Abschlussbericht – Teil 1 und 2

Verbundprojekt: Nutzbare Lokale Klimainformationen für Deutschland (NUKLEUS)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Helmholtz-Zentrum Hereon (Hereon, ehemals HZG)	**01LR2002A**
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)	**01LR2002B**
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)	**01LR2002C**
Julius-Maximilians-Universität Würzburg (JMU)	**01LR2002D**
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)	**01LR2002E**
Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU)	**01LR2002F**
Technische Universität Dresden (TUD)	**01LR2002G**

Teilprojekt 1: Klimamodellierung, Online-Diagnostiken und Evaluierung von Grenzschichtwinden und Tagesgängen

Teilprojekt 2: Koordination, Modellierung und Evaluierung der Klimasimulationen

Teilprojekt 3: Analyseinfrastruktur

Teilprojekt 4: Modellevaluierung und Bias-Adjustment

Teilprojekt 5: Konvektionserlaubende Klimaszenarien für Deutschland mit regionalspezifischen Auswertungen

Teilprojekt 6: Hybrid-deterministisch-stochastische Verfahren und Herunterskalierung für Climate Services

Teilprojekt 7: Nutzungsspezifische Schnittstellen für Klimawirkungsmodelle

Laufzeit des Vorhabens:
01.04.2020 – 31.05.2023 (inklusive kostenneutraler Verlängerung vom 1.4.-31.5.2023)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LR2002A-G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dem Einreicher wurde die Nutzung des Sachberichts zum Verwendungsnachweis einschließlich des Kurzberichts von allen Urheberinnen und Urhebern gestattet. Die Erklärungen liegen dem Einreicher vor.

Inhalt

Inhalt 2

Teil 1: Kurzbericht 3

Teil 2: Eingehende Darstellung 5

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse 5

Wissenschaftliches Konzept, Arbeitsprogramm und Struktur des Projektverbundes 6

AP0 – Koordination (Leitung: Hereon, KIT) 6

AP1 – Modellierung (Leitung: BTU) 8

AP2 – Evaluierung und Auswertung (Leitung: KIT) 14

AP3 – Schnittstellen (Leitung: DKRZ) 32

2. Wesentliche Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 41

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten 41

4. Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 42

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 43

6. Publikationen 47

Teil 1: Kurzbericht

Das Verbundprojekt NUKLEUS befasste sich in der ersten Phase der Fördermaßnahme RegIKlim mit der Bereitstellung von nützlichen, nutzbaren und hochaufgelösten Klimainformation für Deutschland und der Verbessrung der Schnittstelle zwischen Klimadaten und der anschließenden Nutzung in z.B. Wirkmodellen für die Anpassung an den Klimawandel. Als Teil der Fördermaßnahme RegIKlim fungierte NUKLEUS zusammen mit der Gesamtkoordination (WIRKsam) als Querschnittsprojekt zu den RegIKlim Modellregionen. Die sechs Modellregionen in RegIKlim repräsentieren in erster Linie Kommunen mit unterschiedlichsten Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel. Die Aufgabe von NUKLEUS in der ersten Förderphase war es, die Modellregionen mit einheitlichen Klimainformationen zur versorgen und erste tragfähige Lösungen für die Schnittstelle zu den Anwendungen in den Kommunen zu entwickeln.

Neben der Synthese existierender Klimadaten aus unterschiedlichen Quellen wurde der Prototyp eines Ensembles mit Simulationen von drei regionalen Klimamodellen und damit das erste multi-dekadische Multi-Klimamodell-Ensemble auf konvektionserlaubender Skala (ca. 3 km horizontale Auflösung) für Deutschland generiert (NUKLEUS-Ensemble). Der Hauptfokus bei der Erstellung des Ensembles lag auf den Anforderungen der Nutzer aus den Modellregionen. In Abstimmung mit Vertretern der Modellregionen wurde ein Simulationsprotokoll entwickelt, um die Bedarfe möglichst optimal zu decken. Die wichtigsten Anforderungen der Modellregionen waren räumlich und zeitlich hochaufgelöste Informationen, die mit den bisher vorhandenen Klimasimulationen (z.B. EURO-CORDEX) häufig nicht erfüllt werden konnten. Da für die sehr aufwendigen konvektionserlaubenden Simulationen nur begrenzte Rechenressourcen vorhanden waren, wurden die Zukunftsperioden für die Klimaänderungssimulationen in Zeitscheiben gerechnet. Darüber hinaus wurde mit Vertretern der Modellregionen Einigung erzielt, dass die Klimaänderungssimulationen über globale Klimaerwärmungsraten abgedeckt werden und nicht wie bisher üblich über feste Zeitscheiben zur Mitte und Ende des 21. Jahrhundert. Dabei wurden die Zeitscheiben in NUKLUES anhand der mittleren globalen Erwärmung der jeweiligen antreibenden globalen Klimasimulation – sogenannte Global Warming Levels (GWL) – um +2°C und +3°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau festgelegt.

Klimasimulationen auf der konvektionserlaubenden Skala waren zu Beginn des Projekts kaum vorhanden und deckten mit ihren Simulationsgebieten in der Regel nicht alle Modellregionen und keine längeren Zeiträume ab. Um die Anschlussfähigkeit an die internationale Gemeinschaft zu gewährleisten und damit einen Beitrag zu den EURO-CORDEX CMIP6 Simulationen zu sicher zu stellen, wurden auch die Anforderungen der EURO-CORDEX Gemeinschaft berücksichtigt.

Da es sich beim NUKLEUS-Ensemble um einen Prototyp handelt, war es wichtig, auch die Qualität der Klimadaten zu bestimmen. In NUKLEUS wurden hierfür 10-jährige (2005-2014) mit ERA5 Reanalyse angetriebene Evaluierungssimulationen durchgeführt und untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Modellergebnisse im Rahmen der zu erwartenden Abweichungen liegen und dass die hochaufgelösten Daten der 3 km Simulationen auf kurzen Zeit- und Raumskalen einen Mehrwert gegenüber den üblichen EURO-CORDEX Simulationen bieten. Eine vertiefte Analyse der Klimaänderungssimulationen wird im Rahmen der zweiten Phase der Fördermaßnahme RegIKlim durchgeführt.

Ein weiteres Ziel von NUKLEUS war die Verbesserung der Schnittstelle zwischen Klimadaten und Wirkmodellen. Dafür wurde in NUKLEUS ein Daten- und Analyseportal (Freva) eingerichtet, dass es u.a. ermöglicht, Daten zu finden und über kleine Programme (Plugins) angepasste Datensätze zu

generieren. Eine zentrale Entwicklung in NUKLEUS ist dabei das Plugin ClimPact, das es ermöglicht entweder vorgegebene oder selbstdefinierte geographische Einheiten auszuwählen und Daten aus Freva passgenau für bestimmte Regionen auszuschneiden und damit nur den wirklich benötigten Teil der Daten herunterzuladen. Ein weiteres in NUKLEUS entwickeltes Plugin (ClimateChangeProfil) erlaubt es, Analysen des Klimaänderungssignals für bestimmte Klimaindikatoren auf nutzerdefinierten Regionen darzustellen.

Zur Verbesserung der Schnittstelle gehören auch Informationen über die Unsicherheiten bestimmter Einflussgrößen bei der Wirkmodellierung und die Reduzierung systematischer Abweichungen der Simulationen vom beobachteten Klima durch z.B. Bias-Korrektur Methoden. So wurden in NUKLEUS die relativen Anteile an der Unsicherheit einzelner Einflussgrößen bei Stadtklimasimulationen systematisch untersucht. Ein wichtiges Ergebnis dabei ist, dass die Bandbreite der Klimainformation nicht immer die wichtigste Größe ist. Auch unzureichende oder veraltete Landnutzungsinformationen können das Klimasignal entscheidend beeinflussen. Dies gilt insbesondere je kleinskaliger die Betrachtung ist.

Um die Daten für eine breitere Masse an Anwendern nutzbar zu machen, wurden in NUKLEUS auch Bias-Korrektur Methoden und eine weitere statistische Verfeinerung von Niederschlagsdaten aus den Simulationen getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Bias-Korrektur prinzipiell zu einer Reduktion der systematischen Fehler führt, aber die Verfügbarkeit hoch-aufgelöster Beobachtungsdaten für die Korrektur eine Herausforderung darstellt. Bei der statistischen Verfeinerung wurden für den Niederschlag besonders in geographisch fein gegliederten Regionen guten Ergebnisse auf sehr hoher Auflösung von 300-500 m erzielt. Die Erkenntnisse der Bias-Korrektur aus der ersten Phase von NUKLUES dienen als Grundlage für Weiterentwicklungen in Phase zwei des Projekts.

Aus den Daten des NUKLEUS-Ensembles lassen sich Klimainformationen in bisher nicht gekanntem Detailgrad ableiten. Ziel ist es, die Daten für die wissenschaftliche Community zur Auswertung und Nutzung bereitzustellen. Da es sich, wie oben bereits erwähnt, um ein erstes Ensemble dieser Art handelt, sollten Ergebnisse aus den Daten intensiv geprüft werden. NUKLEUS rät von einer operationellen Nutzung der Daten zu diesem Zeitpunkt ab, da Aussagen zur Bandbreite der Ergebnisse wegen der geringen Anzahl an Simulationen nicht ohne große Einschränkungen getroffen werden können. Das NUKLEUS-Ensemble ist vielmehr als Anfang einer wachsenden Zahl an Simulationen zu sehen und sollte insbesondere für die Überarbeitung bestehender und Entwicklung neuer Workflows mit Input aus hochaufgelösten Klimadaten dienen.

Teil 2: Eingehende Darstellung

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Das Verbundprojekt NUKLEUS befasste sich in der ersten Phase der Fördermaßnahme RegIKlim vor allem mit der Bereitstellung von nützlichen, nutzbaren und hochaufgelösten Klimainformation für Deutschland in bisher unerreichtem Umfang. Dafür wurde ein Prototyp eines Ensembles mit Simulationen regionaler Klimamodelle zusammengestellt und das erste multi-dekadische Multi-Klimamodell-Ensemble auf konvektionserlaubender Skala (ca. 3 km horizontale Auflösung) für Deutschland generiert (NUKLEUS-Ensemble).

