorhersagen mit einem regional gekoppelten Ozeanmodell durchzuführen.

### VI.8.2. Initialisierung des regionalen Ozeans

Dies erfordert jedoch auch eine adäquate Initialisierung des regionalen Ozeans zu Beginn der dekadischen Vorhersage. Wie für die Landoberfläche aufgezeigt, könnten hierfür prinzipiell die globalen Ozeanfelder interpoliert werden. Dies resultiert aber in einem Verlust von Vorhersagbarkeit aufgrund (1) der geringeren Auflösung des globalen Ozeans und (2) Inkonsistenzen zwischen regionalen Atmosphärenmodell mit den externen Ozeanzuständen, was zu Beginn der Vorhersage zu einem ungewollten Modell-Spinup führt. Sinnvoller ist daher eine eigene Initialisierung des regionalen Ozeans, wofür sich – in Analogie zur Landoberfläche - Datenassimilationsmethoden und regionalen Reanalysen des Ozeans anbieten.

Hierzu wurde zum Projektabschluss in 2015 an der GUF eine grundsätzliche Machbarkeitsstudie durchgeführt. Dazu wurde auf die in VI.7.3 beschriebene Analyse des regionalen NEMO-Ozeans mittels realistischer Beobachtungen zurückgegriffen. Wie dort beschrieben, resultiert dies nach spätestens einem Jahr in einen realistischen Ozeanzustand. Wie Abb. VI.8.1 zeigt, betrifft dies nicht nur den oberen Ozean, sondern auch die tieferen, unbeobachtbaren Schichten. Das ist für dekadische Vorhersage besonders relevant, da der insbesondere der tiefe Ozean aufgrund seiner langsamen Variabilität das höchste Potential zur dekadischen Vorhersagbarkeit besitzt.

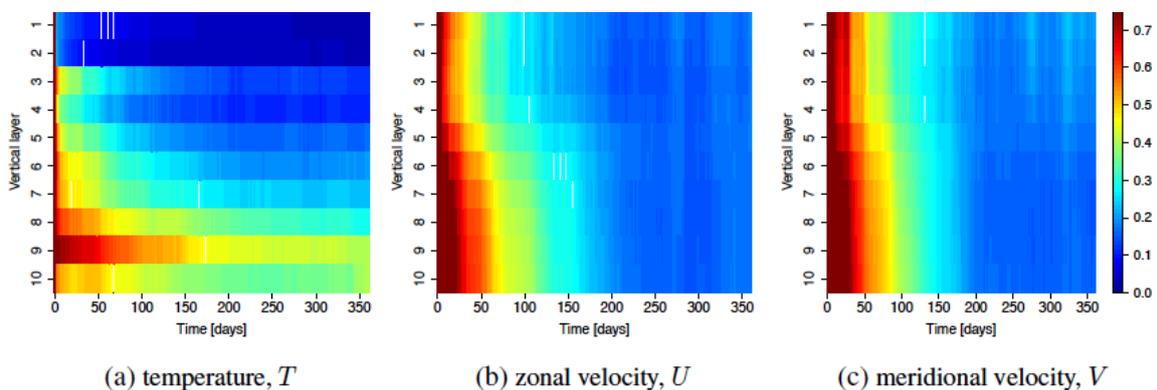


Abb. VI.8.1: Zeitverlauf des relativen Fehlers (Vergleich zu Fehler Anfang des Jahres) im Assimilationsjahr für alle vertikalen Schichten für Temperatur und Geschwindigkeiten. Die Bilder visualisieren somit die Fehlerreduktion bzw. Konvergenz für jede Ozeanschicht.

Um den Einfluss auf die Vorhersagbarkeit zu untersuchen, wurde im Anschluss dieser Zustand zur Initialisierung einer einjährigen Ozeanvorhersage verwendet. Das Resultat ist in Abb. VI.8.2 als Entwicklung der relativen Vorhersagefehler für alle prognostischen Variablen zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die dynamischen Variablen nach etwa einem halben Jahr ihren Vorhersageskill verlieren, die Vorhersagbarkeit der Temperatur jedoch über das Jahr andauert. Da die Temperatur den Wärmegehalt des Ozeans und damit die Energieflüsse an der Oberfläche maßgeblich bestimmt, ist dadurch ein positiver Einfluss auch dekadischer Skala zu erwarten. Auch wenn es sich hierbei um ein vereinfachtes Ozeanmodell ohne atmosphärische Kopplung handelt, demonstriert dieses Ergebnis bereits deutlich die Relevanz einer eigenen Initialisierung des regionalen Ozeans.

### VI.8.3. Zusammenfassung

Für regionale, dekadische Klimaprognosen sollte nicht nur ein interaktiver Ozean verwendet werden, sondern dieser auch mit Datenassimilation realistisch initialisiert werden.

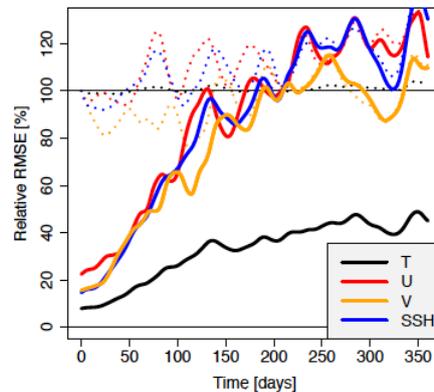


Abb. VI.8.2: Vorhersage über 1 Jahr im regionalen Ozeanmodell, initialisiert mit der oben erzeugten Analyse. Gezeigt ist der Vorhersagefehler im Zeitverlauf, der naturgemäß mit der Simulationsdauer ansteigt, bis eine Konvergenz zur Klimatologie erreicht ist (Verlust des Vorhersageskills). Für Temperatur bleibt der Skill über das Jahr hinaus deutlich erhalten.

## VII. Ergebnisbericht des Teilprojekts des KIT (01LP1129E)

Es werden Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten vorgestellt, die im Rahmen des Projektes DEPARTURE vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), nachfolgend mit KIT Karlsruhe bezeichnet, vorgenommen wurden.

Beschrieben werden im Wesentlichen Modellsimulationen, deren Resultate in die integrierende Ergebnisdarstellung des Verbundschlussberichts und des Schlussberichts des koordinierenden Teilprojekts 1 eingeflossen sind. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse des Teilvorhabens erfolgt im Abschlussbericht des Teilprojekts 5.

Zunächst wird ein kurzer Überblick über die durchgeführten Simulationen gegeben. Im Anschluss daran werden die wissenschaftlichen Ergebnisse bezüglich des Einflusses der Boden- und Vegetationsinitialisierung, der Aerosole und der Wasseroberflächentemperatur im tropischen Atlantik auf die Temperatur und den Niederschlag in der afrikanischen Monsunregion dargestellt.

### VII.1. Durchgeführte Simulationen

Vom KIT Karlsruhe wurde während des Projektzeitraumes der auf dem regionalen Klimamodell (RCM) COSMO-CLM (CCLM), Version cosmo\_4.21\_clm2, basierende Teil des DEPARTURE Ensembles erstellt (M5). Dies umfasst dekadischen Simulationen im Development Stage 1 (DS1), Baseline 0, für die Dekaden 1965 (Zeitraum 1966-1975) und 2000 (Zeitraum 2001-2010) sowie Simulationen im Development Stage 2 (DS2), Baseline 1, für die Dekaden 1965 (Zeitraum 1966-1975), 1980 (Zeitraum 1981-1990), 1990 (Zeitraum 1991-2000) und 2000 (Zeitraum 2001-2010). Die Auswahl von jeweils drei Realisierungen des globalen Modells MPI-ESM-LR, aus deren Ergebnissen die Antriebsdaten der RCM Simulationen ermittelt wurden, basierte auf einer globalen SST Validierung, die von den Kollegen der Universität Würzburg entwickelt und in ihrem Teilbericht beschrieben wird.

Darüber hinaus wurde mit CCLM eine mit Reanalysen angetriebene Klimasimulation im DEPARTURE Gebiet für den Zeitraum 1958 bis 2010 vorgenommen. Für die Zeit von 1958 bis 1978 erfolgte der Antrieb über die ERA-40 Reanalysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF), für die Zeit von 1979 bis 2010 mit den ERA-Interim Analysen des ECMWF. Aus diesen Rechnungen wurden sogenannte „eingeschwungene“ Boden- und Vegetationsparameter als Anfangsbedingungen für die dekadischen Simulationen abgeleitet, mit denen die entsprechenden Parameter aus den dekadischen MPI-ESM-

LR Ergebnissen ersetzt wurden, um die Einschwingzeit (engl. spin-up) der dekadischen RCM Simulationen zu verkürzen.

Für die Dekaden 1965 und 2000 wurden für jeweils drei Realisierungen zusätzliche Sensitivitätsstudien zum Einfluss der Aerosole und der Wasseroberflächentemperatur (SST=Sea Surface Temperature) auf das Westafrikanische Monsunsystem durchgeführt (Meilensteine 3 (M3) und 10 (M10)). In CCLM werden die Aerosole über die Aerosol-Optische-Dicke (AOD) repräsentiert. Standardmäßig verwendet CCLM AOD Verteilungen nach Tanré et al (1984), die zwar räumlich variieren, aber zeitlich konstant sind. Diese lassen sich aber durch realistischere Monatsklimatologien der AOD Verteilungen ersetzen, z. B. durch die AOD Verteilungen nach Kinne et al. (2006). Zum anderen wurde die SST Randbedingung dahingehend verändert, dass die von MPI-ESM-LR vorgegebene SST, die im tropischen Atlantik zu hohe Temperaturen aufweist, durch die realistischere SST der ERA-Interim Reanalyse ersetzt wurde. Alle weiteren Randbedingungen blieben unverändert. Die Verwendung der ERA-Interim SST ist im Wesentlichen mit einer Bias-Korrektur der MPI-ESM-LR SST vergleichbar, die im Zwischenbericht 2013 beschrieben wurde. Durch diese Simulationen war es möglich, sowohl die Einflüsse der AOD und SST Änderungen separat als auch den kombinierten AOD/SST Effekt zu untersuchen.

In der Phase DS1, Baseline 0, wurden zusätzlich Experimente durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Boden-Vegetations-Initialisierungen auf die Ergebnisse von Schlüsselparametern wie die bodennahe Temperatur in 2 m Höhe über Grund und den Niederschlag über Afrika zu untersuchen. Das CCLM Referenzexperiment DS1R1E1 nutzte als Anfangsbedingungen Daten für die Bodenfeuchte (W\_SO), die Bodentemperatur (T\_SO), die Schneetemperatur (T\_SNOW), das Schnee-Wasser-Äquivalent (W\_SNOW) sowie das Wasseräquivalent (W\_I) der Vegetationsschicht, die aus den Ergebnissen der Realisierung R1 der MPI-ESM-LR Rechnungen abgeleitet wurden. (Tab VII.1). In den Experimenten DS1R1E2, DS1R1R3 und DS1R1E4 wurden die Werte dieser Anfangsbedingungen für den 01.01.2001, 00:00 UTC, sukzessive durch Daten ersetzt, die aus der transienten ERA-Interim getriebenen CCLM Klimasimulation abgeleitet wurden (Tab. VII.1).

*Tab. VII.1: Charakteristik der CCLM Sensitivitätsexperimente in Bezug auf Anfangsbedingungen des Bodens und der Vegetation. Erläuterungen der Abkürzungen siehe Text.*

DS1R1E1 (Referenz)	DS1R1E2	DS1R1E3	DS1R1E4
T_SO, W_SO, W_SNOW, T_SNOW, W_I aus initialisierter MPI- ESM-LR Simulation	W_SO aus ERA- Interim getriebenem Klimalauf	W_SO, T_SO, W_SNOW, T_SNOW aus ERA- Interim getriebenem Klimalauf	W_SO, T_SO, W_SNOW, T_SNOW, W_I aus ERA-Interim getrie- benem Klimalauf

Des Weiteren wurde das standardmäßig in CCLM verwendete Boden-Vegetation-Atmosphären-Transfer Modell (SVAT) TERRA-ML durch das weiterentwickelte SVAT VEG3D ersetzt (Meilenstein M9). Die Kopplung von VEG3D an CCLM wurde dabei mit der OASIS3-MCT Kopplungssoftware realisiert. Mit diesem Modellsystem wurden zusätzlich dekadische Simulationen für den Zeitraum 2001-2010 für die drei ausgewählten Baseline 1 Realisierungen der globalen MPI-ESM-LR Läufe sowie ERA-Interim getriebene Sensitivitätsläufe für die Dekade 2000 und das Jahr 1979 durchgeführt. Dadurch konnte der Einfluss der Boden-Vegetation-Atmosphären Wechselwirkungen auf das Westafrikanische Monsunsystem explizit untersucht werden.

## VII.2. Wissenschaftliche Ergebnisse

### VII.2.1. Einfluss der Boden- und Vegetationsinitialisierung

Im Rahmen erster Sensitivitätsexperimente wurden CCLM Simulationen mit unterschiedlichen Boden- und Vegetationsinitialisierungen durchgeführt (Tab VII.1). Die CCLM Ergebnisse für die Temperatur in 2 m Höhe und den Niederschlag wurden dabei sowohl untereinander verglichen als auch mit aktuellen globalen Klimadaten aus dem Klimaarchiv der University of Delaware (Willmott et al., 1998, University of Delaware). Diese Sensitivitätsstudie zeigte, dass die Änderungen in den Anfangsbedingungen die Ergebnisse zwar verändern, sogar noch Jahre nach der Initialisierung, dass es aber im Vergleich zu den Beobachtungsdaten bezüglich des Niederschlags über Afrika keinen nennenswerten Mehrwert durch die Änderung der Anfangsbedingungen gab. Hinsichtlich der Temperatur in 2m Höhe stellte sich heraus, dass die mittlere quadratische Abweichung (Root Mean Square Error, RMSE) zu den Beobachtungen bei geänderten Anfangsbedingungen in den ersten drei bis vier Jahren etwas geringer war als im Falle des Referenzlaufes. Das ist exemplarisch in der Abb. VII.1 dargestellt, die die Ergebnisse der vier Experimente für die Temperatur und den Niederschlag im Vergleich zur Beobachtung im westlichen Sahel (WSA, alle Landgitterpunkte 18°W-10°E/10°N-20°N) zeigt.