Der Hauptfokus bei der Erstellung des Ensembles lag auf den Anforderungen der Nutzer, die in der Fördermaßnahme RegIKlim in Modellregionen organisiert sind. In Abstimmung mit Vertretern der Modellregionen wurde ein Simulationsprotokoll entwickelt, um die Bedarfe der Modellregionen möglichst optimal zu decken. Die wichtigsten Anforderungen der Modellregionen waren räumlich und zeitlich hochaufgelöste Informationen, die mit den bisher vorhandenen Klimasimulationen (z.B. EURO-CORDEX) häufig nicht erfüllt werden konnten. Klimasimulationen auf der konvektionserlaubenden Skala waren zu Beginn des Projekts kaum vorhanden und deckten mit ihren Simulationsgebieten in der Regel nicht alle Modellregionen und keine längeren Zeiträume ab. Insgesamt wurden in NUKLEUS 51 regionale Klimasimulationen erstellt, aufbereitet und archiviert.

Da es sich beim NUKLEUS-Ensemble um einen Prototyp handelt, war es wichtig, auch die Qualität der Klimadaten zu bestimmen. In NUKLEUS wurden hierfür Evaluierungssimulationen durchgeführt und untersucht. Eine Analyse der Klimaänderungssimulationen wird im Rahmen der zweiten Phase der Fördermaßnahme RegIKlim durchgeführt.

Ein weiteres Ziel war die Verbesserung der Schnittstelle zwischen Klimadaten und Wirkmodellen. Dafür wurde in NUKLEUS ein Daten- und Analyseportal (Freva) eingerichtet, dass es u.a. ermöglicht, Daten zu finden und über kleine Programme (Plugins) angepasste Datensätze für Regionen und/oder Wirkmodelle zu generieren. Zur Verbesserung der Schnittstelle gehört auch die Anwendung von Bias-Korrektur Methoden, um die Daten für eine breitere Masse an Anwendern nutzbar zu machen. NUKLEUS hat in der ersten Phase Methoden der Bias-Korrektur auch im Zusammenhang mit der weiteren Verfeinerung der Ergebnisse getestet.

Aus den Daten des NUKLEUS-Ensembles lassen sich Klimainformationen in bisher nicht gekanntem Detailgrad ableiten. Ziel ist es, die Daten für die wissenschaftliche Community zur Auswertung und Nutzung bereitzustellen. Da es sich, wie oben bereits erwähnt, um ein erstes Ensemble dieser Art handelt, sollten Ergebnisse aus den Daten intensiv geprüft werden. NUKLEUS rät von einer operationellen Nutzung der Daten zu diesem Zeitpunkt ab, da Aussagen zur Bandbreite der Ergebnisse wegen der geringen Anzahl an Simulationen nicht ohne große Einschränkungen getroffen werden können. Das NUKLEUS-Ensemble ist vielmehr als Anfang einer wachsenden Zahl an Simulationen zu sehen und sollte insbesondere für die Überarbeitung bestehender und Entwicklung neuer Workflows mit Input aus hochaufgelösten Klimadaten dienen.

Wissenschaftliches Konzept, Arbeitsprogramm und Struktur des Projektverbundes

In den folgenden Abschnitten werden die wissenschaftlichen Aktivitäten zur Erreichung der Ziele von NUKLEUS der Struktur des Verbundprojekts folgend (AP0, AP1, AP2, AP3) erläutert.

AP0 – Koordination (Leitung: Hereon, KIT)

Der wesentliche Teil der inhaltlichen Aufgaben in der Koordination bestand in der Vernetzung mit den RegIKlim Modellregionen und anderen für NUKLEUS relevanten Forschungsvorhaben, Organisationen und Verbünden. Außerdem wurden erste Zwischenergebnisse auf Tagungen und Konferenzen vorgestellt und diskutiert.

Die Vernetzung mit den Modellregionen war besonders am Anfang des Projekts wichtig, um die Entwicklung des Simulationsprotokolls für NUKLEUS voranzutreiben. Trotz der Einschränkungen durch die Corona Pandemie konnten alle wesentlichen Aspekte des Protokolls sowohl mit den Modellregionen als auch mit den Vertretern der europäischen WCRP CORDEX (EURO-CORDEX) Community diskutiert werden (siehe unten).

Auf nationaler Ebene wurde das Projekt im Bund-Länder Fachgespräch zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten vorgestellt. Die Runde besteht aus Vertretern des Deutschen Wetterdienstes (DWD), der Bundesanstalt für Gewässerkunde, des Umweltbundesamts und der Landesumweltämter der Bundesländer. Darüber hinaus gab es einen Austausch mit Vertretern des DWD Expertennetzwerks, um Doppelarbeit bei den Simulationen zu vermeiden aber auch Zusammenarbeit bei der Nutzung der Datensätze zu erreichen. Durch unterschiedliche Interessenslagen wurden für die Simulationen mit der konvektionserlaubenden Auflösung von NUKLEUS und DWD leicht unterschiedliche Gebiete gewählt, die im Kerngebiet bezogen auf die Gitterpunkte identisch sind. Damit lassen sich die Ergebnisse auch direkt miteinander vergleichen und beide Ensembles zusammenführen.

NUKLEUS ist im stetigen Austausch mit dem RegIKlim-Projekt WIRKsam, um gegenseitige Unterstützungspotentiale und Wissenslücken zu erkennen. Zu Projektbeginn wurde gemeinsam die AG1, bestehend aus Vertretern der Modellregionen und den NUKLEUS Teilprojekten, gebildet. Im Vorfeld mehrerer Treffen wurde eine Bedarfsabfrage für die Vertreter der Modellregionen erstellt, die u.a. Informationen über benötigte Klimadaten, räumliche und zeitliche Auflösung, Zeitperioden und Klimaszenarien, verwendete Wirkmodelle und angestrebtes Klimainformationsprodukt/Praxisanwendung abfragt. Diese Informationen wurden in NUKLEUS diskutiert und dienten vor allem dazu, den Modellierern für das Simulationsprotokoll für das geplante hochaufgelöste Modellensemble einen generellen Überblick über die Datenbedarfe (Variablen, Zeitperioden, Klimaszenarien) der Modellregionen zu liefern (siehe Abschnitte AP1.1 und AP3.2 und Abbildung 0.1).

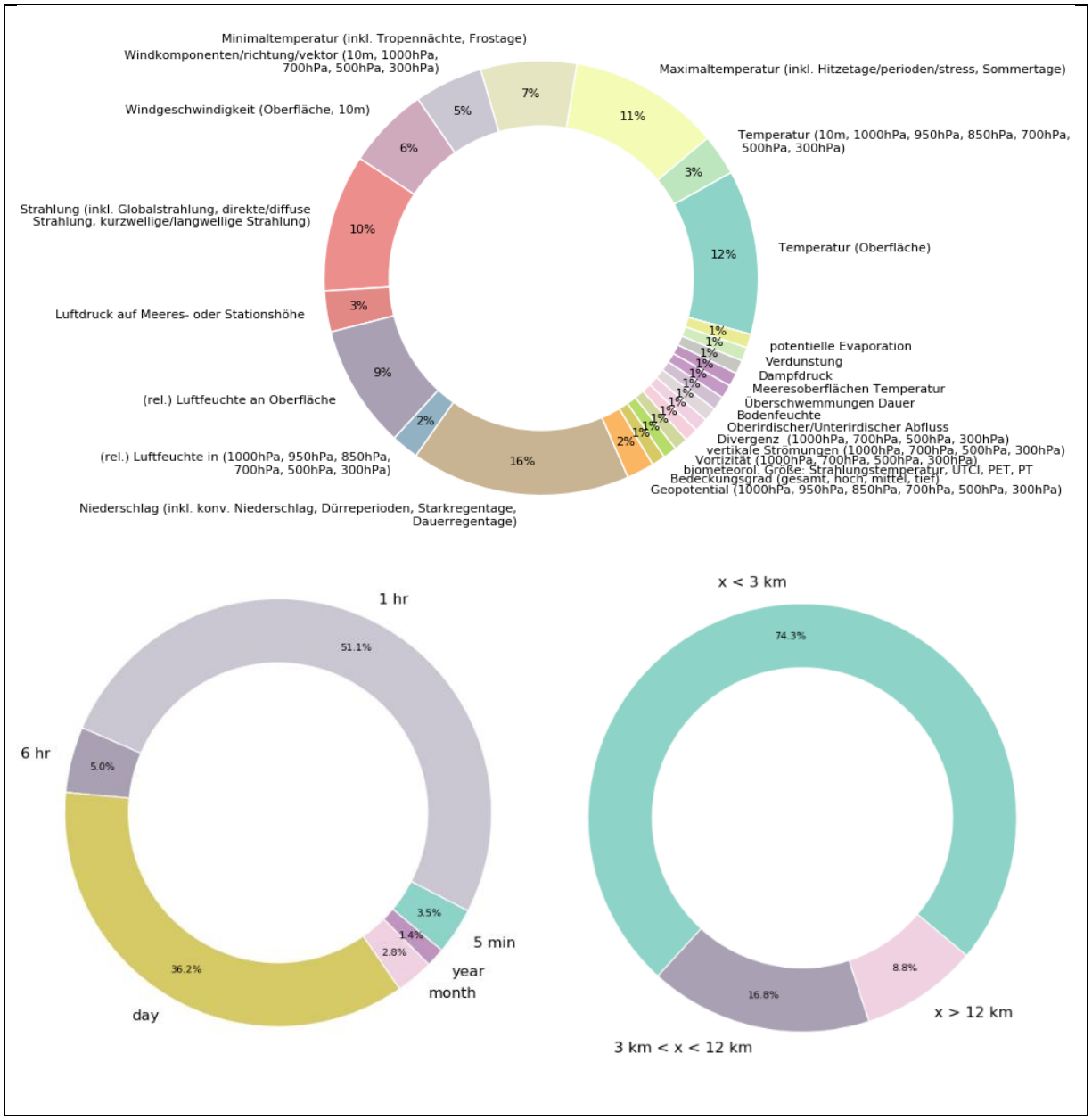


Abbildung 0.1: Ergebnis der Bedarfsabfrage aus den Modellregionen (Anforderungen an regionale Klimamodelldaten): Häufigkeit der genannten Größen (oben), zeitlichen Auflösung (unten links) und räumlichen Auflösung (unten rechts).