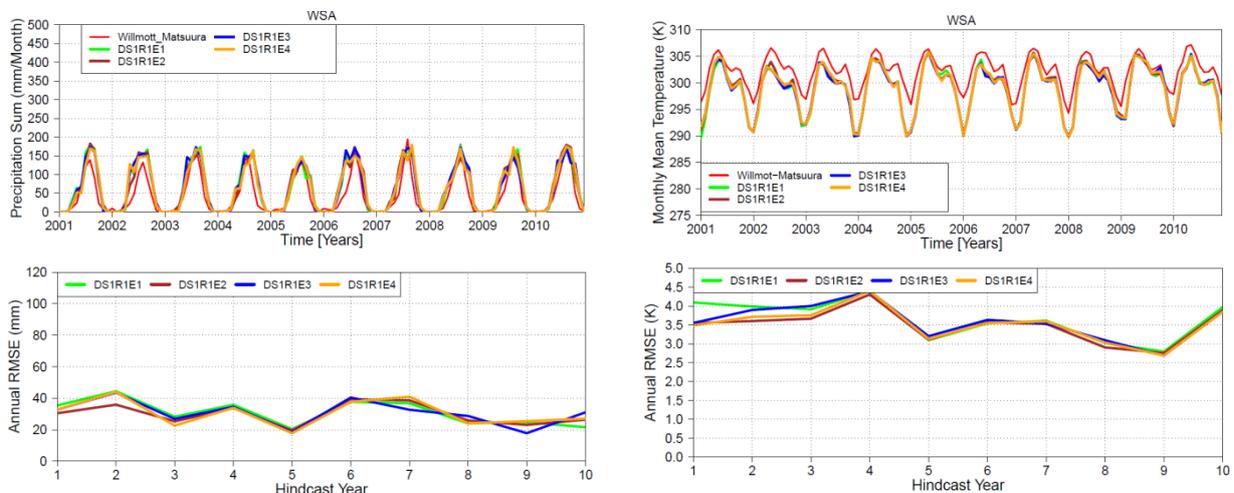


Abb. VII.1: Zeitreihen der flächengemittelten Monatssumme des Niederschlags (mm/Monat, oben links) und der Monatsmitteltemperaturen (K, oben rechts) in der Region West-Sahel (WSA). Die jährlichen mittleren quadratischen Abweichungen von der Beobachtung sind unten dargestellt, links für den Niederschlag, rechts für die Temperatur.

- Rote Kurve oben: Beobachtungsdaten
- Grüne Kurve: Referenzlauf DS1R1E1
- Übrige Farben: CCLM Experimente mit geänderten Anfangsbedingungen (siehe Tab VII.1)

### VII.2.2. Verringerung des Temperaturbias

In einer weiteren Sensitivitätsstudie wurden die Auswirkungen unterschiedlicher AOD Verteilungen auf die Simulationsergebnisse untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Verwendung realistischerer AOD Verteilungen einen positiven Einfluss auf die Simulation der bodennahen Temperatur in 2m Höhe hat. Die allgemeine Unterschätzung von beobachteten 2m Temperaturen durch die Modellergebnisse (Cold Bias) wird systematisch reduziert. Dies führt in allen Regionen zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse im Vergleich zur Referenztemperatur nach Willmott-Matsuura. Beispielhaft wird dies in Abb. VII.2 für die Dekade 2000, die MPI-ESM-LR Realisierung R4 und die Region des Zentralen Sahels (CS, 7°W-30°E/10°N-20°N, siehe auch Abb. VII.4) demonstriert. Der obere Teil der Abb. VII.2 zeigt

die 10-jährige Zeitreihe der Monatsmittel der 2m Temperatur in der Region CS als Vergleich von drei CCLM Experimenten untereinander und mit den Beobachtungsdaten nach Willmott-Matsuura. Im CCLM Referenzlauf CCLM\_2000\_DS2R4E4 (grüne Kurve) wurden die standardmäßigen AOD Verteilungen nach Tanré sowie die durch MPI-ESM-LR vorgegebene SST verwendet. Der RMSE (mittlerer Teil Abb. VII.2) zwischen den Ergebnissen des Referenzlaufes und den Beobachtungsdaten ist größer als 2.5 K. Er wird durch die Änderung der AOD Verteilung deutlich reduziert (CCLM Experiment CCLM\_2000\_DS2R4E5, blaue Kurve). Die zusätzliche Verwendung der realistischeren SST Randbedingung (CCLM\_2000\_DS2R4E20, orange Kurve) verbessert das Ergebnis der CCLM Simulation kaum bzw. nur geringfügig im 6. sowie im 9. und 10. Simulationsjahr. Der Mean Squared Skill Score (MSSS, Goddard et al., 2013) als ein Maß für die Vorhersagegüte verbessert sich etwa ab dem zweiten Jahr. Für die Mitte und das Ende der Dekade verbessert die realistischere SST Randbedingung die Vorhersagegüte zusätzlich.

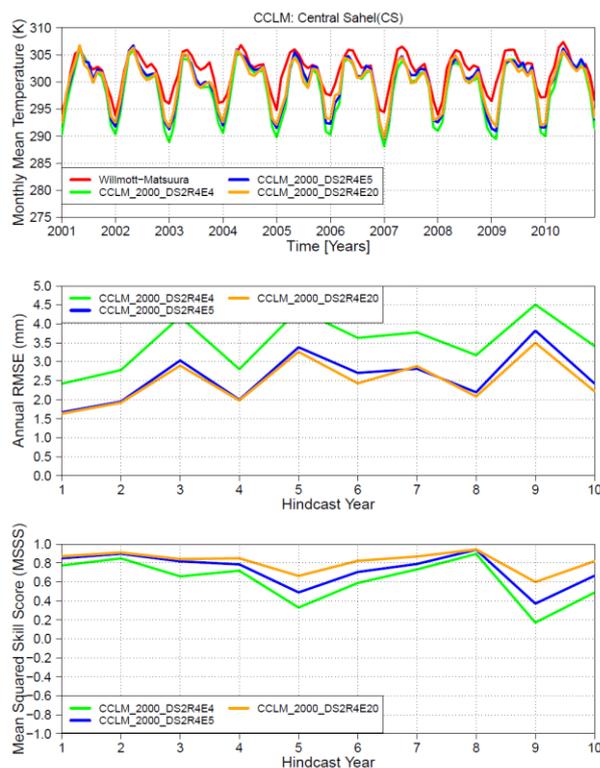


Abb. VII.2: Einfluss von Änderungen der Aerosol-Optischen-Dicke (AOD) und der SST Randbedingung auf die Ergebnisse von CCLM Simulationen für die Dekade 2000 (2001 – 2010) in der Region Zentraler Sahel (CS)

- Oben: 10-jährige Zeitreihe der Monatsmittel der 2 m Temperatur
- Mitte: Mittlere quadratische Abweichung (RMSE) auf jährlicher Basis
- Unten: Mean Squared Skill Score (MSSS)
- Rote Kurve: Beobachtungsdaten nach Willmott-Matsuura (Willmott et al., 1998)
- Grüne Kurve: Referenzlauf mit Standard AOD nach Tanré et al (1984) und original MPI-ESM-LR SST
- Blaue Kurve: nur Einfluss der realistischeren AOD Verteilung nach Kinne et al (2006)
- Orange Kurve: Einfluss AOD und SST
- Referenz für RMSE und MSSS jeweils Willmott-Matsuura Beobachtungsdaten
- Weitere Erläuterungen siehe Text

Eine vergleichbare Verringerung des Temperaturbias konnte durch die Kopplung von CCLM mit VEG3D erzielt werden. Abb. VII.3 zeigt den mittleren Jahresgang der 2 m Temperatur der Dekade 2000 im Westlichen (WS, alle Landgitterpunkte  $17.5^{\circ}\text{W}-7^{\circ}\text{W}/10^{\circ}\text{N}-20^{\circ}\text{N}$ , siehe auch Abb. VII.4) und Zentralen Sahel (CS) für ERA-Interim getriebene CCLM Simulationen mit TERRA-ML (rot), nachfolgend CCLM-TERRA-ML genannt, und VEG3D (blau), nachfolgend mit CCLM-VEG3D bezeichnet. Als Referenz wird auch hier der Beobachtungsdatensatz nach Willmott-Matsuura verwendet (schwarz). Dabei ist zu erkennen, dass der Temperaturverlauf in der CCLM-VEG3D Simulation deutlich gedämpfter verläuft als in der CCLM-TERRA-ML Simulation. D.h., bei Verwendung des SVATs VEG3D steigen die Temperaturen in der ersten Jahreshälfte (Januar-Mai) nicht so stark, bleiben in der zweiten Jahreshälfte (Juni-Dezember) allerdings auf einem höheren Temperaturniveau, wodurch die CCLM-VEG3D Simulation eine höhere Übereinstimmung mit den Beobachtungen erzielt. Der Grund für diese Dämpfung der Temperaturkurve in der CCLM-VEG3D Simulation ist die Verwendung einer expliziten Vegetationsschicht im vertikalen Aufbau des SVATs, während eine vergleichbare Schicht im Aufbau von TERRA-ML fehlt. Diese Vegetationsschicht verhindert durch Abschattungseffekte, dass sich der Boden in der ersten Jahreshälfte zu stark erhitzt und verringert gleichzeitig, durch die Reduzierung der langwelligen Ausstrahlung, dessen Abkühlung in der zweiten Jahreshälfte. Dies hat zur Folge, dass CCLM-VEG3D Hindcast Simulationen einen klaren Mehrwert für die vorhergesagten 2-Meter Temperaturen gegenüber den CCLM-TERRA-ML Simulationen aufweisen (Abb. VII. 4).

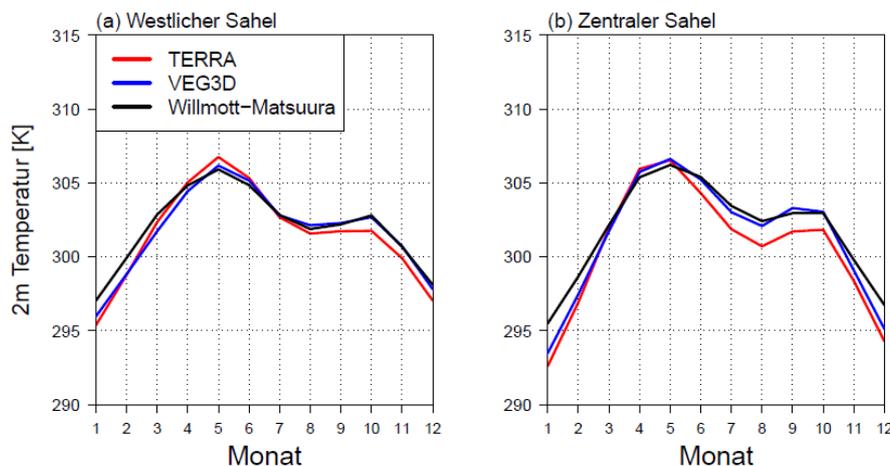


Abb. VII.3: Mittlerer Jahresgang der 2m Temperatur der Dekade 2000 im Westlichen (a) und Zentralen Sahel (b) für ERA-Interim getriebene CCLM Simulationen.

- Rote Kurve: CCLM Simulation gekoppelt mit TERRA-ML
- Blaue Kurve: CCLM Simulation gekoppelt mit VEG3D
- Schwarze Kurve: Beobachtungsdaten nach Willmott-Matsuura (Willmott et al., 1998)

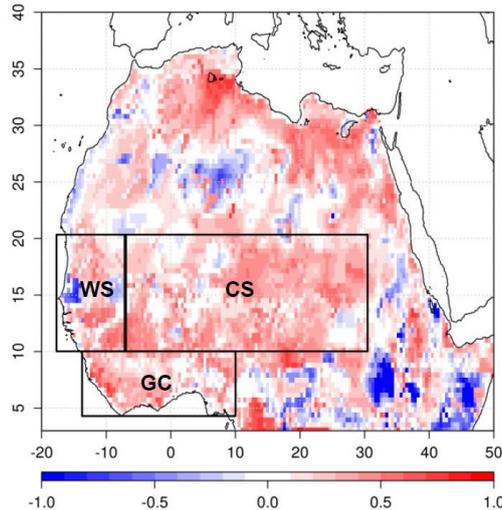


Abb. VII.4: Mean Squared Skill Score (MSSS) der mittleren monatlichen 2-Meter Temperaturen der CCLM- VEG3D Simulationen in der Dekade 2001-2010 in Bezug auf die CCLM Simulationen mit TERRA-ML. Rote Farben weisen positive MSSS Werte und somit Flächen aus, bei denen die Anwendung von VEG3D einen Mehrwert gegenüber TERRA-ML hat, blaue Farben stehen für einen Mehrwert von TERRA-ML. Als Beobachtung wurde der Datensatz nach Willmott-Matsuura (Willmott et al., 1998, University of Delaware, UDEL) verwendet. Die schwarz umrandeten Boxen repräsentieren die Teilregionen West-Sahel (WS), Zentraler Sahel (CS) sowie die Region entlang der Küste am Golf von Guinea (GC)

### VII.2.3. Monsunniederschläge

Die Sensitivitätsstudien mit unterschiedlichen AOD Verteilungen und SST Randbedingungen verdeutlichte, dass die Verwendung der realistischeren SST aus den ERA-Interim Reanalysen vornehmlich für die Verbesserung des berechneten Niederschlags an der Guineaküste verantwortlich ist. Abb. VII.5 zeigt für die Dekade 2000 und für den Fall der MPI-ESM-LR Realisierung R4 die Zeitreihen des über die Monate Juni, Juli, August und September (JJAS) summierten Niederschlags entlang der Küstenregion des Golfes von Guinea (GC, alle Landpunkte  $13.5^{\circ}\text{W}-10^{\circ}\text{E}/4.5^{\circ}\text{N}-10^{\circ}\text{N}$ , siehe auch Abb. VII.4). Die Ergebnisse der Referenzsimulation CCLM\_2000\_DS2R4E4 (grüne Kurve), in der die Standardverteilung der AOD nach Tanré und die vom MPI-ESM-LR vorgegebene SST verwendet wurde, und des Experimentes CCLM\_2000\_DS2R4E5 (blaue Kurve) mit nur geänderter AOD Verteilung überschätzen die sommerliche Niederschlagssumme in der Region GC im Mittel um 300 mm. Das AOD Experiment modifiziert das Ergebnis der Referenzsimulation nur unwesentlich. Im kombinierten AOD/SST Experiment (CCLM\_2000\_DS2R4E20, orange Kurve) wird dagegen diese Niederschlagssumme in allen Jahren drastisch reduziert, was den starken Einfluss einer realistischen SST Randbedingung auf den Niederschlag entlang der Küste verdeutlicht. Die mittlere Niederschlagssumme wird im Vergleich zur Beobachtungsklimatologie nun um etwa 166 mm unterschätzt.