Darüber hinaus wurde in NUKLEUS gemeinsam mit WIRKsam die Grundidee für ein prototypisches Klimakataster diskutiert und visualisiert, was als Basis für erste Entscheidungsfindungen und weitere Arbeiten in der zweiten Förderphase RegiKlim dienen wird. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei, dass während der zweiten Förderphase ein erster Prototyp basierend auf den Arbeiten der ersten Phase und insbesondere der Dateninfrastruktur entsteht. Hauptfokus sind hier die Schnittstellen zu den Anwendungen der Modellregionen. Parallel wird in der zweiten Förderphase ein Verstetigungskonzept erstellt, in das dann wichtige Aspekte wie zusätzliche Nutzerbedarfe und die Einbindung in die vorhandene Landschaft an Klimainformationsportalen einfließen.

AP1 – Modellierung (Leitung: BTU)

Erstes Ziel von AP1 war die Sammlung geeigneter Klimasimulationen für die Modellregionen von bestehenden und laufenden vorhaben, um die Modellregionen frühzeitig mit ersten Klimadaten zu versorgen. Ein zweites wichtiges Ziel war die Abstimmung eines Simulationsprotokoll mit den Modellregionen und die Durchführung von Klimaänderungssimulationen auf bisher nicht erreichter Auflösung basierend auf den aktuellen Klimaänderungsszenarien aus CMIP6.

AP1.1 Simulationsprotokoll (BTU, Hereon)

Ein wesentliches Ziel des Projektes ist die Erzeugung und Bereitstellung von hochaufgelösten, konvektionserlaubenden Klimasimulationen für Deutschland mit drei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen, nämlich ICON-CLM, COSMO-CLM (CCLM) und REMO. Da die Simulationen ein homogenes Ensemble repräsentieren sollen, mussten die Konfigurationen der Modellgebiete und der durchzuführenden Simulationen eng aufeinander abgestimmt und an die Möglichkeiten der eingesetzten Regionalmodelle angepasst werden. Dabei waren insbesondere die Anforderungen aller an der Fördermaßnahme RegIKlim beteiligten Modellregionen, die primäre Nutzer der Simulationsergebnisse sind, zu berücksichtigen. Dazu wurde zunächst der Datenbedarf von allen Modellregionen abgefragt (siehe AP3.2, AP0). Dann wurden Ausgabeumfang und Simulationskonfigurationen in insgesamt vier Workshops mit Vertretern der Modellregionen unter Beteiligung von NUKLEUS-AP3 diskutiert, und abschließend die Grundzüge des Simulationskonzeptes festgelegt. Weitere Details des Simulationsprotokolls wurden in zwei Workshops der an NUKLEUS-AP1 beteiligten Partner ergänzt, auf einer projektinternen Wiki Seite dokumentiert und kontinuierlich aktualisiert. Zusätzlich zu den Anforderungen der Modellregionen flossen auch die zu diesem Zeitpunkt noch in der Diskussion befindlichen Pläne des internationalen EURO-CORDEX Projektes zur Regionalisierung der neuen globalen CMIP6 Klimasimulationen für Europa in das Simulationsprotokoll ein. Um die hochaufgelösten regionalen Klimasimulationen besser an die antreibenden globalen Simulationsergebnisse anzupassen, war eine Zwischennestungsstufe erforderlich, bei der mit den gleichen Modellen regionalen Simulationen auf einem größeren Gebiet mit einer vierfach gröberen als im eigentlichen Zielgebiet vorgegebenen Auflösung durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Zwischennestungsstufe dienten dann als Antrieb für die hochaufgelösten Regionalsimulationen über Deutschland. Die getroffenen Vereinbarungen wurden in einem Simulationsprotokoll schriftlich fixiert und an alle an RegIKlim beteiligten Gruppen verteilt. Die wesentlichen Punkte dieses Simulationsprotokolls sind nachfolgend aufgeführt.

1. Modellgebiet und Auflösung

Zentrales Modellgebiet ist eine Region in Mitteleuropa (CEU-3), das Deutschland, den angrenzenden Alpenraum und Küstenregionen an Nord- und Ostsee umfasst. Die horizontale Auflösung der Simulationen liegt bei rund 3 km. Die Simulationen der Zwischennestungsstufe erfolgen auf dem EURO-CORDEX Gebiet (EUR-11) mit einer Auflösung von ca. 12 km. Die beiden Modellgebiete sind in Abb.1.1.1 dargestellt.

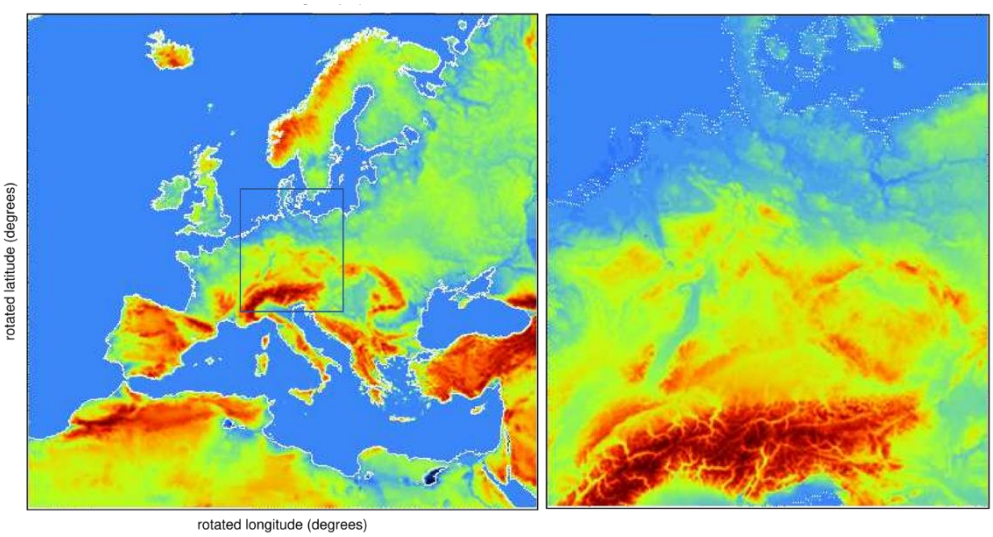


Abbildung 1.1.1: In NUKLEUS verwendete Modellgebiete EUR-11 (links) und CEU-3 (rechts).

2. Regionalmodelle

Die Simulationen wurden mit den aktuellen Versionen der im Projekt verfügbaren Regionalmodelle durchgeführt: CCLM 6.0, IOCN-CLM 2.6.5, REMO2020. Nähere Details zur Konfiguration der Modelle finden sich in Sieck et al. (2023)

3. Simulationen

Die Evaluierungssimulationen werden durch ECMWF Reanalysen ERA5 (Hersbach et al., 2020) angetrieben. Die Klimaänderungssimulationen basieren auf den aktuellen Globalmodellsimulationen aus CMIP6 und werden durch drei Modelle MPI-ESM1-2-HR, EC-Earth3-veg und MIROC6, jeweils in der Realisierung r1i1f1p1, angetrieben (zu ihrer Auswahl siehe „Analyse und Bewertung vorhandener Klimasimulationen“ unter AP2.1). Das simulierte Klimaszenario ist das SSP3-7.0. Die EUR-11 Simulationen werden transient, also zusammenhängend über den gesamten zu simulierenden Zeitraum, die CEU-3 Simulationen in getrennten 30-jährigen Zeitscheiben durchgeführt. Die Zeitscheiben werden anhand der mittleren globalen Erwärmung der jeweiligen globalen Klimasimulation – sogenannte Global Warming Levels (GWL) – um +2°C und +3°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau festgelegt. Abb. 1.1.2 zeigt den Verlauf der globalen Erwärmung der drei ausgewählten Modelle ab dem Referenzzeitraum 1969-1990, Tab. 1.1.1 listet die 30-jährigen Perioden auf, die den GWLs der jeweiligen Globalmodelle entsprechen.

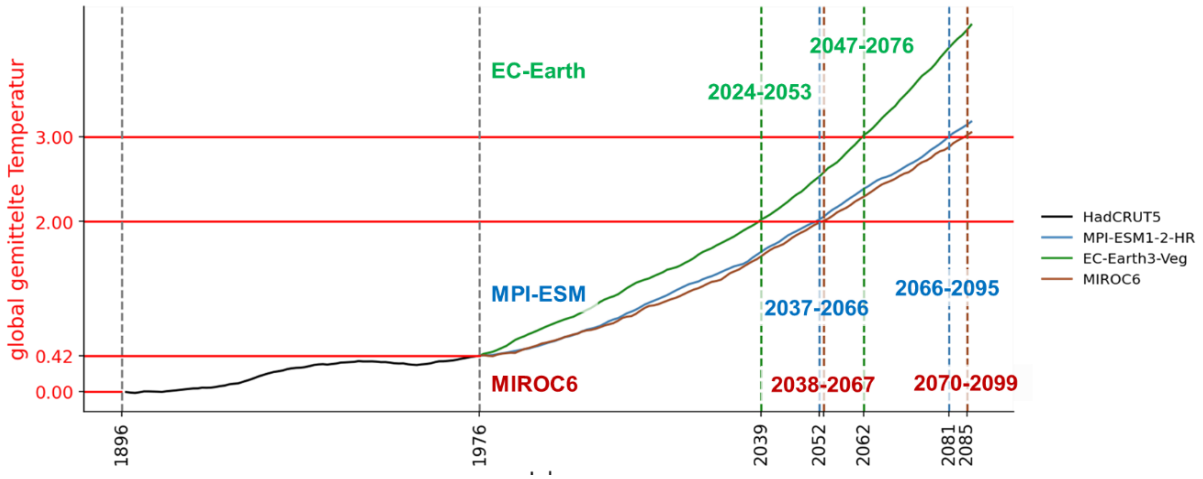


Abbildung 1.1.2: Zentrale Jahre mit 30-jährigen Zeiträumen der beiden global gemittelten Temperaturschwelle (GWL) +2 und +3 °C für die in NUKLEUS ausgewählten Globalmodelle.

Tabelle 1.1.1: Referenzjahre und Perioden für die 2°C und 3°C Temperaturschwellen der in NUKLEUS genutzten Globalmodelle.

	MPI-ESM1-2-HR	EC-EARTH3-VEG	MIROC6
2°C	2052	2039	2053
2°C PERIODE	2037-2066	2024-2053	2038-2067
3°C	2081	2062	2085
3°C PERIODE	2066-2095	2047-2076	2070-2099

4. Modellausgabe

Die Modellausgabe umfasst in den CEU-3 bzw. EUR-11 Simulationen insgesamt 135 bzw. 160 Variablen in stündlicher, dreistündiger, sechsstündiger oder täglicher Auflösung, entsprechend den Anforderungen aus den Modellregionen und aus EURO-CORDEX. Die Daten werden statistisch weiter aufbereitet und in einem einheitlichen, international standardisierten netCDF Format über die Freva-Datenbank (siehe AP3.1) zur Verfügung gestellt.

AP1.2 Bereitstellung existierender Daten für die Modellregionen (BTU, Hereon, KIT)

Bevor die in NUKLEUS neu erstellten Klimasimulationen über die Freva Datenbank zur Verfügung gestellt werden konnten, bestand bei den Projekten in den Modellregionen der Bedarf, ihre ersten Studien zu Testzwecken mit bereits verfügbaren „älteren“ Regionalsimulationen durchzuführen. Dazu wurde der bereits in Freva verfügbare Datenbestand durch die Projektpartner eingehend auf Vollständigkeit geprüft und durch weitere Simulationen bzw. Datensätze mit den Modellen CCLM und REMO aus anderen Projekten ergänzt.

Tabelle 1.2.1: In Freva bereitgestellte Ergebnisse regionaler Klimasimulationen aus vorangegangenen Projekten.

NUKLEUS-Partner	BTU	BTU	KIT	KIT	Hereon
Simulations-ensemble	Euro-Cordex & ReKliES-DE	FPS-Convection	Euro-Cordex	FPS-Convection	EUCP
Modell	CCLM	CCLM	CCLM	CCLM	REMO
Gebiet	Europa	Mittel- bis Süd-deutschland & Alpenraum	Europa	Mittel- bis Süd-deutschland & Alpenraum	Mitteleuropa mit Deutschland
Auflösung	12 km	3 km	12 km	3 km	3 km
Szenarien	RCP2.6, RCP4.5 RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5
Zahl der Simulationen	12	3	2	3	1
Zeiträume	1960 - 2099	1996-2005 2041-2050 2090-2099	1960 - 2099	1996-2005 2041-2050 2090-2099	1996-2005 2041-2050

Da die Modellregionen insbesondere Bedarf an zeitlich hochaufgelösten Niederschlags- und Temperaturdaten haben, wurden speziell diese Felder, neben einigen anderen, aus den Archiven am DKRZ oder bei den Projektpartnern extrahiert, aufbereitet und NUKLEUS-AP3 zur Integration in das Freva-System zur Verfügung gestellt. Hierzu zählten neben den drei- bzw. sechsstündlich aufgelösten Datenfeldern der EURO-CORDEX Simulationen auch Ergebnisse des ebenfalls vom BMBF finanzierten Projektes ReKliEs-DE, sowie räumlich und zeitlich noch höher aufgelöste Datenreihen der EURO-CORDEX Flagship Pilot Study (FPS) Convection und des European Climate Prediction System (EUCP) für europäische Teilregionen. Die von den Projektpartnern insgesamt bereitgestellten Simulations-ergebnisse sind in Tab. 1.2.1 zusammengefasst.

AP1.3 Dynamische Multimodell Simulationen zur Generierung von hochaufgelösten Klimadaten (BTU, Hereon, KIT)

Durch die Auswirkungen der Corona Pandemie und die verzögerte Bereitstellung des neuen HPC System Levante am DKRZ konnten nicht alle Klimaänderungssimulationen bis Projektende fertig gestellt und ausgewertet werden. Die fehlenden Simulationen werden in der zum Zeitpunkt der Berichtserstellung schon laufenden zweiten Phase von NUKLEUS fertig gestellt. Die Durchführung der regionalen Klimasimulationen erfolgt in mehreren Schritten.

1. Bereitstellung der Antriebsdaten aus globalen Klimasimulationen

Die globalen Simulationsdaten müssen zunächst aus den entsprechenden Datenbanken extrahiert und für die weitere Verarbeitung in den Regionalmodellen bereitgestellt werden. Für jedes in NUKLEUS genutzte globale Klimamodell wurde dafür ein entsprechendes Konverter-Programm entwickelt.

2. Präprozessierung der Antriebsdaten

Die unter 1. bereitgestellten Globalsimulationen müssen in einem weiteren Schritt von jedem Projektpartner an die individuellen Anforderungen der drei eingesetzten Regionalmodelle (CCLM, ICON-CLM, REMO) angepasst werden.

3. Durchführung der Regionalsimulationen

Insgesamt werden Regionalsimulationen mit drei verschiedenen Regionalmodellen (RCM) für drei verschiedene Globalmodelle (GCM) und in zwei verschiedenen Auflösungen (3 km und 12 km) durchgeführt. Das gesamte Simulationsensemble ist in Abb. 1.3.1 schematisch dargestellt. Alle 12 km Simulationen werden transient, also durchgängig simuliert, während die 3 km Simulationen in einer 10-jährigen (Hindcast) bzw. drei getrennten 30-jährigen Zeitscheiben für den gemeinsamen Referenzzeitraum 1961-1990 bzw. die individuellen Zeiträume der beiden GWLs (Tab. 1.1.1) erfolgen (siehe auch Abschnitt „Simulationsprotokoll“). Somit umfasst das gesamte Ensemble sechs sogenannte Hindcast- oder Evaluierungs-Simulationen mit drei Regionalmodellen in zwei Auflösungen (12 km und 3 km) und Antriebsdaten aus ERA5 Reanalysen, 18 historische Simulationen (3 GCM x 3 RCM x 2 Auflösungen), 9 Szenario-Simulationen (3 GCM x 3 RCM) mit 12 km und 18 Szenario-Simulationen (3 GCM x 3 RCM x 2 GWL) mit 3 km Auflösung. Die kontinuierliche und größtenteils parallele Durchführung der zahlreichen Simulationen erforderte eine über zwei Jahre durchgehende Betreuung mit mehrmals täglichen Kontrollen des Simulationsstatus und der Simulationsketten. Durch das zum Zeitpunkt der Simulationsdurchführung instabile HPC System Levante erhöhte sich der Arbeitsaufwand durch Neustarts unterbrochener Simulationen und Bereinigung der Speicherressourcen erheblich.

4. Nachbereitung der Simulationsergebnisse

Die ebenfalls sehr zeitintensive Aufbereitung der Simulationsergebnisse umfasst die Erstellung von Zeitreihen aller im Simulationsprotokoll festgelegten Ausgabegrößen, eine erste Qualitätskontrolle der Simulationsdaten, die Umformatierung in ein einheitliches, auf CMOR-Kriterien beruhendes Standardformat sowie die Archivierung der direkten Modellergebnisse und der daraus klimatologisch aufbereiteten Daten im Bandarchiv des DKRZ. Insbesondere die instabile Anbindung des ebenfalls neuen Archivierungssytem StrongLink am DKRZ führt immer wieder zu Verzögerungen durch einen „Datenstau“ auf den Festplatten, die für eine reibungslose Durchführung der Simulationen immer wieder geleert werden müssen, da der Festplattenspeicher für die produzierten Daten bei weitem nicht ausreicht.

Insgesamt werden in NUKLEUS 51 regionale Klimasimulationen erstellt, aufbereitet und archiviert. Alle Simulationen mit ICON-CLM wurden vom Projektpartner BTU betreut und alle REMO-Simulationen von Hereon. Die CCLM Simulationen wurden zwischen Hereon und KIT aufgeteilt. Hereon hat die Evaluierungssimulationen und alle Klimasimulationen (historisch und Szenario in beiden Auflösungen) mit Antriebsdaten aus MPI-ESM-HR Simulationen betreut und KIT die verbliebenen Klimasimulationen mit Antriebsdaten aus EC-EARTH und MIROC6 Simulationen.

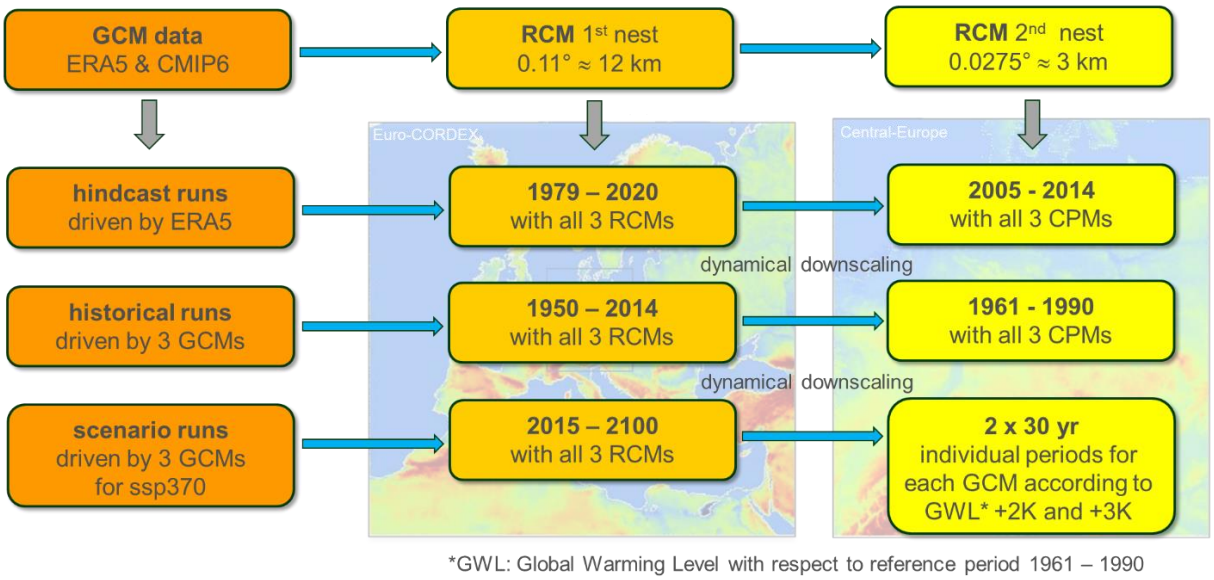


Abbildung 1.3.1: Schematische Darstellung des NUKLEUS Simulationsensembles mit globalen Antriebsdaten (linke Säule), transienten Regionalsimulationen mit 12 km (mittlere Säule) und regionalen Zeitscheibensimulationen mit 3 km (rechte Säule) Auflösung. Im Hintergrund die jeweiligen Modellregionen entsprechend Abb.1.1.1.