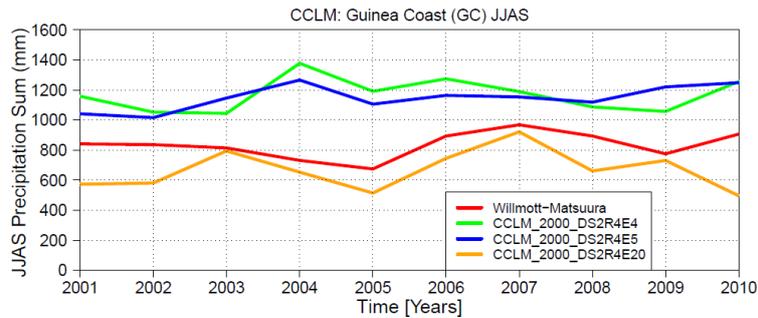


Abb. VII.5: Einfluss von Änderungen der Aerosol Optischen Dicke (AOD) und der SST Randbedingung auf die von CCLM berechnete Summe des sommerlichen (JJAS) Niederschlags für die Dekade 2000 (2001 – 2010) in der Küstenregion entlang des Golfes von Guinea (GC).

- Rote Kurve: Beobachtungsdaten nach Willmott-Matsuura (Willmott et al., 1998)
- Grüne Kurve: Referenzlauf mit Standard AOD nach Tanré et al (1984) und original MPI-ESM-LR SST
- Blaue Kurve: nur Einfluss der realistischeren AOD Verteilung nach Kinne et al (2006)
- Orange Kurve: Einfluss AOD und SST
- Weitere Erläuterungen siehe Text

Weiter im Inneren des Kontinentes, in der Sahelzone, verliert die SST Randbedingung jedoch ihren Einfluss auf den Niederschlag. In dieser Region gewinnen aber die Eigenschaften des Bodens und der Vegetation an Bedeutung für die Monsunniederschläge. Ein Beispiel dafür konnte aus den Ergebnissen der ERA-Interim getriebenen Sensitivitätsläufen für das Jahr 1979 abgeleitet werden, bei denen die beiden SVATs TERRA-ML und VEG3D zur Anwendung kamen. Aufgrund der Dämpfung der Temperaturkurve in der CCLM-VEG3D Simulation durch die Verwendung einer expliziten Vegetationsschicht werden während der Regenzeit im Sahel (Juni-September) höhere Temperaturen erreicht als in der CCLM-TERRA-ML Simulation. Diese höheren Temperaturen haben zur Folge, dass sich das Sahara-Hitzetief über dem Zentralen Sahel weiter nach Süden ausgedehnt. Dadurch verlagert sich auch der African Easterly Jet (AEJ) mit seinen Wellenstörungen (AEW: African Easterly Waves) ebenfalls nach Süden (Abb. VII.6a und Abb. VII.6b). In den Trögen der AEWs können sich mesoskalige konvektive Systeme (MCS) entwickeln, die maßgeblich für den Niederschlag in der Sahelzone verantwortlich sind. Diese MCS ziehen aufgrund der Verlagerung der AEWs auf südlicher verlaufenden Bahnen über Westafrika, was aus den Niederschlagsdifferenzen dieser Simulationen in Abb. VII.6c abzulesen ist. Dabei verlaufen die MCS im Zentralen Sahel auf kürzeren Zugbahnen, im Westlichen Sahel auf längeren. Dies hat in den CCLM-VEG3D Simulationen eine Erhöhung der Niederschlagssummen im Westlichen Sahel und eine Verringerung im Zentralen Sahel zur Folge. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudie konnten durch die Ergebnisse der dekadischen Simulationen untermauert werden, wodurch die Bedeutung der Boden- und Vegetationseigenschaften auf die räumliche Verteilung der Monsunniederschläge im Sahel hervorgehoben wird. Da die bodennahen Temperaturen in den CCLM-VEG3D Simulationen realistischer sind als in den CCLM-TERRA-ML Simulationen (Abb. VII.3), sind auch die Zugbahnen der AEWs in den CCLM-VEG3D Simulationen realistischer. Dies führt dazu, dass die Simulation der Monsunniederschläge in dekadischen Hindcast Simulationen mit CCLM-VEG3D einen Mehrwert (added value) gegenüber CCLM-TERRA-ML Rechnungen aufweist (Abb. VII.7).

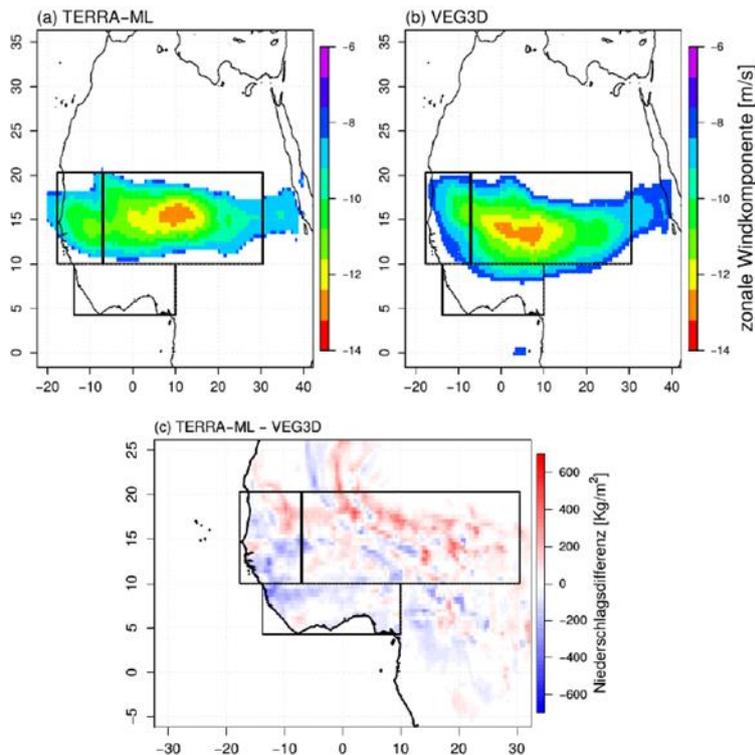


Abb. VII.6: 95-Perzentil der zonalen Windkomponenten auf 600hPa in [m/s] als Repräsentant der Lage des AEJ im September 1979 für die Simulationen mit TERRA-ML (a) und VEG3D (b) (es sind nur die nach Westen gerichteten negativen Werte der Windkomponente dargestellt) sowie die mittlere monatliche Niederschlagsdifferenz in mm im gleichen Monat zwischen diesen Simulationen (c).

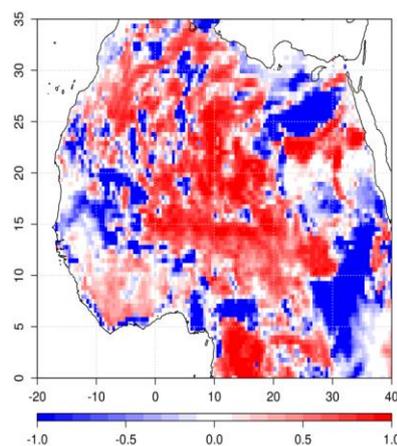


Abb. VII.7: Mittlerer MSSS der jährlichen Niederschlagssummen der Dekade 2001-2010 von VEG3D in Bezug auf TERRA-ML. Dargestellt ist der Mittelwert des MSSS über ein 3-Member-Ensemble, bestehend aus drei MPI-ESM-LR Realisierungen. Rote Farben weisen positive MSSS Werte und somit Flächen aus, bei denen VEG3D einen Mehrwert gegenüber TERRA-ML hat, blaue Farben stehen für einen Mehrwert von TERRA-ML. Als Beobachtung wurde der Datensatz nach Willmott-Matsuura (Willmott et al., 1998, University of Delaware, UDEL) verwendet.

## VIII. Ergebnisbericht des Teilprojekts des KIT (01LP1129F)

Gesamtziel des Projekts ist die Ermittlung der dekadischen Klimavorhersagbarkeit in der westafrikanischen Monsunregion und in der Zyklogeneseregion des tropischen Atlantiks. Die Analysen basieren auf einem Multimodellansatz mit den drei regionalen Klimamodellen CCLM, REMO und WRF, die dekadische Simulationen des Globalsystems MPI-ESM-LR auf regionaler Skala verfeinern. Aufgabe des IMK-IFU war die Durchführung der entsprechenden Arbeitsschritte mit dem regionalen Klimamodell WRF (Weather Research and Forecasting Model). Das Regionalmodell WRF wurde von globalen dekadischen Hindcasts des Modellsystems MPI-ESM-LR angetrieben, um diese für Afrika und große Teile des Atlantiks zu verfeinern. Die räumliche Zielauflösung betrug  $0.44^\circ$  also ca. 50 km. Es wurde eine Vielzahl an dekadischen Simulationen durchgeführt, um die Sensitivität der Modellgüte gegenüber verschiedenen Randbedingungen zu überprüfen (Ozeanoberflächentemperatur, Landnutzung und Aerosolkonzentrationen).

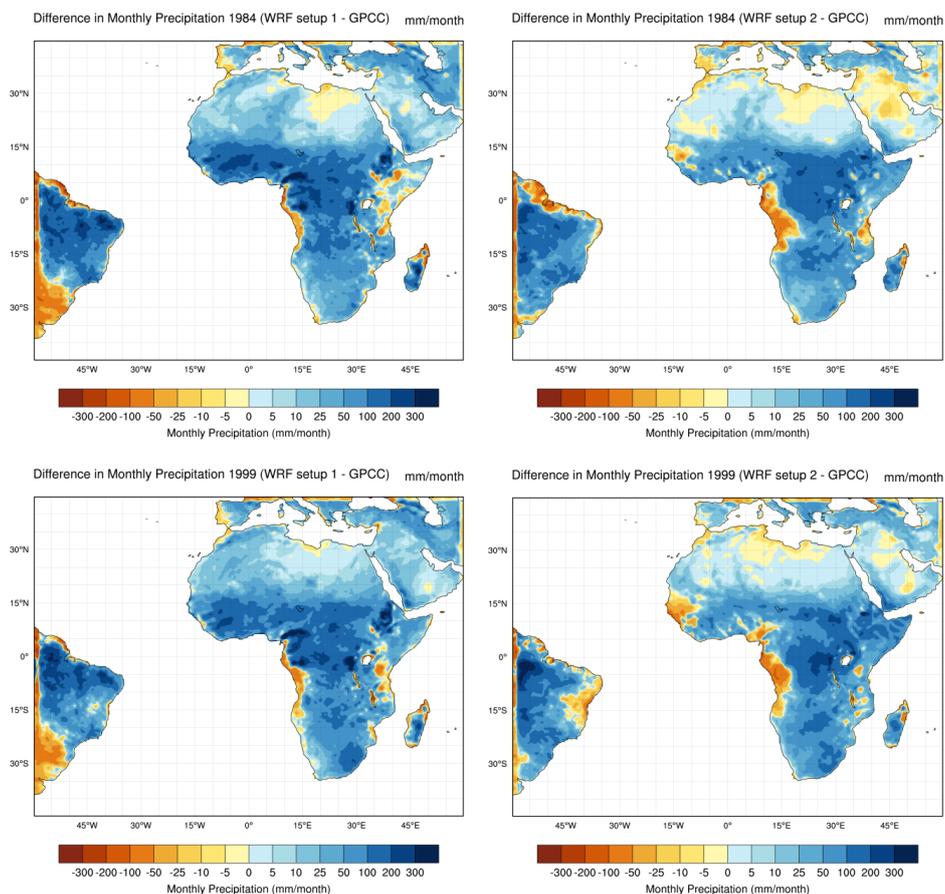
### VIII.1. Modellsetup und Konfiguration

Im ersten Schritt wurde das RCM WRF für die Zielregion aufgesetzt, um die Leistungsfähigkeit des Modells in der Reproduzierung des Niederschlags in der Region zu untersuchen. Nach der endgültigen Festlegung des zu untersuchenden Modellgebiets durch das Projektkonsortium wurde das entwickelte Modell-Setup angepasst. Das Modellgebiet wurde erweitert und die Projektion übereinstimmend mit den anderen Modellgruppen gewählt. Bei einer horizontalen Auflösung von  $0.44^\circ$  wird das Modellgebiet mit  $275 \times 207$  Gitterpunkten abgedeckt. Die vertikale Auflösung des Modells wurde auf 38 Schichten erhöht und die Modellobergrenze auf ein Druckniveau von 10 hPa angehoben. Zusätzlich wurde das Modellsystem WRF in der aktuellen Version (WRF-ARW 3.4) am Rechensystem „blizzard“ am DKRZ in Hamburg installiert.

Der Einfluss verschiedener Modelloptionen auf die Reproduktion der Niederschlagscharakteristika in der Zielregion wurde untersucht. Hierzu wurden Simulationen aufbauend auf Arbeiten von Flaounas et al. 2011 mit ERA-Interim Reanalysedaten (ECMWF, Dee et al. 2011) als Antrieb durchgeführt. Modellläufe mit verschiedenen Modellparametrisierungen wurden für die Jahre 1984 und 1999 gerechnet und mit GPCC Beobachtungsdaten verglichen (Abb. VIII.1). 1984 war ein relativ trockenes und 1999 ein relativ feuchtes Jahr in der Zielregion Westafrika. Generell werden die großskaligen Muster in der Niederschlagsverteilung durch das Modell gut reproduziert. Die unterschiedlichen Einstellungen in den Physik-Parametrisierungen gehen jedoch mit großen Differenzen in den modellierten Niederschlagsmengen einher. Unabhängig von den Modelleinstellungen ist dabei eine Überschätzung des Niederschlags zu beobachten („wet bias“), was zum Teil durch gerichtete Fehler in den Antriebsdaten zu erklären ist (Lorenz and Kunstmann 2012). Die Überschätzung des Niederschlags wird durch die Wahl der optimalen Modelleinstellungen deutlich reduziert (Abb. VIII.1).

*Tab. VIII.1: Schemata der Physik-Parametrisierungen der dargestellten WRF Modell-Setups*

	Setup 1	Setup 2
Microphysics	WRF Single-Moment 5-class Microphysics	WRF Single-Moment 5-class Microphysics
Longwave radiation	Rapid Radiative Transfer Model	Rapid Radiative Transfer Model (global)
Shortwave radiation	Goddard	Rapid Radiative Transfer Model (global)
Surface Layer	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
Land surface	Noah Land Surface Model	Noah Land Surface Model
Planetary boundary layer	Yonsei State University	Mellor-Yamada-Janjic
Cumulus physics	Betts-Miller-Janjic	Kain-Fritsch



*Abb. VIII.1: Unterschiede im monatlichen Niederschlag zwischen WRF Simulationen und Beobachtungsdaten (GPCP) für die Jahre 1984 und 1999, sowie für zwei Modell-Setups (s. Tab. VIII.1).*

## VIII.2. Vorarbeit Dekadische Simulationen (Rechenzeit, Präprozessierung, Spin-Up Verfahren)

Um die umfangreichen dekadischen Simulationen zu realisieren, wurde am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) Rechenzeit beantragt. Für das Jahr 2012 wurden 91666 CPUh und 30179 GB Speicherplatz bereitgestellt. Für das Jahr 2013 wurden 60 000 CPUh und 3 000 GB Speicherplatz am DKRZ genehmigt. Das erweiterte Modellgebiet führte zu einem großen Bedarf an Rechenressourcen (Setup D01: 4 Nodes \* 64 CPUs (256 CPUs), Wall Clock Time: ~ 1 h / 1 month simulation, CPU Time: ~ 256 h / 1 month simulation). Es wurden zusätzlich Ressourcen am hauseigenen Cluster des IMK-IFU genutzt. Für das Jahr 2014 wurde Rechenzeit auf Anforderung des DKRZ als Gesamtkontingent des DEPARTURE Konsortiums beantragt. Für den Teil des IMK-IFU wurden 100 000 CPUh und 4 000 GB Speicherplatz beantragt. Der Gesamtantrag wurde genehmigt, jedoch um 20% (Rechenzeit) bzw. 44% (Speicherplatz im aktiven Bereich, GPFS) gekürzt. Es standen somit 80 000 CPUh und 2 240 GB Speicherplatz zur Verfügung. Die fehlenden Ressourcen wurden durch Simulationen am hauseigenen Rechencluster des IMK-IFU (Rechenzeit) und durch ständige Archivierung der Modellergebnisse am DKRZ (Speicherplatz, HPSS Archiv) ausgeglichen. Da zwischenzeitlich große Probleme beim Abrufen der beantragten Rechenzeit am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) auftraten, die durch die starke Überzeichnung und die entsprechenden Wartezeiten entstanden sind, wurden erfolgreich weitere Ressourcen am Forschungshochleistungsrechner (ForHLR I) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) beantragt. Der Antrag auf 350000 CPUh, sowie 4 TB permanentem und 25 TB temporärem Speicherplatz wurde in vollem Umfang genehmigt.

Die Dekaden 1966-75 und 2001-2010 wurden als Entwicklungs- und Testzeiträume ausgewählt. Die auf dem zentralen MiKlip-Server am DKRZ bereitgestellten globalen MPI-ESM-LR (*baseline0*) Daten wurden für die Verwendung mit dem regionalen Modellsystem WRF vorprozessiert. Da sich jedoch im Laufe des Projekts das „*baseline1*“ System als vielversprechender im Hinblick auf die Wiedergabe der für das westafrikanische Klimasystem entscheidenden Randbedingung der Ozeantemperatur herausgestellt hat, wurden keine dekadischen Simulationen basierend auf „*baseline0*“ ausgeführt. Es wurden folglich Antriebsdaten der neuen Version des globalen MiKlip-Systems prozessiert (MPI-ESM-LR, *baseline1*). In der aktualisierten WRF Modellversion wurden für das Projekt sehr interessante Neuerungen implementiert (aktuelle RCP-Treibhausgaszenarien, Aerosolklimatologien und Wechselwirkung Aerosole-Strahlungshaushalt). Deshalb wurde der aktuellste Modell-Release (WRF-ARW 3.5.1) auf dem HPC-System „blizzard“ am DKRZ in Hamburg und auf dem ForHLR1 in Karlsruhe installiert, mit dem alle weiteren Simulationen durchgeführt wurden. Für die ersten dekadischen Simulationen wurden je drei Realisationen des Globalsystems MPI-ESM-LR „*baseline1*“ basierend auf Analysen der Projektpartner (Universität Würzburg) für die zwei Entwicklungsdekaden (1966-75 und 2001-2010) ausgewählt. Als erste dekadische Hindcast-Periode wurde der Zeitraum 1966-1975 festgelegt. Eine gute (*decs4e1965\_r5i1p1*, nachfolgend bezeichnet als r5), mittlere (*decs4e1965\_r8i1p1*) und schlechte Realisation (*decs4e1965\_r7i1p1*, nachfolgend bezeichnet als r7) im Hinblick auf die Wiedergabe der wichtigsten Charakteristika der Ozeanoberflächentemperatur wurde durch die DEPARTURE Projektpartner (Universität Würzburg) aus dem MPI-ESM-LR Modellensemble ausgewählt. Die erste dekadische Hindcast-Regionalisierung wurde mit der besten Realisation (r5) als Antrieb durchgeführt. Um einen Kaltstart des Modells für diese Vorhersage zu vermeiden wurde ein Spin-up Lauf durchgeführt. Das Modell wurde zu diesem Zweck für den Zeitraum 1960-1965 mit Reanalysedaten (ERA-40) angetrieben. Der Spin-up Lauf für die Dekade 2001-2010 wurde mit ERA-Interim Daten durchgeführt. Diese Vorlaufprozedur wurde im Projektkonsortium abgestimmt und von den anderen Gruppen mit dem jeweiligen Modell (CCLM,

REMO) analog ausgeführt. Abb. VIII.2 zeigt die modellierten Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen während den ersten zwei Jahren des mit ERA-40 Daten angetriebenen Spin-up Laufs für die Guineaküste. Es zeigt sich eine relative kurze Spin-up Phase des Modells von nur wenigen Monaten. Um jedoch konsistent vergleichbare Modellensembles zu erzeugen, wird die Spin-up Prozedur auch für andere Dekaden beibehalten.

Ein Vergleich des mittleren Jahresniederschlags für die Dekade 1966-1975 zwischen globalem, antreibenden Modell (MPI-ESM-LR) und Regionalmodell (WRF), sowie rasterbasierten Beobachtungsdatensätzen (GPCC und CRU) zeigt, dass generell großräumige beobachtete Niederschlagsmuster in beiden Simulationen reproduziert werden. Die feinere Auflösung des Regionalmodells verbessert die Simulation mehrerer kleinskaliger Muster insbesondere in einigen Küstenregionen. Es ist eine Tendenz zur Überschätzung der absoluten Niederschlagsmengen durch das Regionalmodell zu erkennen. Betrachtet man monatliche Niederschläge für die Hindcast-Periode 1966-1975 an der Guinea Küste (hier definiert als:  $4^{\circ}\text{N} - 13^{\circ}\text{N} / 20^{\circ}\text{W} - 16^{\circ}\text{E}$ ) zeigt sich, dass beide Simulationen – regional und global – die saisonalen Verteilungen und Mengen reproduzieren. Es ist keine klare Abhängigkeit der Modellgüte vom Vorhersagejahr zu erkennen. Die Niederschlagsmengen werden vom globalen Modell mit Ausnahme des sehr trockenen Jahres 1972 tendenziell unterschätzt. Das Regionalmodell simuliert generell mehr Niederschlag und ist deswegen oft näher an der Beobachtung als das Globalmodell. Die Trockenheit des Jahres 1972 wird vom Regionalmodell jedoch nicht wiedergegeben.

In der Folge wurden diese Analysen auf andere Regionen ausgeweitet. Im DEPARTURE Konsortium wurden die drei Auswerteregionen Guineaküste, Westsahel und Zentralsahel wie in Tab. VIII.2 aufgelistet festgelegt. In der Auswerteregion des Zentralsahel zeigte das Modell konstant einen ungewöhnlich großen positiven Bias im Niederschlag, der beim Antrieb mit Reanalysedaten in den Vorarbeiten nicht zu beobachten war. Daraufhin wurde eine andere Modellkonfiguration aus dem Testpool der Vorarbeiten in Zusammenarbeit mit der WASCAL Projektgruppe (C. Klein) gewählt und mit dieser der dekadische Lauf wiederholt (Tab. VIII.5). Abb. VIII.3 zeigt die Unterschiede zwischen den beiden Modellkonfigurationen für den mittleren Niederschlag verglichen mit verschiedenen Beobachtungsdatensätzen. Es ist insbesondere eine deutliche Reduzierung des positiven Bias in der Zentralsahel-Region zu erkennen. Diese Modellkonfiguration wird im Folgenden beibehalten und als WRF bezeichnet. Der vorhandene Modellauf mit der alten Konfiguration wird in der nachstehenden Auswertung weiterhin miteinbezogen und als WRF\_b gekennzeichnet.

Im Folgenden wurden Läufe mit der optimierten Modellkonfiguration für die beste Realisation (r5) und die schlechteste Realisation (r7) im Hinblick auf die Reproduktion der Ozeanoberflächentemperaturen durchgeführt und ausgewertet. Abb. VIII.4 zeigt die entsprechenden Monatsniederschläge für verschiedene Realisationen (r5 und r7) und Modelle (regional und global), sowie aus verschiedenen Beobachtungsdatensätzen. Die Sommerniederschläge aus diesen Daten sind in Abb. VIII.5 dargestellt. Generell produziert WRF mehr Niederschlag als MPI-ESM-LR und liegt dadurch in manchen Jahren näher an den Beobachtungen. Die Niederschläge aus den MPI-ESM-LR Läufen zeigen eine deutlich geringere interannuelle Variabilität als die Niederschläge aus WRF. Dies könnte an einer größeren Sensitivität des Regionalmodells auf die SST Randbedingung zurückzuführen sein. Dies wurde auch von den DEPARTURE Projektpartnern beobachtet. Es kommt deswegen häufig zu einer Überschätzung des Niederschlags aufgrund zu hoher Ozeantemperaturen. Das Globalmodell scheint diese Problematik nicht so ausgeprägt aufzuweisen. Tab. VIII.3 listet RMSE-Werte und Skill-Scores (NSE und MSSS) für die drei Auswerteregionen auf. Datengrundlage sind hier jeweils Monatswerte des Niederschlags aus den Modellläufen und als Referenz aus GPCC Beobachtungsdaten. Auffällig ist, dass die globalen Modellläufe sehr hohe Scores aufweisen, die von den Regionalmodellläufen nur selten erreicht werden. Die Differenzen zwischen jährlichen RMSE-Werten des Globalmodells und den entsprechenden RMSE-Werten des Regi-

onalmodells für die 10 Vorhersagejahre des Hindcast-Laufs 1966-1975 für verschiedene Realisationen (r5 und r7) in den drei Regionen bezogen auf GPCC-Beobachtungsdaten sind in Tab. VIII.4 aufgeführt. Ein positiver Wert repräsentiert eine Verringerung des RMSE durch das dynamische Downscaling, ein negativer Wert entspricht einer Erhöhung des RMSE. Der RMSE wird nur in einigen Fällen durch das Regionalmodell verringert. Die hohe Sensitivität und interannuelle Variabilität des Regionalmodells lässt eine weitere Verbesserung der dekadischen Vorhersage durch die Implementierung bzw. verbesserte Berücksichtigung weiterer Randbedingungen (Treibhausgase, Aerosole und Landnutzung) erwarten.

Tab. VIII.2: Auswerteregionen im Projekt DEPARTURE.

Region	ID	Longitudes	Latitudes
West Sahel	reg 1	17.60 W – 7.04 W	10.12 N – 20.24 N
Central Sahel	reg 2	7.04 W – 30.36 E	10.12 N – 20.24 N
Guinea Coast	reg 3	13.64 W – 10.12 E	4.40 N – 10.12 N

Tab. VIII.3: RMSE (mm Niederschlag) und Performanzkriterien (NSE und MSSS) in den drei Auswerteregionen (reg 1 – reg 3) für zwei Realisationen (r5 und r7) der Hindcastdekade 1966-1975 verglichen mit GPCC Beobachtungsdaten.