AP1.4 Statistisch-Dynamisches und statistisches Downscaling zur Generierung von hochaufgelösten Klimadaten (Hereon, KIT, JMU)

In AP1.4 sollte als Ergänzung zum dynamischen Downscaling vom KIT ein statistisch-dynamisches Downscaling (SDD) für verschiedene Kenngrößen und nutzerrelevante Variablen entwickelt werden. Beim SDD handelt es sich um eine Kombination von statistischen Ansätzen (z.B. Wetterlagen-klassifikation) und dynamischem Downscaling.

In einem ersten Schritt wurden die für das SDD benötigten Wetterlagen für Mitteleuropa klassifiziert. Basierend auf früheren Studien (z.B. Reyers et al., 2015; Schubert et al., 2017) wurden dafür „Circulation Weather Types“ (CWTs; Jones et al., 1993) mithilfe eines Freva Plugins für alle verfügbaren CMIP6 GCMs bestimmt. Die Auftrittshäufigkeit dieser CWTs diente zusätzlich in Arbeitspaket AP2.1 als Kriterium für die GCM-Auswahl. Außerdem wurden für verschiedene Klimavariablen (Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) Konzepte für SDD-Verfahren entwickelt.

Die für die weitere Entwicklung und Validierung der SDD-Verfahren benötigten Evaluierungsläufe standen aufgrund der Verzögerung der Klimasimulationen jedoch erst sehr spät zur Verfügung. Daher wurde im letzten Projektdrittel in Abstimmung mit allen Projektpartnern beschlossen, kein SDD-Verfahren zu entwickeln und stattdessen die Arbeit zugunsten der Analyse und Bewertung des dynamischen Simulationsensembles zu nutzen.

Für einige Fragestellungen in den Modellregionen wurden noch höher aufgelöste Niederschlags-datensätze benötigt, als durch die dynamischen regionalen Klimamodelle bereitgestellt werden können. Obwohl solche Datensätze nicht im Antrag vorgesehen waren, wurden einige Vorstudien mit einem Modell für orographischen Niederschlag durchgeführt. Dieses Modell basiert auf einer Fouriertransformation der Eulerschen Gleichungen und produziert Niederschläge in Regionen mit topographischen Unterschieden (wie in wenigstens drei der sechs Modellregionen) in einer bislang beispiellosen Auflösung von 300-500 m. Kombiniert mit einem statistischen Postprocessing konnten

sehr vielversprechende Resultate in einer Beispielregion mit besonders markanter Topographie und dichtem Stationsnetz (Harzregion) erzielt werden. Dieser Ansatz soll in der zweiten Projektphase weiterentwickelt werden.

AP2 – Evaluierung und Auswertung (Leitung: KIT)

Ziel von AP2 war die Evaluierung vorhandener und der in NUEKLEUS neu erstellten Klimasimulationen. Dabei wurden auch die Globalmodellsimulationen aus CMIP6 analysiert, um möglichst gut geeignete Antriebe für das NUKLEUS Ensemble zu finden. Darüber hinaus wurden die vorhandenen Simulationen untersucht, um geeignete Verfahren für eine Bias-Korrektur zu finden, die in viele Anwender von Wirkmodellen insbesondere bei Daten aus den Klimaänderungssimulationen benötigen.

AP2.1 Analyse und Bewertung der vorhandenen Klimasimulationen (BTU, Hereon, KIT)

Bewertung und Auswahl der CMIP6 GCMs

In diesem Arbeitspaket war das Ziel, die drei geeignetsten CMIP6 Modelle für das Downscaling in NUKLEUS zu extrahieren. Diese Aktivität geschah in Abstimmung und Zusammenarbeit mit der CORDEX CMIP6 Community. Auf der Basis multipler Kriterien und Analysen wurde eine optimale und balancierte Ensemble-Erzeugung entwickelt, die für die sogenannte „EURO-CORDEX Balanced Ensemble Matrix“ (BEM; Sobolowski et al., 2023) verwendet werden soll. Die von NUKLEUS ausgewählten drei CMIP6 GCMs erfüllen die CORDEX Kriterien und sind in der Matrix enthalten. Sie wurden in einem mehrstufigen Prozess ausgewählt:

1. Verfügbarkeit von 3-dimensionalen Antriebsdaten mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung (mindestens 6-stündig) für das dynamische Downscaling;
2. Höhere räumliche Auflösung im Vergleich zu CMIP5, die die GCM-Ergebnisse verbessern soll;
3. Die GCMs sollen so unabhängig wie möglich sein (GCM-Familien; Brunner et al., 2020).
4. Die GCMs sollen so weit wie möglich den plausiblen Bereich der Klimasensitivität abbilden.

Die höchste Priorität hatte die realistische Wiedergabe von Wetterlagen über Europa, da das NUKLEUS-Ensemble zuverlässige Klimainformationen für Deutschland bereitstellen soll. Hierfür wurden die Auftrittshäufigkeiten von „Circulation Weather Types“ (CWTs; Jones et al., 1993; siehe auch AP1.4) sowie der Blocking Index nach Tibaldi und Molteni (1990) in der 2-dimensionalen Erweiterung von Scherrer et al. (2006) analysiert. Abbildung 2.1.1 zeigt den mittleren quadratischen Fehler (MSE) für die GCMs der BEM gegenüber den ERA5 Reanalysen (Hersbach et al., 2020). Je kleiner der Fehler in allen Jahreszeiten ist (blaue Farben), desto besser geben die GCMs die typische Verteilung von Wetterlagen und Blocking wieder.

Auf Grundlage all dieser Kriterien wurden die folgenden CMIP6-GCMs für das NUKLEUS-Ensemble ausgewählt: EC-Earth3-Veg (hohe Klimasensitivität, vgl. Sobolowski et al., 2023), MPI-ESM1-2-HR (mittlere Sensitivität) und MIROC6 (niedrige Sensitivität).

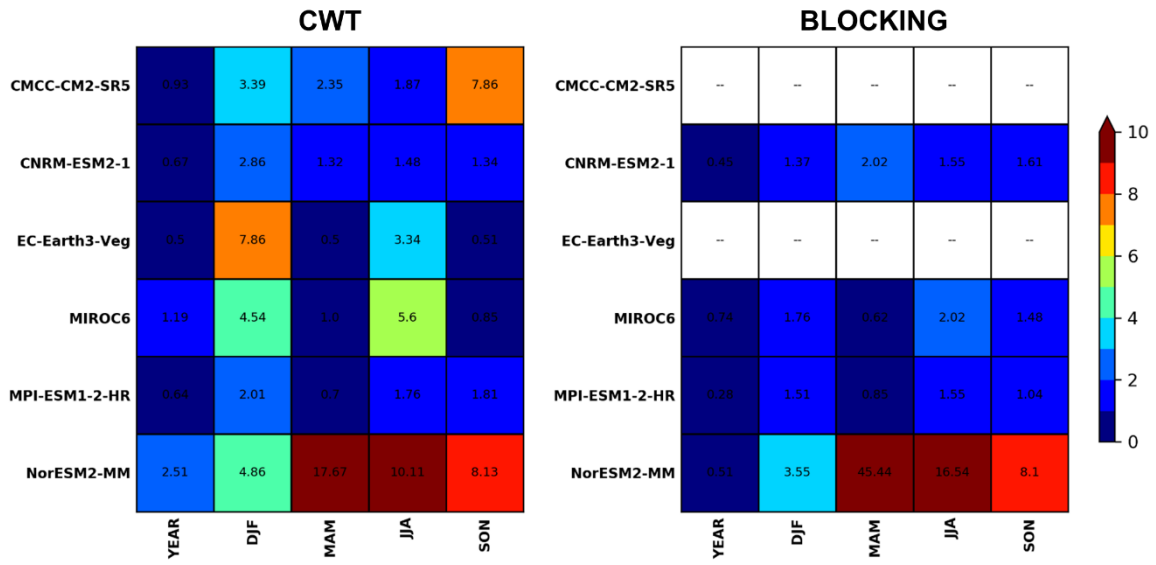


Abbildung 2.1.1: Wiedergabe der Auftrittshäufigkeit von „Circulation Weather Types" (CWTs; links) und Blocking (rechts) in CMIP6 Simulationen über Europa, dargestellt als mittlerer quadratischer Fehler gegenüber ERA5.

CORDEX Ensemble für RegiKlim

Eine Übersicht aller CORDEX Simulationen, die in den IPCC AR6 Atlas (Iturbide et al., 2021; Gutiérrez et al., 2021) eingegangen sind, wurde von Diez-Sierra et al. (2022) veröffentlicht. Bei dieser Übersicht haben auch mehrere Beteiligte an NUKLEUS mitgewirkt.

NUKLEUS hat den Modellregionen in Phase 1 von RegIKlim in Freva ein Ensemble basierend auf den EURO CORDEX CMIP5 Simulationen mit 12.5 km Gitterweite für Test-Anwendungen und für das in NUKLEUS entwickelte Freva PlugIn „ClimateChangeProfile" bereitgestellt. Dieses Ensemble umfasst fünf RCMs, die dieselben fünf GCMs als Antriebsdaten verwenden (Abb. 2.1.2; vgl. Moemken et al., 2022).