	RMSE reg 1	NSE reg 1	MSSS reg 1	RMSE reg 2	NSE reg 2	MSSS reg 2	RMSE reg 3	NSE reg 3	MSSS reg 3
WRF r5	43	0.61	0.62	39	-0.14	0.37	81	0.35	0.54
WRF_b r5	52	0.44	0.44	84	-4.22	-2.28	58	0.67	0.71
WRF r7	44	0.58	0.64	46	-0.53	0.20	85	0.29	0.62
MPI-ESM-LR r5	33	0.77	0.79	15	0.84	0.84	39	0.85	0.87
MPI-ESM-LR r7	30	0.81	0.83	14	0.86	0.86	37	0.87	0.88

Tab. VIII.4: Differenz zwischen RMSE des Globalmodells und RMSE des Regionalmodells für die 10 Vorhersagejahre des Hindcast-Laufs 1966-1975 für verschiedene Realisationen (r5 und r7) bezogen auf GPCC-Beobachtungsdaten. Ein positiver Wert repräsentiert eine Verringerung des RMSE durch das dynamische Downscaling, ein negativer Wert entspricht einer Erhöhung des RMSE.

Difference in RMSE, Model vs GPCC (glob – reg)		Predicted Year									
Reg.	Real.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
reg 1	r5	4.3	13.9	-36.0	-11.0	-10.9	-10.1	-35.3	-48.8	8.7	6.2
	r5(b)	-5.0	-23.4	-22.3	-12.1	-17.9	-31.0	-61.2	-49.5	4.4	-3.9
	r7	1.2	-6.1	-47.6	-0.8	0.5	6.9	-9.8	-39.6	-14.3	-33.9
reg 2	r5	-25.3	-31.0	-32.6	-14.8	-14.8	-16.2	-35.5	-41.9	-25.7	-12.5
	r5(b)	-66.1	-61.8	-63.3	-70.5	-74.9	-86.5	-94.4	-105	-64.6	-55.8
	r7	-41.5	-43.5	-27.1	-27.7	-3.4	-28.3	-32.3	-46.2	-29.1	-18.4
reg 3	r5	2.3	-40.9	-3.1	-28.5	-58.1	-74.7	-69.4	-73.5	-62.1	-32.2
	r5(b)	-6.6	-30.8	-9.5	-3.1	-9.7	-10.8	-37.0	-35.5	-48.6	-10.9
	r7	-25.5	-45.3	-35.9	-26.9	-57.4	-82.9	-69.2	-69.8	-36.2	-66.0

Soil temperatures in different soil layers, max. depth 2m  
Guinea Coast 1960-1961, WRF - Noah LSM, ERA40 cold start spin-up run

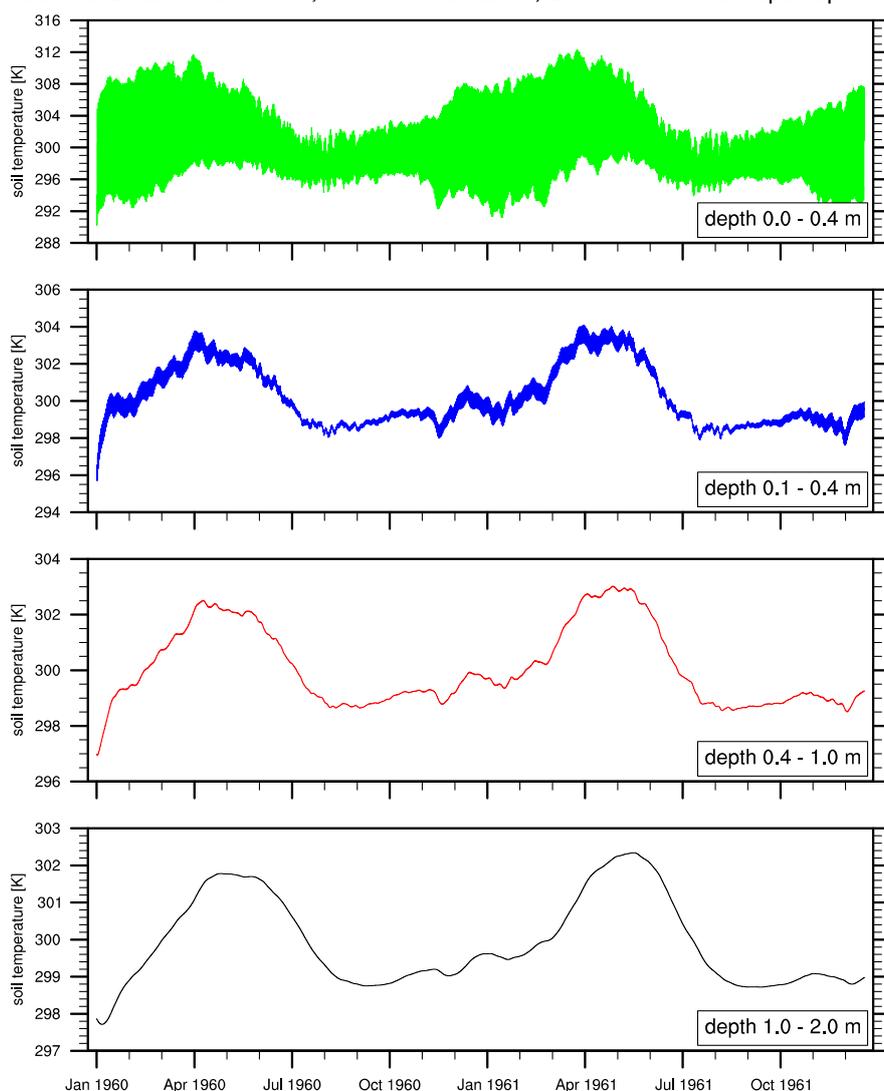


Abb. VIII.2: Simulierte Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen während des Spin-up-Laufs an der Guineaküste, WRF – Noah LSM angetrieben mit ERA-40 Reanalysedaten.

Tab. VIII.5: Schemata der Physik-Parametrisierungen des finalen WRF Modell-Setups

Microphysics	TH	Thompson
Longwave radiation	RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model (global)
Shortwave radiation	RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model (global)
Surface Layer	MO	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
Land surface	NOAH-LSM	Noah Land Surface Model
Planetary boundary layer	ACM2	Asymmetrical Convective Model V.2
Cumulus physics	BMJ	Betts-Miller-Janjic

### Daily Precipitation 1966-1975 - R5

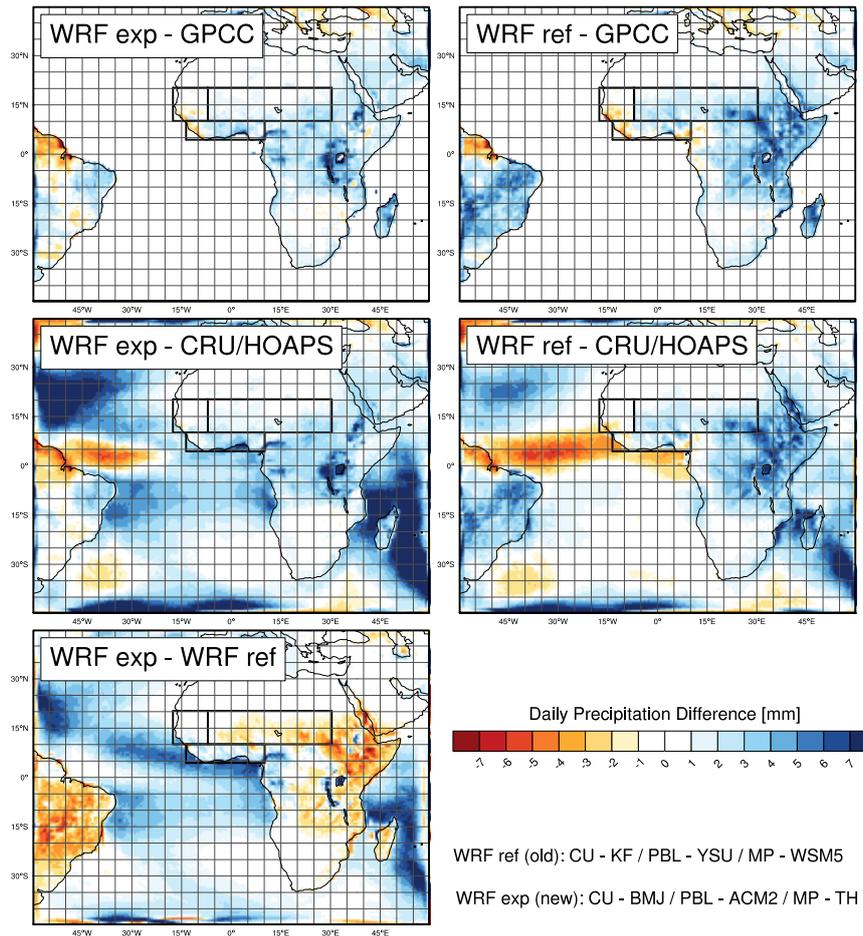


Abb. VIII.3: Abweichung zweier WRF Modellkonfigurationen voneinander und von GPCC und mittleren CRU/HOAPS-Beobachtungsdaten für den dekadischen Hindcast-Lauf 1966-1975, Realisation r5.

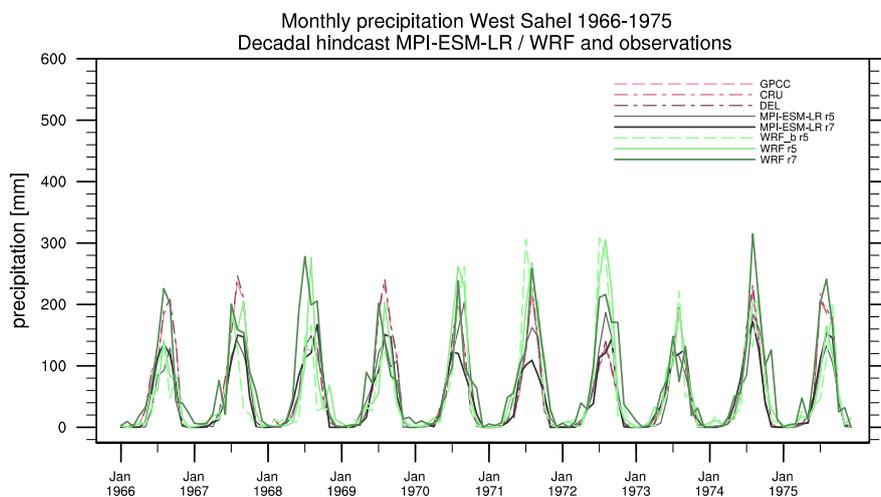


Abb. VIII.4: Simulierte (Regionalmodell WRF, Globalmodell MPI-ESM-LR) und beobachtete (GPCC, CRU, DEL) monatliche Niederschlagssummen in der Region Westsahel 1966-1975 (dekadischer Hindcast, WRF angetrieben mit MPI-ESM-LR, Realisationen r5 und r7).

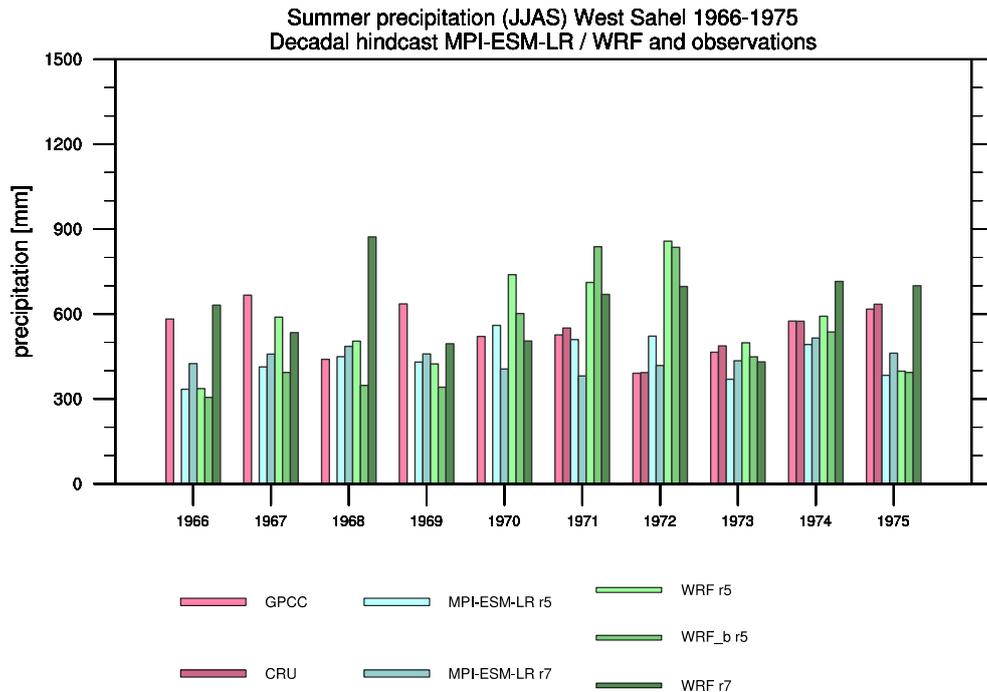


Abb. VIII.5: Simulierte (Regionalmodell WRF, Globalmodell MPI-ESM-LR) und beobachtete (GPCP, CRU, DEL) Sommerniederschläge (Juni bis September) in der Region Westsahel 1966-1975 (dekadischer Hindcast, WRF angetrieben mit MPI-ESM-LR, Realisationen r5 und r7).

### VIII.3. Dekadische Simulationen, Produktion

Zu den ursprünglichen Test- und Entwicklungsdekaden 1966-75 und 2001-2010 wurde das Modellensemble um zwei Dekaden erweitert (1981-1990 und 1991-2000, MPI-ESM-LR, *baseline*).