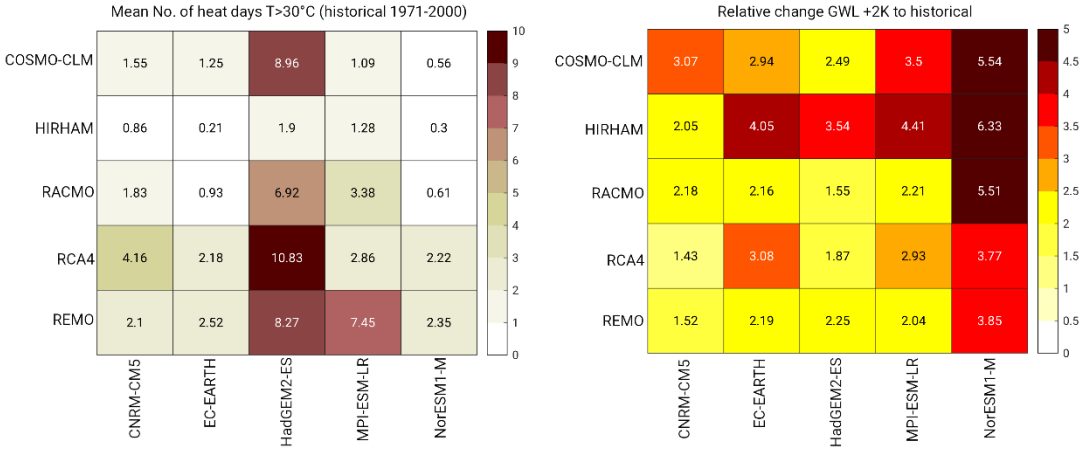


Abbildung 2.1.2: EURO CORDEX Ensemble Matrix - Anzahl der heißen Tage mit einer Maximaltemperatur über 30°C im Referenzzeitraum (links), sowie die Klimaänderungssignale bei einem Global Warming Level von +2°C als Beispiel für die Modellregion ISAP.

Erste Bewertung der Jahresgänge aus den historischen Klimasimulationen

Für die Bewertung einer möglichst korrekten Wiedergabe der Jahresgänge durch die Modellsimulationen wurden für die Simulationen des in AP1.2 gesammelten EURO-CORDEX Ensembles aber auch des NUKLEUS Ensembles klimatologische Jahresgänge wichtiger Klimaparameter (z.B. Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, etc.) als Flächenmittel über die jeweilige Modellregion aufbereitet. Der Vergleich mit entsprechenden Referenzdaten wird anhand quantitativer Kennzahlen wie der MAD (Mean Absolute Monthly Differenz) oder dem RCC (Rang Correlatrion Coefficient) durchgeführt. Anhand der Kennzahlen wurde ein Ranking der Güte der bereitgestellten Simulationen vorgenommen. Durch Anwendung der gleichen Kennzahlen auf zukünftige Zeiträume lassen sich außerdem die Simulationen mit den stärksten Änderungen in den betrachteten Jahresgängen für die jeweilige Modellregion identifizieren. Als Beispiel für diese Art der Auswertung der NUKLEUS Simulationen sind in Abb. 2.1.3. die klimatologischen Monatswerte und ihre Abweichungen von den DWD-HYRAS-Daten (Rauthe et al. 2013) für die Modellregion „Klimakonform“ für einen historischen Zeitraum dargestellt. Die Grafiken der Jahresgänge und Tabellen der Kennzahlen sind für alle Regionen verfügbar. Die Erweiterung auf andere klimatologische Kenngrößen ist in NUKLEUS Phase 2 geplant.

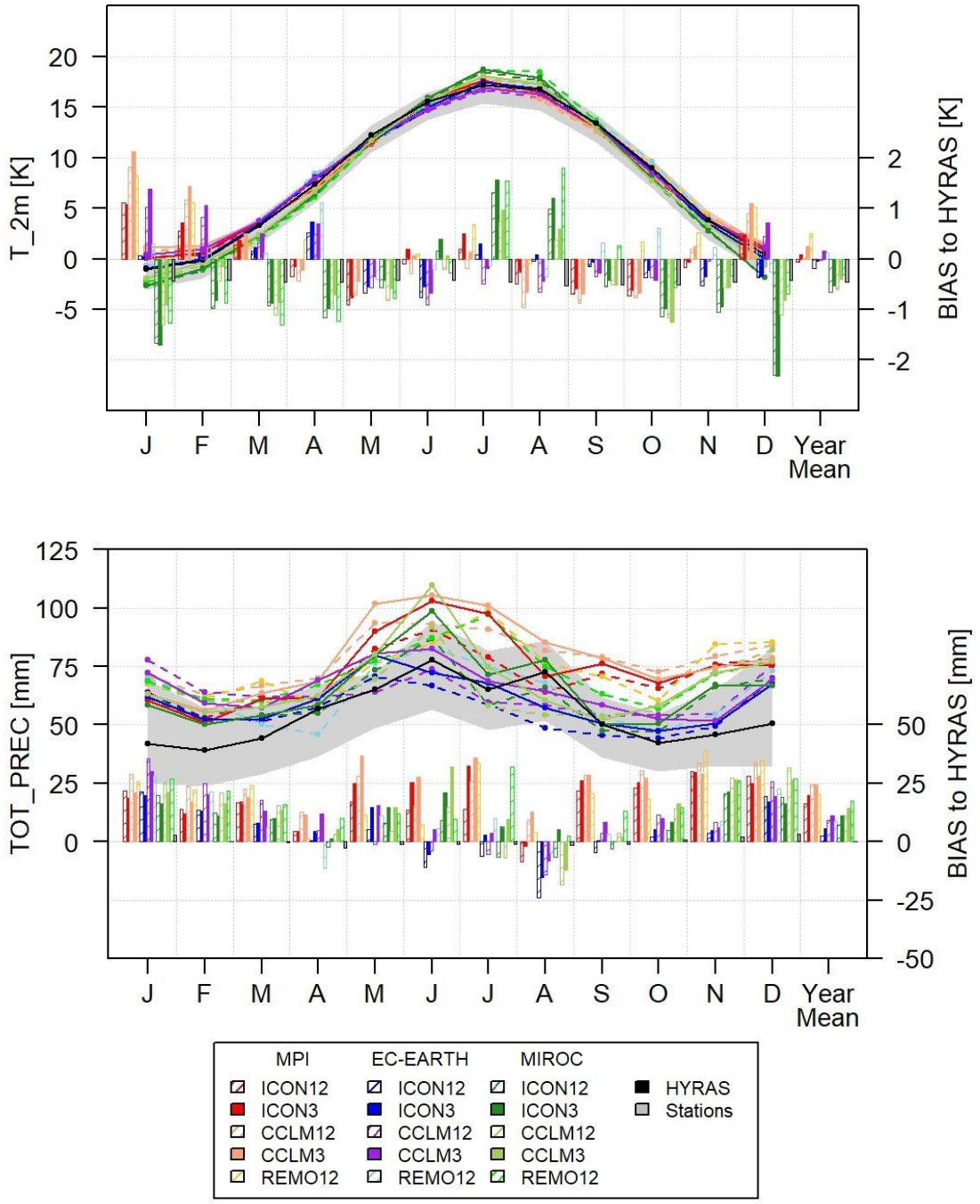


Abbildung 2.1.3: Mittlere Jahresgänge (Kurven) der 2m-Temperatur und des Niederschlags der NUKLEUS Simulationen und ihre Abweichungen von HYRAS Referenzdaten (Balken) für die Modellregion „Klimakonform“ im Zeitraum 1961-1990. Modellbezeichnungen mit 12 entsprechen den Simulationen mit 12 km Auflösung und Modellbezeichnungen mit 3 den 3 km Simulationen.

Tabelle 2.1.1 Bewertungs-Kennzahlen der mittleren Jahresgänge für die Region Klimakonform.

Rang	Modelkennung	Gesamt	Niderschlag	Tmean_2m	Tmin_2m	Tmax_2m	Luftdruck
1	ECE_ICON03	18	6	2	3	3	4
2	ECE_REMO12	11	0	3	3	3	2
3	ECE_ICON12	8	0	2	1	3	2
4	MPI_ICON12	6	3	3	1	1	-2
5	ECE_CCLM03	6	3	1	0	0	2
6	MPI_ICON03	3	-3	3	3	2	-2
7	MPI_REMO12	3	-3	1	3	2	0
8	MIR_CCLM03	1	-3	0	1	1	2
9	ECE_CCLM12	0	-3	1	1	1	0
10	MIR_ICON12	-1	3	-2	-3	-1	2
11	MIR_ICON03	-1	3	-2	-3	-1	2
12	MIR_CCLM12	-2	0	-1	0	-1	0
13	MIR_REMO12	-7	0	-1	-1	-3	-2
14	MPI_CCLM12	-8	0	-1	-2	-1	-4
15	MPI_CCLM03	-9	-3	0	-2	0	-4

AP2.2 Ergebnisse der NUKLEUS Evaluierungssimulationen (BTU, Hereon, JMU)

Die Qualität der NUKLEUS-Simulationen wurde intensiv evaluiert. Eine Publikation, die sich mit dem Konzept, dem Aufbau und den Auswertungssimulationen beschäftigt, ist in Vorbereitung. In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der drei hochaufgelösten RCMs für die ERA5-angetriebenen Evaluierungssimulationen für den Zeitraum 2005 - 2014 verglichen.

Temperatur

Die Auswertung der 2m-Temperaturdaten aus den drei ERA5-angetriebenen RCM-Simulationen gegen gerasterte (HYRAS) oder stationsbasierte Beobachtungen ergab einen geringeren BIAS im Vergleich zu älteren Simulationen wie z.B. von EURO-CORDEX. Die Abweichung liegt meist im Bereich von +/-1 °C. ICON-CLM und CCLM sind vor allem in Norddeutschland tendenziell zu kalt (Abb. 2.2.2), während REMO in Süddeutschland tendenziell zu warm ist. Insgesamt liefert ICON-CLM den geringsten RMSE. Für beide Regionen liegt der aus den Simulationen ermittelte Jahresgang fast vollständig im Bereich der Beobachtungsstationen (Abb. 2.2.3). In der Küstenregion WAKOS (siehe Abb. 2.2.1) gibt es einen stärkeren Kältebias aller Simulationen vom Winter bis zum Frühjahr. Für die mitteldeutsche Region KlimaKonform (siehe Abb. 2.2.1) hängt die Entwicklung des Jahresganges stärker vom Modell ab. Der stark abweichende BIAS im Oktober für REMO resultiert aus noch zu untersuchenden Ereignissen im Oktober 2013.