Abb. VIII.6 zeigt einen Vergleich der Differenzen des mittleren Niederschlags zwischen den dekadischen globalen und regionalen Hindcast-Simulationen und Beobachtungsdaten (GPCP bzw. mittlere CRU/HOAPS-Daten für die Dekade 1965) für alle vier simulierten Dekaden (Ensemble-Mean). Zu erkennen sind starke Abweichungen des Regionalmodells von den Beobachtungsdaten in den Randbereichen der Modell-Domain, was einen üblichen Effekt in der Relaxationszone des Regionalmodells bei der Kopplung mit den Antriebsdaten darstellt. Diese Bereiche werden für spätere Auswertungen verworfen. Generell ist eine insbesondere im Bereich des Golfs von Guinea starke Überschätzung des Niederschlags durch die Modelle zu beobachten. Wie schon in vorherigen Projektphasen festgestellt ist dies auf eine erhöhte Ozeanoberflächentemperatur (SST) im Modell zurückzuführen. Der Effekt ist im Regionalmodell WRF (Abb. VIII.6, links) deutlich stärker ausgeprägt als im Globalmodell MPI-ESM-LR (Abb. VIII.6, rechts). Betrachtet man die drei DEPARTURE Auswerteregionen (Westsahel, Zentralsahel und Guineaküste, siehe Markierung in Abb. VIII.6) wird sichtbar, dass ein leichter „trockener“ Bias im Globalmodell (Dekade 1990 und 2000, West- und Zentralsahel) vom Regionalmodell korrigiert wird bzw. folglich der Niederschlag leicht überschätzt wird. An der Guineaküste werden die Niederschläge generell von WRF überschätzt, was ebenso auf die erhöhte SST zurückgeführt werden kann. Das Regionalmodell reagiert offenbar sensibler auf die Randbedingung der SST als das Globalmodell.

Die Sommerniederschläge (JJAS) in den dekadischen Hindcasts für alle simulierten Dekaden (von oben nach unten: 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) und die drei Auswerteregionen (von links nach rechts: Westsahel, Zentralsahel und Guineaküste) sind in Abb. VIII.7 dargestellt. Jeweils die besten und schlechtesten Realisationen (nach SST Analyse der

Gruppe Universität Würzburg) des Globalmodells und des regionalen Modells werden mit den verfügbaren Beobachtungsdatensätzen verglichen. Generell ist die starke Überschätzung der Sommerniederschläge durch WRF an der Guineaküste zu erkennen. Auffällig ist auch, dass bei den zwei unterschiedlichen Realisationen das Regionalmodell in der Regel deutlich größere Unterschiede in den Niederschlägen produziert. Während in einigen Regionen und Dekaden (z.B. West- und Zentralsahel in der Dekade 2001-2010) WRF die absoluten Niederschlagsmengen besser wiedergibt als MPI-ESM-LR, ist dies in der Regel näher an den Beobachtungen. Betrachtet man jedoch den zeitlichen Verlauf der Hindcasts ohne den absoluten Bias zu berücksichtigen (Tab. VIII.6), so zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. Die Tabelle zeigt die Korrelationen zwischen Beobachtung und Simulation für alle verfügbaren Modelle, Realisationen, Ensemblemittel, Beobachtungsdatensätze und Dekaden. Je nach Beobachtungsdatensatz (GPCC, GPCP, CRU, DEL, TRMM) und Region unterscheiden sich die Korrelationen stark und es lässt sich kein Muster der Unterschiede zwischen Regional- und Globalmodell erkennen. Es finden sich jedoch einzelne Fälle in denen WRF konsequent höhere Korrelationen erreicht (z.B. Dekade 2000, Westsahel) und somit eine Regionalisierung einen zusätzlichen Gewinn bringt. Es gibt aber auch Kombinationen in denen MPI-ESM-LR beinahe durchgehend bessere Ergebnisse liefert (z.B. Dekade 1980, Guineaküste). Es lässt sich keine Dekade herausstellen, die generell besser oder schlechter durch die Modelle wiedergegeben wird. Es sind jedoch prinzipiell höhere Korrelationen im West- und Zentralsahel als an der Guineaküste zu beobachten. Das heterogene Bild bezüglich Vorhersagbarkeit und Bias bestätigt sich auch in der umfangreichen koordinierten Auswertung der drei Regionalmodelle, die ausführlich im Projektbericht der Universität Würzburg dargestellt wird.

*Tab. VIII.6: Korrelationen zwischen Modell (MPI-ESM-LR und WRF) und verschiedenen Beobachtungsdatensätzen (GPCC, GPCP, CRU, DEL, TRMM), Sommerniederschläge (JJAS), dekadische Hindcasts 1965, 1980, 1990, 2000, jeweils 2 Realisationen (a und b) und das Ensemble Mean (EM) in den drei DEPARTURE Auswerteregionen.*

		Region 1, West Sahel				
		GPCC	GPCP	CRU	DEL	TRMM
Dec. 1965	MPI a	-0.379	-	-0.379	-0.366	-
	MPI b	0.257	-	0.416	0.222	-
	MPI EM	-0.234	-	-0.085	-0.240	-
	WRF a	-0.522	-	-0.755	-0.499	-
	WRF b	-0.316	-	0.258	-0.326	-
	WRF EM	-0.592	-	-0.429	-0.580	-
Dec. 1980	MPI a	-0.045	-0.110	0.028	-0.058	-
	MPI b	0.572	-0.110	0.619	0.668	-
	MPI EM	0.375	0.330	0.458	0.435	-
	WRF a	-0.265	-0.335	-0.166	-0.227	-
	WRF b	0.410	0.361	0.480	0.433	-
	WRF EM	0.142	0.072	0.240	0.177	-
Dec. 1990	MPI a	0.188	0.363	0.297	0.136	-
	MPI b	0.003	0.363	-0.141	-0.152	-
	MPI EM	0.121	0.284	0.117	0.009	-
	WRF a	0.081	0.173	0.242	0.255	-
	WRF b	0.028	-0.113	-0.051	0.088	-
	WRF EM	0.137	0.108	0.265	0.429	-
Dec. 2000	MPI a	0.062	0.033	0.332	0.027	0.145
	MPI b	-0.224	0.033	0.056	-0.135	-0.307

	MPI EM	-0.060	-0.149	0.231	-0.043	-0.044
	WRF a	0.034	0.050	0.434	-0.108	0.126
	WRF b	0.357	0.193	0.338	0.318	0.156
	WRF EM	0.179	0.122	0.440	0.048	0.168
Region 2, Central Sahel						
		GPCC	GPCP	CRU	DEL	TRMM
Dec. 1965	MPI a	0.515	-	0.659	0.439	-
	MPI b	0.414	-	-0.048	0.464	-
	MPI EM	0.630	-	0.588	0.632	-
	WRF a	0.031	-	-0.351	0.098	-
	WRF b	0.199	-	0.024	0.262	-
	WRF EM	0.136	-	-0.120	0.204	-
Dec. 1980	MPI a	-0.159	-0.160	-0.184	-0.150	-
	MPI b	0.237	-0.160	0.190	0.197	-
	MPI EM	0.088	0.050	0.037	0.063	-
	WRF a	-0.140	-0.131	-0.180	-0.141	-
	WRF b	-0.065	-0.070	-0.140	-0.124	-
	WRF EM	-0.138	-0.135	-0.213	-0.176	-
Dec. 1990	MPI a	0.394	0.345	0.173	0.264	-
	MPI b	0.076	0.345	-0.056	0.049	-
	MPI EM	0.290	0.247	0.077	0.193	-
	WRF a	0.148	0.154	0.013	0.048	-
	WRF b	-0.389	-0.391	-0.384	-0.341	-
	WRF EM	-0.144	-0.142	-0.233	-0.182	-
Dec. 2000	MPI a	0.320	0.354	0.537	0.326	0.344
	MPI b	-0.558	0.354	-0.461	-0.616	-0.576
	MPI EM	-0.064	-0.038	0.165	-0.095	-0.055
	WRF a	0.261	0.200	0.445	0.263	0.269
	WRF b	-0.434	-0.447	-0.513	-0.281	-0.467
	WRF EM	-0.084	-0.147	0.030	0.028	-0.100
Region 3, Guinea Coast						
		GPCC	GPCP	CRU	DEL	TRMM
Dec. 1965	MPI a	0.346	-	-0.368	0.366	-
	MPI b	-0.298	-	-0.402	-0.304	-
	MPI EM	0.209	-	-0.719	0.230	-
	WRF a	-0.590	-	0.391	-0.599	-
	WRF b	0.328	-	0.111	0.295	-
	WRF EM	-0.183	-	0.364	-0.211	-
Dec. 1980	MPI a	0.497	0.421	0.363	0.454	-
	MPI b	0.026	0.421	-0.137	-0.028	-
	MPI EM	0.316	0.204	0.153	0.263	-
	WRF a	-0.417	-0.397	-0.382	-0.464	-
	WRF b	0.159	0.164	0.166	0.193	-
	WRF EM	-0.237	-0.209	-0.190	-0.242	-
Dec. 1990	MPI a	-0.367	-0.414	-0.232	0.085	-
	MPI b	-0.303	-0.414	-0.522	-0.467	-

	MPI EM	-0.477	-0.451	-0.505	-0.221	-
	WRF a	-0.214	-0.127	-0.310	-0.076	-
	WRF b	0.327	0.583	0.135	0.255	-
	WRF EM	0.076	0.290	-0.103	0.115	-
Dec. 2000	MPI a	-0.039	0.068	0.315	0.294	0.059
	MPI b	-0.029	0.068	0.087	0.042	0.024
	MPI EM	-0.046	0.047	0.308	0.262	0.060
	WRF a	-0.320	-0.283	-0.085	-0.231	-0.286
	WRF b	-0.036	0.024	-0.074	0.016	-0.009
	WRF EM	-0.231	-0.171	-0.103	-0.142	-0.193

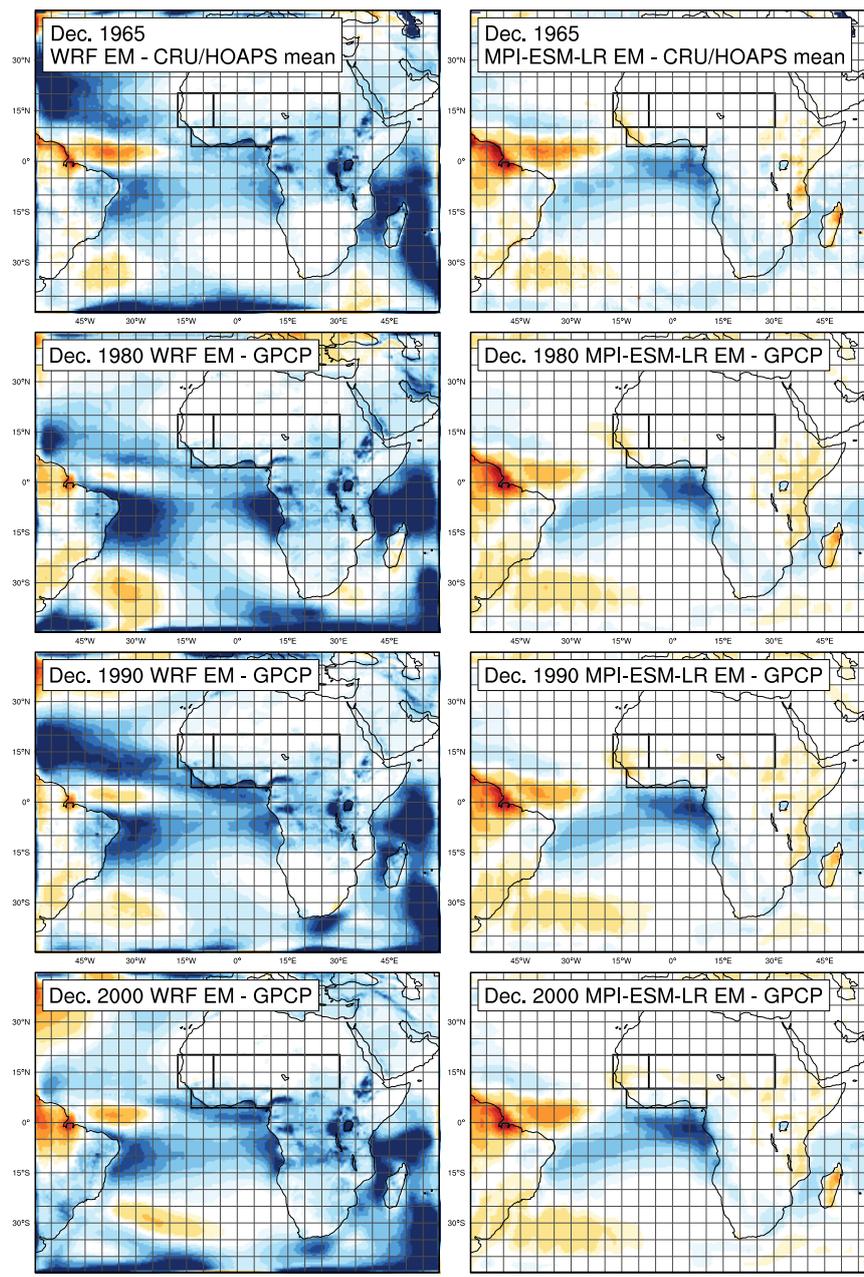


Abb. VIII.6: Differenz im mittleren täglichen Niederschlag zwischen Regionalmodell WRF (links) bzw. Globalmodell MPI-ESM-LR (rechts) und Beobachtungsdaten (GPCP bzw. Mittelwert CRU/HOAPS für die Dekade 1965) für alle simulierte Hindcast-Dekaden.

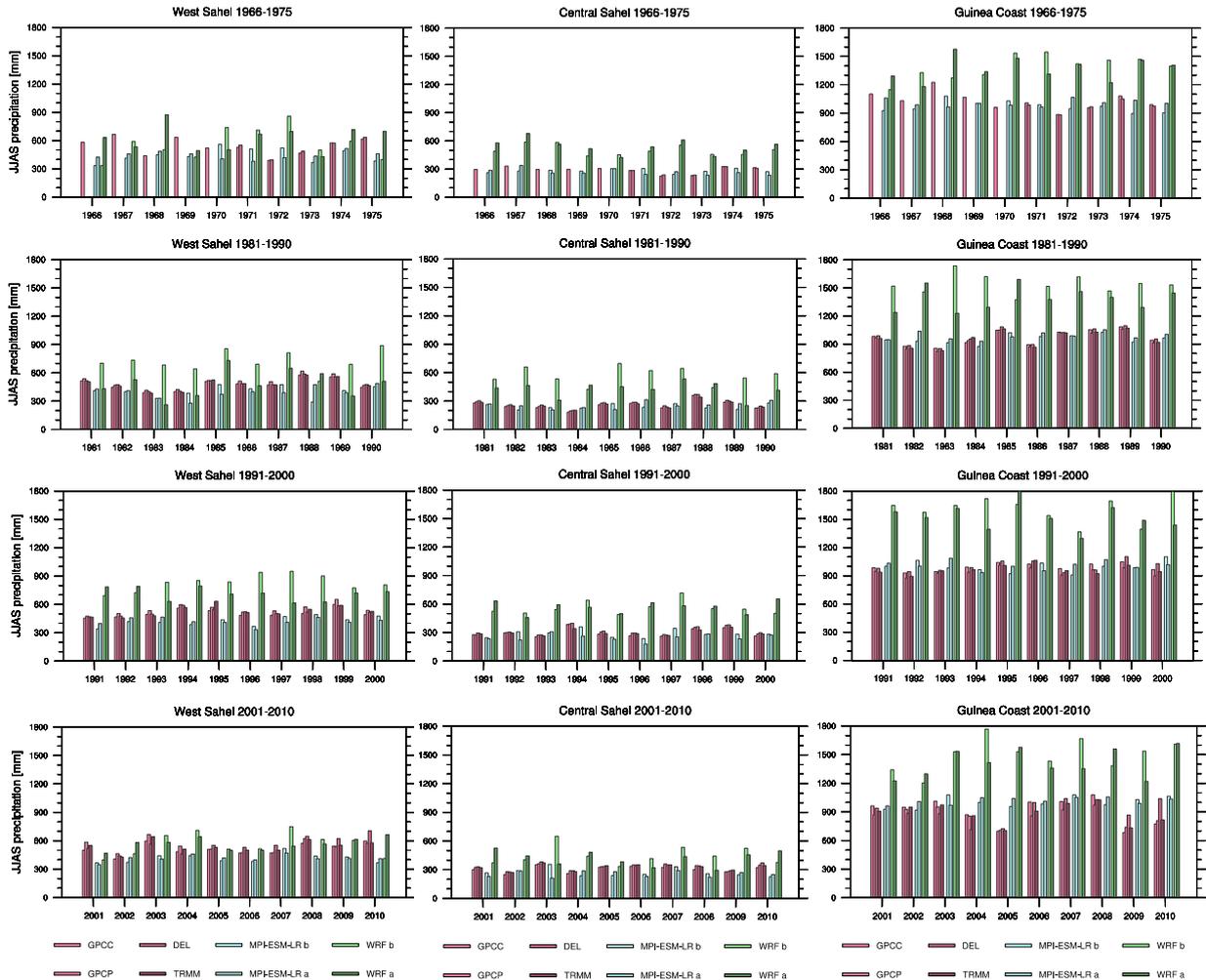


Abb. VIII.7: Sommerniederschläge (JJAS) in den dekadischen Hindcasts für alle simulierte Dekaden (von oben nach unten: 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) und die drei Auswerteregionen (von links nach rechts: Westsahel, Zentralsahel und Guineaküste). Dargestellt sind jeweils die beste (a) und schlechteste Realisation (b) des globalen (MPI-ESM-LR) und regionalen (WRF) Modells, sowie die jeweils verfügbaren Beobachungsdatensätze.

#### VIII.4. Weitere Randbedingungen

Um den Einfluss weiterer Randbedingungen auf die dekadische Vorhersagbarkeit zu untersuchen, wurden verschiedene Testsimulationen durchgeführt. Die Aerosol Optische Dichte von Tanré wurde durch die neuere Version von AeroCom substituiert (CCLM-AOD) und die MPI-ESM SSTs zusätzlich durch ERA40/ERA-Interim SSTs ersetzt (CCLM-AOD/SST). Eine optimierte Initialisierung von Bodentemperatur und -feuchte wurde eingeführt (CCLM-SOIL) und das SVAT-Modul TERRA\_ML durch die neuere Version VEG3D substituiert (CCLM-VEG). Die jährlich konstanten Landnutzungsklassen von ECOCLIMAP wurden durch GLC2000 ersetzt (CCLM-LUC) und durch ein statistisches Modell zusätzlich die jährliche Variabilität der Landnutzung ergänzt (CCLM-LUV). Das Modellsystem WRF wurde ersten Sensitivitätstest bezüglich der Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre unterzogen, um deren Einfluss auf die Simulation des Niederschlags zu untersuchen. Die Implementierung dynamischer Landnutzungsinformation in das Modellsystem wurde für das Modell WRF vorbereitet. Die hierfür nötigen jährlichen Felder der Landnutzung wurden von der DEPARTURE Gruppe (Universität Köln) bereitgestellt. Hierzu wurde ein NCL-Skript geschrieben, das die Standard-Landnutzungskarte des Modells (USGS Land Use/Land Cover

System, aus AVHRR Satellitendaten 1992/1993) modifiziert. In einem ersten Ansatz wurden die GLCC-basierten Landnutzungsszenarien (Universität Köln) für die Nutzung mit WRF in USGS-Klassen transferiert (Abb. VIII.8). Der volle Umfang an dekadische Simulationen mit den veränderten Randbedingungen wurde im DEPARTURE-Konsortium aufgrund begrenzter Rechen- und Zeitressourcen nicht durchgeführt. Die Ergebnisse aus der koordinierten Untersuchung der Randbedingungen sind ausführlich im Projektbericht der Universität Würzburg dargestellt.

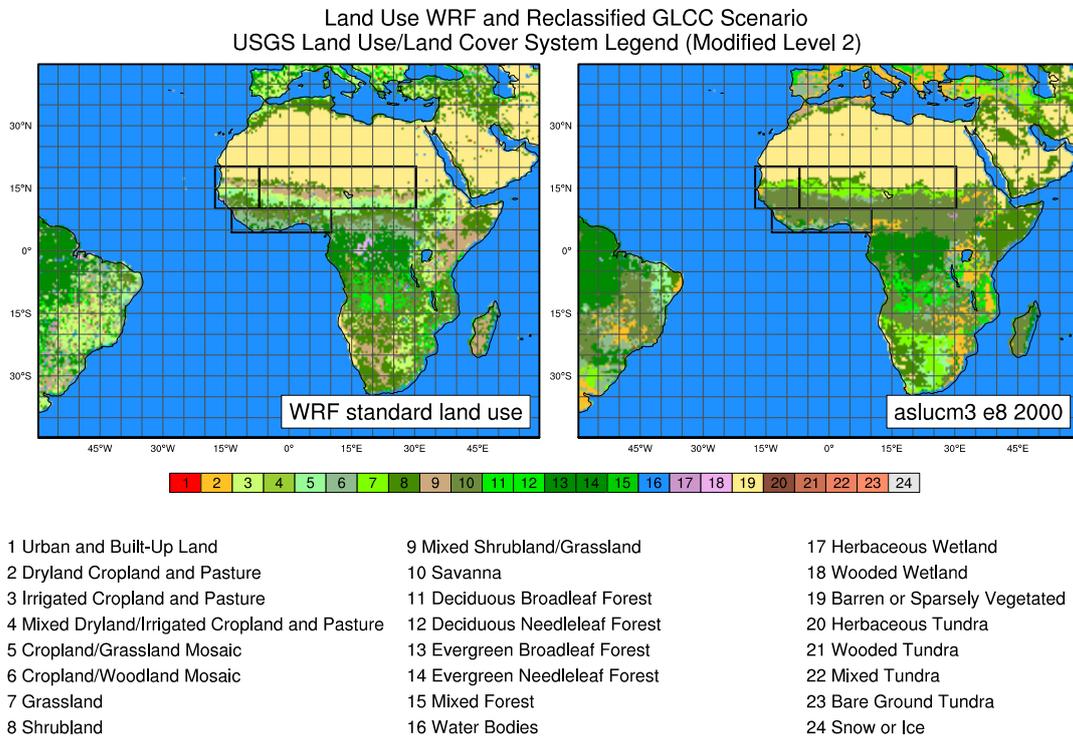


Abb. VIII.8: WRF Landnutzungskarte (USGS Land Use/Land Cover System, aus AVHRR Satellitendaten 1992/1993) links und reklassifizierte Landnutzung aus einem DEPARTURE-Szenario rechts (aslucm3 e8 2000).

### VIII.5. Post-Prozessierung und Archivierung

Im Rahmen des MiKlip-Modul C (Regionalisierung) wurde beschlossen, die wichtigsten Variablen aus allen Simulationen zentral auf dem MiKlip-Server am DKRZ zu speichern und so dem MiKlip-Konsortium zur Verfügung zu stellen. Hierfür wurde ein Format gewählt, das an den CMIP-Standard CMOR angelehnt ist. Ein Tool zur Prozessierung von CCLM-Output (CMORlight) wurde hierfür von Hendrik Feldmann entwickelt und bereitgestellt. Das Output-Format des Modells WRF ist jedoch strukturell grundlegend unterschiedlich zum CCLM Modell-Output. Um das CMORlight-Programm auch mit WRF Output-Daten verwenden zu können, wurde ein umfangreiches Postprozessierungstool entwickelt, das den WRF-Output für die Prozessierung mit CMORlight vorbereitet. Dies beinhaltet auch die Interpolation des Modell-Outputs auf definierte Drucklevel, wie es z.B. die folgende Analyse der tropischen Wirbelstürme durch die Projektpartner erfordert.

Es wurden alle durchgeführten Simulationen mit dem neu entwickelten WRF Postprozessor und CMORlight bearbeitet und damit ins CMOR-Format überführt. Zudem wurden in diesem Rahmen die U- und V-Windvektoren auf die Drucklevel 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200 hPa interpoliert und den Projektpartnern zur Analyse der Wirbelsturm-Reproduktion im Modell zur Verfügung gestellt. Alle Läufe wurden im CMOR-Format auf dem MiKlip-Server abgelegt und stehen somit der gesamten MiKlip-Community zur Verfügung (Tab. VIII.7).

Tab. VIII.7: Abgeschlossene Simulationen, abgelegt im CMOR-Format auf dem MiKlip-Server am DKRZ.

<i>Dekade</i>	<i>Realisation</i>	<i>Name</i>
1966-1975	R5	<i>decs4e1965_r5i1p1-LR</i>
1966-1975	R7	<i>decs4e1965_r7i1p1-LR</i>
1981-1990	R5	<i>decs4e1980_r5i1p1-LR</i>
1981-1990	R8	<i>decs4e1980_r8i1p1-LR</i>
1991-2000	R3	<i>decs4e1990_r3i1p1-LR</i>
1991-2000	R9	<i>decs4e1990_r9i1p1-LR</i>
2001-2010	R4	<i>decs4e2000_r4i1p1-LR</i>
2001-2010	R5	<i>decs4e2000_r5i1p1-LR</i>

## IX. Literaturverzeichnis

- Balsamo, G., C. Albergel, A. Beljaars, S. Boussetta, E. Brun, H. Cloke, D. Dee, E. Dutra, J. Muñoz-Sabater, F. Pappenberger, P. de Rosnay, T. Stockdale, and F. Vitart (2015): ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 389-407, doi: 10.5194/hess-19-389-2015.
- Bartholomé, E. and Belward, A. (2005): GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int. J. Rem. Sens.* 26, 1959-1977.
- Bellucci, A., R. Haarsma, N. Bellouin, B. Booth, C. Cagnazzo, B. Van den Hurk, N. Keenlyside, T. Koenigk, F. Massonnet, S. Materia and M. Weiss (2015): Advancements in decadal climate predictability: the role of non-oceanic drivers. *Reviews of Geophysics*, 53, 165-202, doi:10.1002/2014RG000473.
- Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. J. Majumdar (2001): Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 420–436.
- Champeaux, J.L., V. Masson and Chauvin, F. (2005): ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1km resolution. *Meteorol. Appl.* 12, 29-32
- Cook, K.H. and Vizzy, E.K. (2015): The Congo Basin Walker circulation: dynamics and connections to precipitation. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-015-2864-y.
- Dee, D.; Uppala, S.; Simmons, A.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.; Balsamo, G.; Bauer, P. and others (2011): The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597.
- Defourny, P., Vancutsem, C., Bicheron, P., Brockmann, C., Nino, F., Schouten, L. and Leroy, M. (2006): GLOBCOVER: a 300 m global land cover product for 2005 using Envisat MERIS time series. In: ISPRS Commission VII Mid-term Symposium: Remote Sensing: From Pixels to Processes, Enschede, Netherlands.