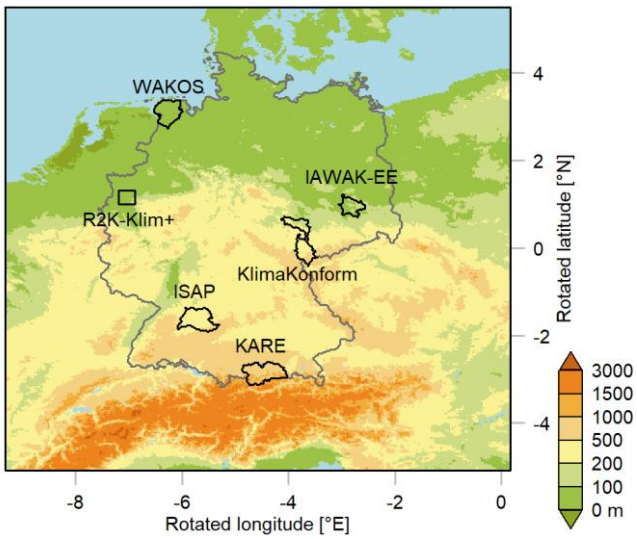


Abbildung 2.2.1: CEU-3 Modellgebiet mit Topographie. Markiert sind die sechs RegIKlim-Modellregionen: WAKOS, IAWAK-EE, KlimaKonform, R2K-Klim+ (Mikroebene: Duisburg), ISAP and KARE.

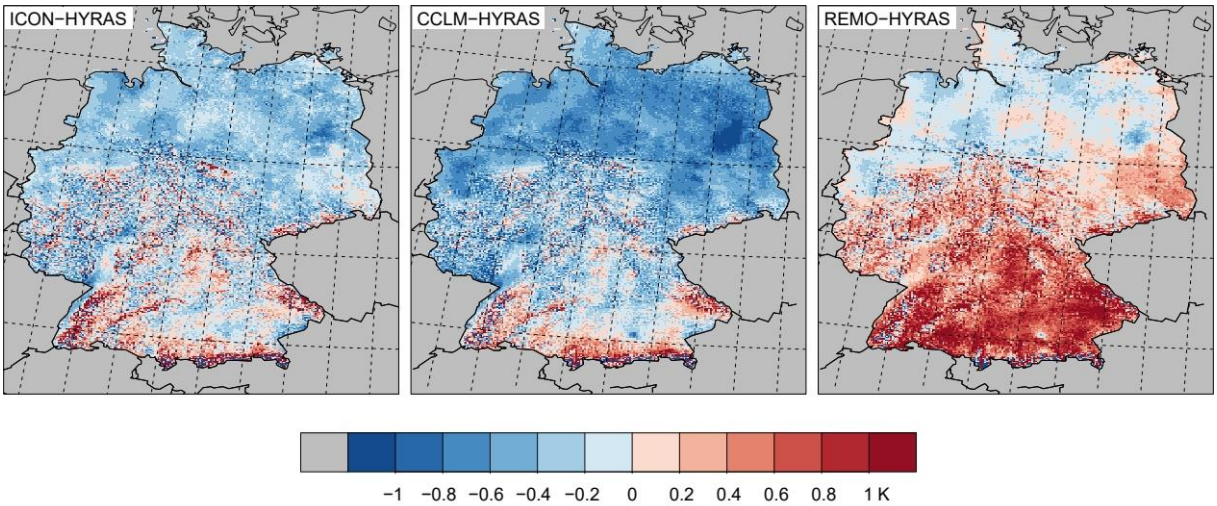


Abbildung 2.2.2: BIAS der 2m-Jahresmitteltemperaturen in °C der NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen von ICON-CLM, CCLM und REMO gegen HYRAS für den Zeitraum 2005 – 2014.

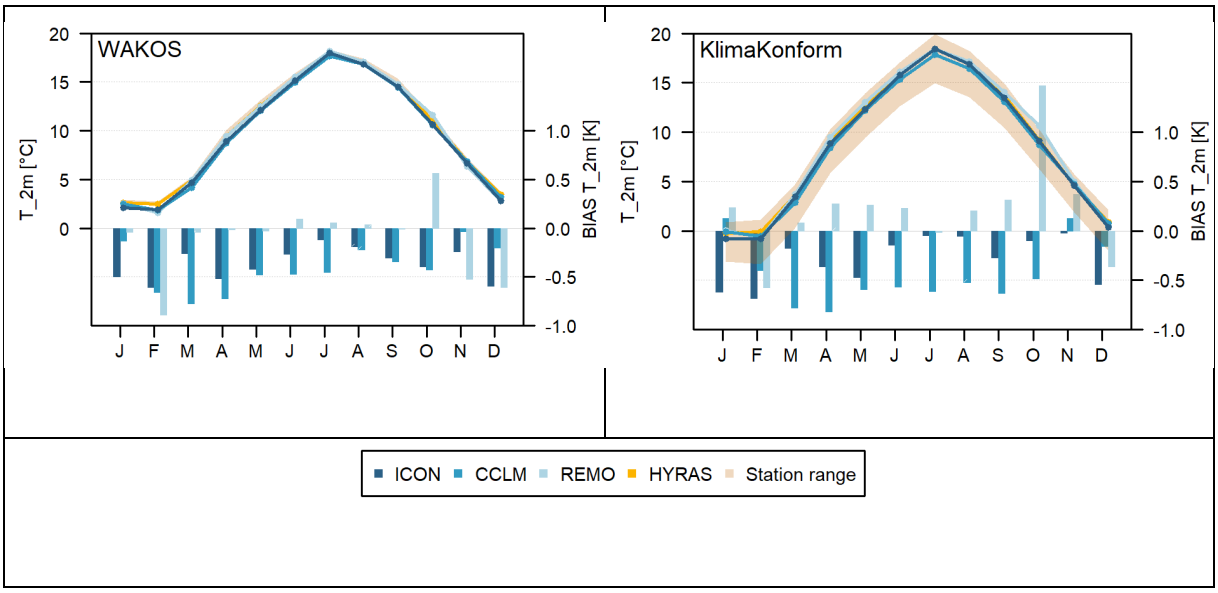


Abbildung 2.2.3: Mittlerer Jahresgang der 2m-Temperatur in °C (farbige Linien) für die beiden RegIKlim-Modellregionen WAKOS und KlimaKonform und der monatliche BIAS (in K) der Modelldaten (NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen) gegenüber HYRAS als Balken (rechte y-Achse). Braun schattiert ist der Bereich der Messstationen innerhalb des jeweiligen Gebietes.

Niederschlag

Alle drei Regionalmodelle zeigen eine Tendenz zu einem feuchten BIAS (Abb. 2.2.4). Für ICON-CLM und CCLM wird dieser BIAS nach Osten und Süden hin stärker. Im Vergleich zu älteren Simulationen ist der mittlere BIAS relativ gering, insbesondere bei ICON-CLM. REMO zeigt einen nassen BIAS im nördlichen Teil Deutschlands und besonders über Gebieten mit erhöhter Topographie. Der Jahresgang ist in den Mittelgebirgen der KlimaKonform-Region stärker ausgeprägt als in der Küstenregion WAKOS (Abb. 2.2.5), ähnlich wie bei der 2m-Temperatur. Für WAKOS sind die Abweichungen von den beobachteten Werten gering, außer für REMO, das den Sommerniederschlag überschätzt. Für die teils gebirgige KlimaKonform-Region bleiben die Modelle meist innerhalb des weiten Bereichs, den die Stationsmessungen in dieser heterogenen Region aufweisen.

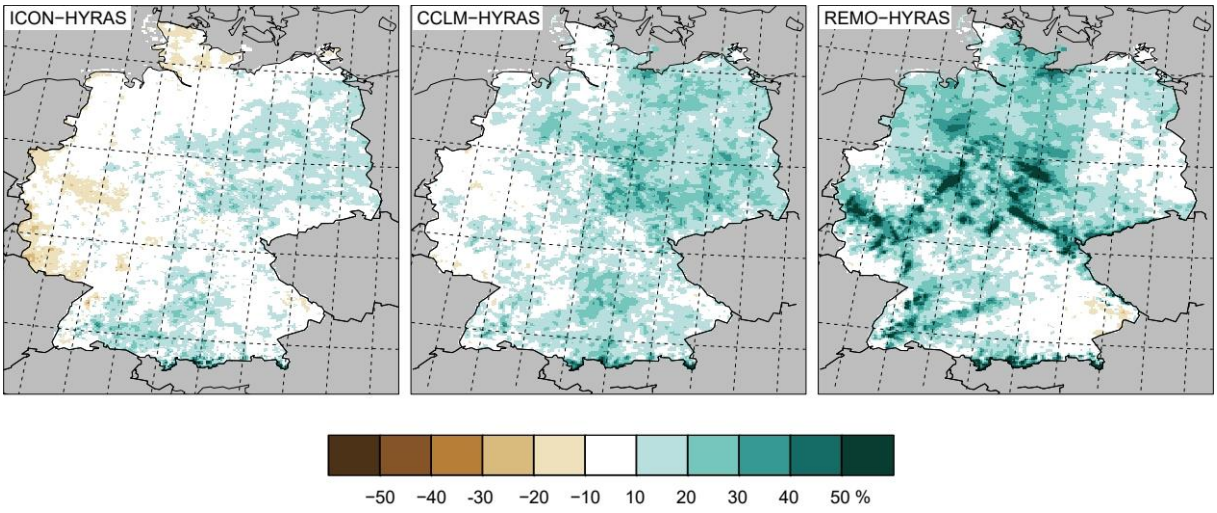


Abbildung 2.2.4: Relativer BIAS des Jahresniederschlags in % der NUKLEUS CEU-3 Evaluierungs-simulationen von ICON-CLM, CCLM und REMO gegen HYRAS für den Zeitraum 2005 – 2014.