- Doms, G. et.al. (2011): A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model, Part II: Physical Parameterization. <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>
- Dorigo, W. A., A. Gruber, R. A. M. De Jeu, W. Wagner, T. Stacke, A. Loew, C. Albergel, L. Brocca, D. Chung, R. M. Parinussa and R. Kidd (2014): Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 162, 380-395, doi: 10.1016/j.rse.2014.07.023
- Evensen, G. (1994): Sequential data assimilation with a nonlinear quasigeostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, 99, 10143-10162.
- Flaounas, E.; Bastin, S. and Janicot, S. (2011): Regional climate modelling of the 2006 West African monsoon: sensitivity to convection and planetary boundary layer parameterisation using WRF, *Climate Dynamics*, 36, 1083-1105.
- Goddard, L. et al. (2013): A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Clim. Dyn.*, 40, 245-272.
- Hunt, B. R., E. Kostelich, and I. Szunyogh (2007): Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112–126.
- Hupet, F., S. Lambot, R. A. Feddes, J. C. van Dam and M. Vanclooster (2003): Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resources Res.*, 39, 1312.
- Kinne, S., Schulz, M., Textor, C., Guibert, S., Balkanski, Y., Bauer, S. E., Tie, X. (2006): An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(7), 1815–1834. Doi:10.5194/acp-6-1815-2006
- Kirchgessner, P., J. Tödter, L. Nerger and B. Ahrens (2015): Extension of the nonlinear ensemble transform filter to smoothing problems. In preparation.
- Kothe, S., J. Tödter and B. Ahrens (2015): Strategies for soil initialisation of regional decadal climate predictions. *Met. Z.*, submitted.
- Kothe, S., H.-J. Panitz and B. Ahrens (2014). Analysis of the radiation budget in regional climate simulations with COSMO-CLM for Africa. *Met.Z.*, 23(2), 123-141.
- Kumar, S. et.al. (2008), A land surface data assimilation framework using the land information system: Description and applications, *Adv. Water Res.*, 26, 1419-1432.
- Lei, J. and P. Bickel (2011): A moment matching ensemble filter for nonlinear non-Gaussian data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 3964–3973.
- Lorenz, C.; Kunstmann, H. (2012): The Hydrological Cycle in Three State-of-the-art Re-analyses: Intercomparison and Performance Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 1397–1420.
- Lorenz, E. N., 2005: Designing chaotic models. *J. Atmos. Sci.*, 62, 1574–1587.
- Mitchell, K. E. et al. (2004): The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system, *J. Geophys. Res.*, 109.
- Lorenz, Edward N. (1963): Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130–141.
- Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, D.O., Zhu, Z., Yang, L. and Merchant, J.W. (2000): Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 21, 1303-1330.
- Loveland, T.R. and Belward, A. (1997): The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: First results. *Int. J. Remote Sens.* 18, 3289-3295.

- Manganello, J.V. et al. (2012) Tropical Cyclone Climatology in a 10-km Global Atmospheric GCM: Toward Weather-Resolving Climate Modeling. *J. of Climate*, 25, 3867-3893
- Masson, V., J.-L. Champeaux, Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R. (2003): A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *J. Climate* 16, 1261-1282.
- Mayaux, P., Bartholomé, E., Fritz, S. and Belward, A. (2004): A new land-cover map of Africa for the year 2000. *J. Biogeogr.* 31, 861-877.
- Nerger, L. and Hiller, W. (2013). Software for Ensemble-based Data Assimilation Systems - Implementation Strategies and Scalability. *Computers and Geosciences*, 55, 110-118.
- Ott, E., et al. (2004): A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Tellus*, 56A, 415–428.
- Paeth, H., A. Paxian, D. Sein, T. Brücher, D. Jacob, H.-J. Panitz, M. Warscher, A. Fink, H. Kunstmann, M. Breil, A. Krause, K.-O. Heuer, J. Tödter, B. Ahrens, and T. Engel (2015): Decadal predictability of the West African monsoon and the added value of dynamical downscaling. *Climate Dyn.*, submitted.
- Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R. and Jacob, D. (2009): Regional Climate Change in Tropical and Northern Africa due to Greenhouse Forcing and Land Use Changes. *J. Clim.* 22, 114-132.
- Parrens, M., J.-F. Mahfouf, A. L. Barbu, and J.-C. Calvet (2014): Assimilation of surface soil moisture into a multilayer soil model: design and evaluation at local scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 673-689.
- Pena, M., E. Kalnay (2004): Separating fast and slow modes in coupled chaotic systems. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 319–327.
- Ramankutty, N. and Foley, J.A. (1999): Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochem. Cy.* 13, 997-1027.
- Ratnam, J.V., Giorgi, F., Kaginalkar, A., Cozzini, S. (2008) Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model. *Clim. Dyn.* 33, 119-139.
- Rebel, K.T. et.al. (2012), „A global analysis of soil moisture derived from satellite observations and a land surface model“, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 833-847.
- Schelle, H., W. Durner, S. C. Iden, J. Frank (2013): Simultaneous Estimation of Soil Hydraulic and Root Distribution Parameters from Lysimeter Data by Inverse Modeling. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 564–573.
- Schulz, J.-P., G. Vogel, C. Heret, B. Ahrens (2015): The ground heat flux simulated by the COSMO land surface scheme TERRA. *Met.Z.*, in revision.
- Sein, D. V., U. Mikolajewicz, M. Gröger, I. Fast, W. Cabos, J. G. Pinto, S. Hagemann, T. Semmler, A. Izquierdo, and D. Jacob (2015), Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7, 268–304
- Snyder, C., T. Bengtsson, P. Bickel, and J. L. Anderson (2008): Obstacles to high-dimensional particle filtering. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 4629–4640.
- Sun, A. Y., A. Morris, and S. Mohanty (2009): Comparison of deterministic ensemble Kalman filters for assimilating hydrogeological data. *Adv. Water Resour.*, 32, 280–292.
- Tanré, D., Geleyn, J.-F, and Slingo, J. M. (1984): First results of the introduction of an advanced aerosol-radiation interaction in the ECMWF low resolution global model. In H. E. Gerber and A. Deepak (Eds.), *Aerosols and Their Climatic Effects* (pp. 133–177). A. Deepak Publ., Hampton, Va.
- Tödter, J. and B. Ahrens (2015): A Second Order Exact Ensemble Square Root Filter for Nonlinear Data Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 1347-1367.

- Tödter, J., P. Kirchgessner, L. Nerger and B. Ahrens (2015): Assessment of a nonlinear ensemble transform filter for high-dimensional data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, under review.
- Tödter, J. (2015): Derivation and Characterization of a New Filter for Nonlinear High-Dimensional Data Assimilation. PhD Thesis, Institute for Atmospheric and Environmental Sciences, Goethe University, Frankfurt/Main.
- van Leeuwen, P. J. (2010): Nonlinear data assimilation in geosciences: An extremely efficient particle filter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1991–1999.
- Weedon, G.P., G. Balsamo, N. Bellouin, S. Gomes, M. J. Best and P. Viterbo (2014): The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9), 7505-7514.
- Willmott, C. J., Matsuura, K., and Legates, D.R. (1998): Global air temperature and precipitation regrided monthly and annual climatology. Available online at <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>
- Yan, Y., A. Barth, and J. M. Beckers (2014): Comparison of different assimilation schemes in a sequential Kalman filter assimilation system. *Ocean Modelling*, 73, 123–137.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Verbundschlussbericht
3. Titel Verbundschlussbericht  Verbundvorhaben: Dekadische Klimavorhersage in der Westafrikanischen Monsunregion und in der Zyklogeneseregion des tropischen Atlantiks (DEPARTURE)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Andreas Paxian, Prof. Dr. Heiko Paeth Dr. Dmitry Sein, Prof. Dr. Daniela Jacob Thomas Engel, Prof. Dr. Andreas Fink Dr. Julian Tödter, Prof. Dr. Bodo Ahrens Dr. Marcus Breil, Dr. Hans-Jürgen Panitz Dr. Michael Warscher, Prof. Dr. Harald Kunstmann	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2015
	6. Veröffentlichungsdatum Februar 2016
	7. Form der Publikation Technische Informationsbibliothek (TIB)
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Geographie und Geologie, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPIM), Bundesstr. 53, 20146 Hamburg Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, Kerpener Str. 13, 50937 Köln Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe Universität Frankfurt/Main, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt/Main Institut f. Meteorologie & Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe Institut f. Meteorologie & Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 01LP1129A-F
	11. Seitenzahl 78
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 52
	14. Tabellen 13
	15. Abbildungen 58
16. Zusätzliche Angaben ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) ---	
18. Kurzfassung Die dekadische Vorhersagbarkeit des westafrikanischen Monsun (WAM)-Niederschlags wird beeinflusst durch Ozeantemperaturen (Paeth und Hense 2004), Vegetation (Alo and Wang 2010), Landnutzungsänderungen (Paeth et al. 2009) und die Initialisierung der Bodenfeuchte (Moufouma-Okia and Rowell 2010). Multi-Modell-Ensemblemittel von Regionalmodellen (RCMs) können den WAM-Niederschlagsbias der globalen Antriebsdaten verbessern (Nikulin et al. 2012). RCMs können außerdem die Entstehung und Zugbahn tropischer Wirbelstürme simulieren (Gaertner et al. 2007). Das Projekt DEPARTURE beabsichtigt, die dekadische Vorhersagbarkeit des WAMs und der atlantischen Hurrikanaktivität (AHA) zu ermitteln. Dabei wird der Added Value eines Multimodell-Ensembles von RCMs und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen (Ozean, Aerosole, Landnutzung, Vegetation, Boden) gegenüber dem antreibenden Globalmodell untersucht. 104 transiente Simulationen der RCMs CCLM, WRF und REMO mit globalem MPI-ESM-Antrieb und verbesserten Anfangs- und Randbedingungen wurden als 3-Member-Ensembles für die Dekaden 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 und 2001-2010 realisiert. Das Multi-Modell-Ensemble wurde bezüglich Bias und Vorhersagbarkeit (Korrelation) von WAM-Niederschlag und AHA zu Beobachtungen ausgewertet. Es zeigen sich Added Values einiger RCMs und verbesserter Anfangs- und Randbedingungen beim Bias von WAM-Niederschlag und AHA gegenüber MPI-ESM konsistent über alle Dekaden, vor allem durch regionale Ozeankopplung. Bei der dekadischen Vorhersagbarkeit ergeben sich ebenso einige Added Values, allerdings stark abhängig von den ausgewählten Dekaden. Daher sollten mehr Dekaden gerechnet werden, um die statistische Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen. Diese Ergebnisse tragen zur Entwicklung eines dekadischen Vorhersagesystems für WAM-Niederschlag und AHA bei, welches von westafrikanischen und amerikanischen Institutionen für das Risikomanagement von Nahrungsmittel-Produktion und Hurrikan-Schäden eingesetzt werden kann (Quellenangaben finden sich im Literaturverzeichnis des Verbundschlussberichtes).	
19. Schlagwörter Dekadische Vorhersage, westafrikanischer Monsun, Niederschlag, tropische Zyklonen, Meeresoberflächentemperaturen, Bias, Vorhersagbarkeit, regionale Klimamodellierung, Ozeankopplung, Randbedingungen, Bodeninitialisierung	
20. Verlag ---	21. Preis ---

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report for the 'Verbundprojekt'
3. title Verbundschlussbericht  Verbundvorhaben: Dekadische Klimavorhersage in der Westafrikanischen Monsunregion und in der Zykloneseregion des tropischen Atlantiks (DEPARTURE)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Andreas Paxian, Prof. Dr. Heiko Paeth Dr. Dmitry Sein, Prof. Dr. Daniela Jacob Thomas Engel, Prof. Dr. Andreas Fink Dr. Julian Tödter, Prof. Dr. Bodo Ahrens Dr. Marcus Breil, Dr. Hans-Jürgen Panitz Dr. Michael Warscher, Prof. Dr. Harald Kunstmann	5. end of project August 2015  6. publication date February 2016  7. form of publication Technische Informationsbibliothek (TIB)
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Geography and Geology, University of Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg Max-Planck-Institute for Meteorology (MPIM), Bundesstr. 53, 20146 Hamburg Institute of Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Kerpener Str.13,50937 Cologne Institute for Atmospheric and Environmental Sciences, Goethe University Frankfurt/Main, Al-tenhöferallee 1, 60438 Frankfurt/Main Institute of Meteorology & Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe Institute of Meteorology & Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Kreuzteckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen	9. originator's report no. ---  10. reference no. 01LP1129A-F  11. no. of pages 78
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 52  14. no. of tables 13  15. no. of figures 58
16. supplementary notes ---	
17. presented at (title, place, date) ---	
18. abstract The decadal predictability of the West African monsoon (WAM) rainfall is influenced by ocean temperatures (Paeth und Hense 2004), vegetation (Alo and Wang 2010), land use changes (Paeth et al. 2009) and soil moisture initialization (Moufouma-Okia and Rowell 2010). Multi-model ensemble means of regional climate models (RCMs) can improve the WAM rainfall bias of global forcing data (Nikulin et al. 2012). RCMs can further simulate the development and tracks of tropical cyclones (Gaertner et al. 2007). The project DEPARTURE aims to determine the decadal predictability of the WAM and Atlantic hurricane activity (AHA). The added value of a multi-model ensemble of RCMs and improved initial and boundary conditions (ocean, aerosols, land use, vegetation, soil) with respect to the driving global model is analyzed. 104 transient simulations of the RCMs CCLM, WRF and REMO with global MPI-ESM forcing and improved initial and boundary conditions have been realized as 3-member ensembles for the decades 1966-1975, 1981-1990, 1991-2000 and 2001-2010. The multi-model ensemble has been evaluated in terms of bias and predictability (correlation) of WAM rainfall and AHA compared to observations. Added values of several RCMs and improved initial and boundary conditions with respect to MPI-ESM are found for the bias of WAM rainfall and AHA consistent over all decades, especially for regional ocean coupling. For decadal predictability some added values are stated as well, though strongly depending on the chosen decades. Thus, more decades should be realized to increase the statistical robustness of the results. These results contribute to the development of a decadal prediction system for WAM rainfall and AHA which can be used by West African and American institutions for risk management of food production and hurricane damages (References are found in the reference list of the final report for the 'Verbundprojekt').	
19. keywords decadal prediction, West African monsoon, rainfall, tropical cyclones, sea surface temperatures, bias, predictability, regional climate modeling, ocean coupling, boundary conditions, soil initialization	
20. publisher ---	21. price ---