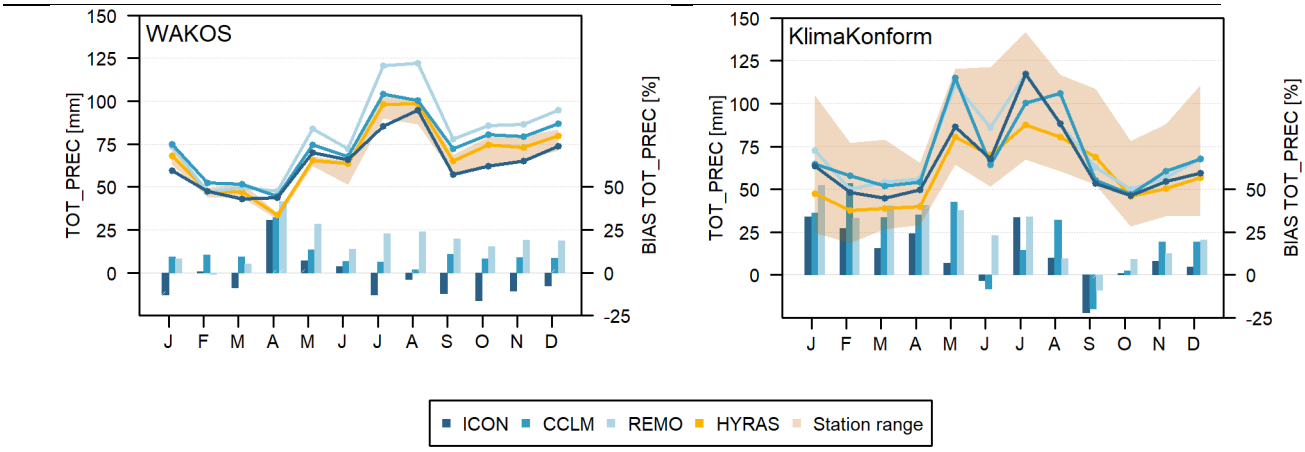


Abbildung 2.2.5: Mittlerer Jahresgang des Niederschlags in mm (farbige Linien) für die beiden RegIKlim-Modellregionen WAKOS und KlimaKonform und der relative monatliche BIAS in % der Modelldaten (NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen) gegenüber HYRAS als Balken (rechte y-Achse). Braun schattiert ist der Bereich der Messstationen innerhalb des jeweiligen Gebietes.

Strahlung

Die auf die Erdoberfläche treffende kurzwellige Strahlungsmenge wird von den Modellen relativ gut wiedergegeben (Abbildung 2.2.6). Die Auswertung der Globalstrahlung der drei ERA5-angetriebenen RCM-Simulationen gegen Satellitendaten (MSG-SARAH Version3) ergab eine mittlere Abweichung von unter 10 W/m^2. CCLM neigt zu einer Unterschätzung der Strahlungsmenge, was durch die für den Evaluierungszeitraum nicht repräsentative Aerosolklimatologie erklärt werden kann. ICON-CLM verwendet dahingehend eine modernere Aerosolklimatologie. In REMO ist die Überschätzung der Einstrahlung im Süden besonders ausgeprägt. Die in den Alpen sichtbaren deutlichen Überschätzung sind nicht die Folge markanter Modelldefizite, sondern den Schwierigkeiten bei der Fernerkundung in gegliederten Gelände bei stark reflektierenden Oberflächen geschuldet (in diesem Fall müssten andere Referenzdaten herangezogen werden).

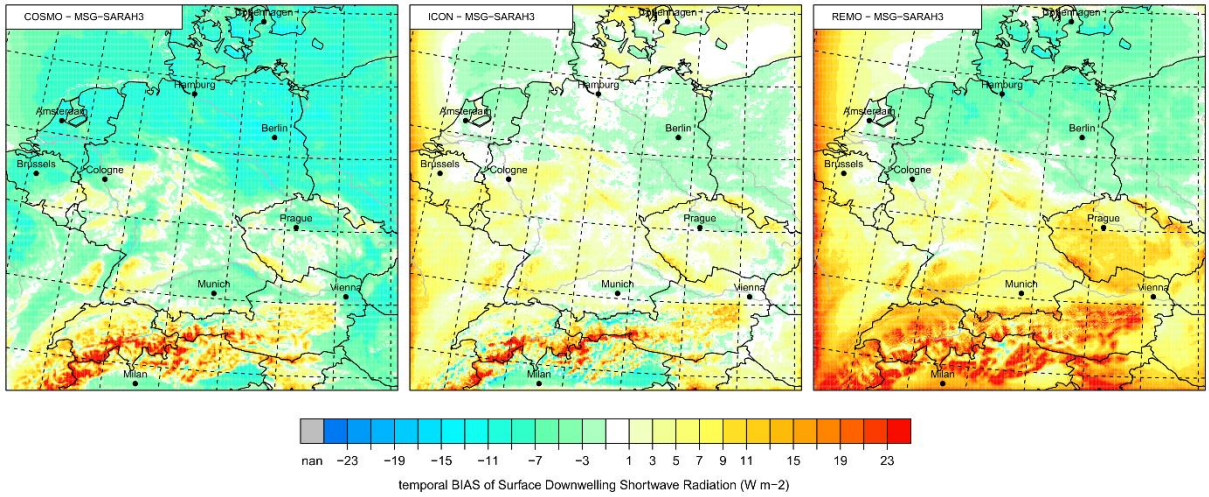


Abbildung 2.2.6: BIAS der Globalstrahlung in W/m^2 der NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen von CCLM, ICON-CLM und REMO gegen MSG-SARAH3 für den Zeitraum 2005 – 2014.

Der Jahresgang der Globalstrahlung wird durch die Modelle für die Region KlimaKonform sehr gut getroffen, während die Werte in der WAKOS-Region für CCLM und REMO im Sommer zwischen 10 und 15 W/m^2 unterschätzt werden (Abbildung 2.2.7).

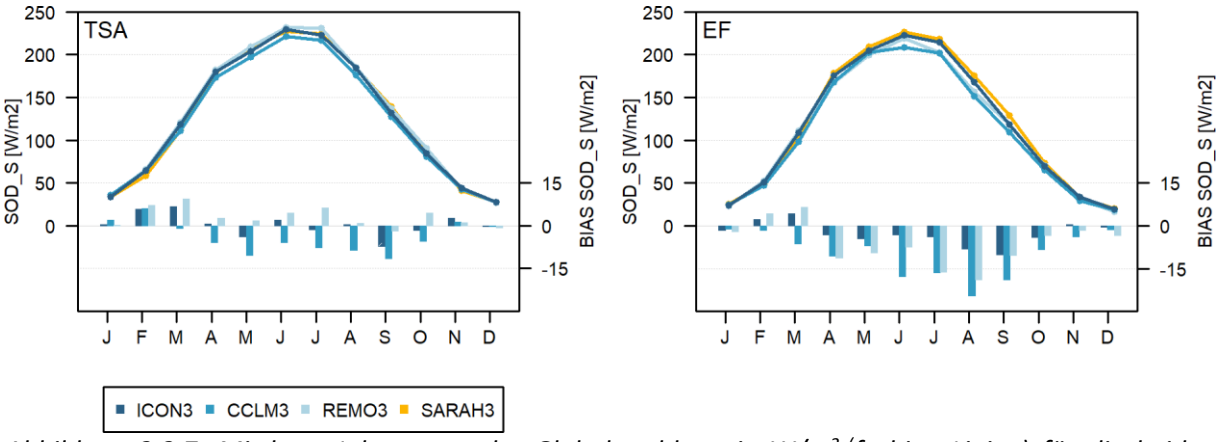


Abbildung 2.2.7: Mittlerer Jahresgang der Globalstrahlung in W/m^2 (farbige Linien) für die beiden RegIKlim-Modellregionen KlimaKonform (links) und WAKOS (rechts) und der monatliche BIAS in W/m^2 der Modelldaten (NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen) gegenüber MSG-SARAH3 als Balken (rechte Y-Achse).

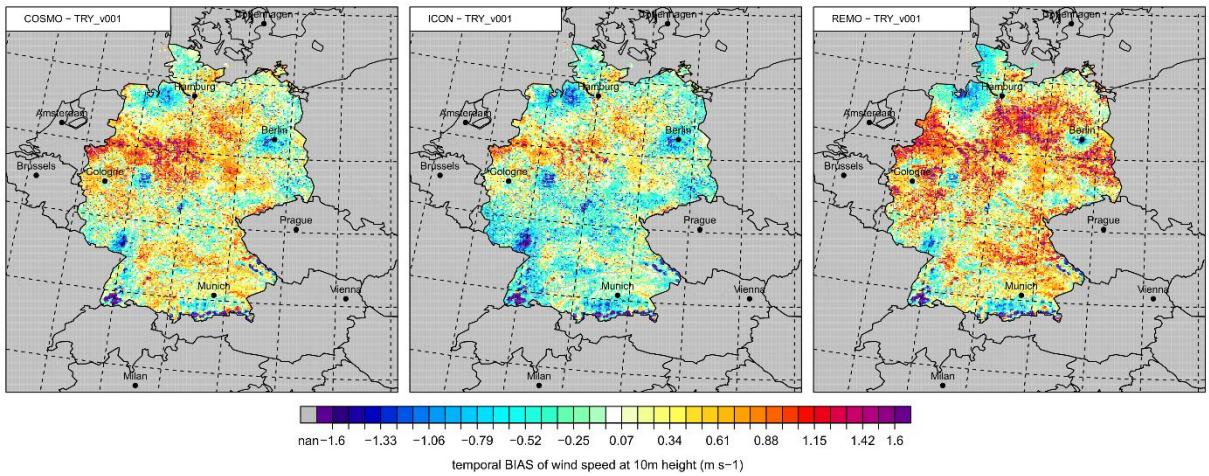


Abbildung 2.2.8: BIAS der 10m-Windgeschwindigkeit in m/s der NUKLEUS CEU-3 Evaluierungs-simulationen von CCLM, ICON-CLM und REMO gegen TRY_v001 für den Zeitraum 2005 – 2012.

Windgeschwindigkeit

Die Auswertung der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe zeigt für die Simulationen mit CCLM und REMO im Vergleich mit dem TRY-Datensatz Überschätzungen über weite Teile Deutschlands (Abbildung 2.2.8). Die ICON-Simulationen zeigen grundsätzlich geringere Abweichungen, wobei sich im Süden eher eine Unterschätzung der Windgeschwindigkeit ergibt.

Der Jahresgang der Windgeschwindigkeit wird relativ gut von den Modellen wiedergegeben (Abbildung 2.2.9). In der Modellregion WAKOS sind die Abweichungen zu den Beobachtungen in allen Modellen relativ gering, in der topographisch komplexeren Region Klimakonform werden dagegen Überschätzungen des simulierten Windes deutlich. Insbesondere im Sommer ist in CCLM und REMO eine positive Abweichung von etwa 25 % erkennbar, wohingegen ICON-CLM die Beobachtungen sehr gut wiedergibt. Die Häufigkeitsverteilungen sind im WAKOS Gebiet sehr gut getroffen, während im

Gebiet KlimaKonform nur ICON eine sehr gute Übereinstimmung zeigt, während REMO und CCLM Verschiebungen hin zu höheren Windgeschwindigkeiten aufweisen.

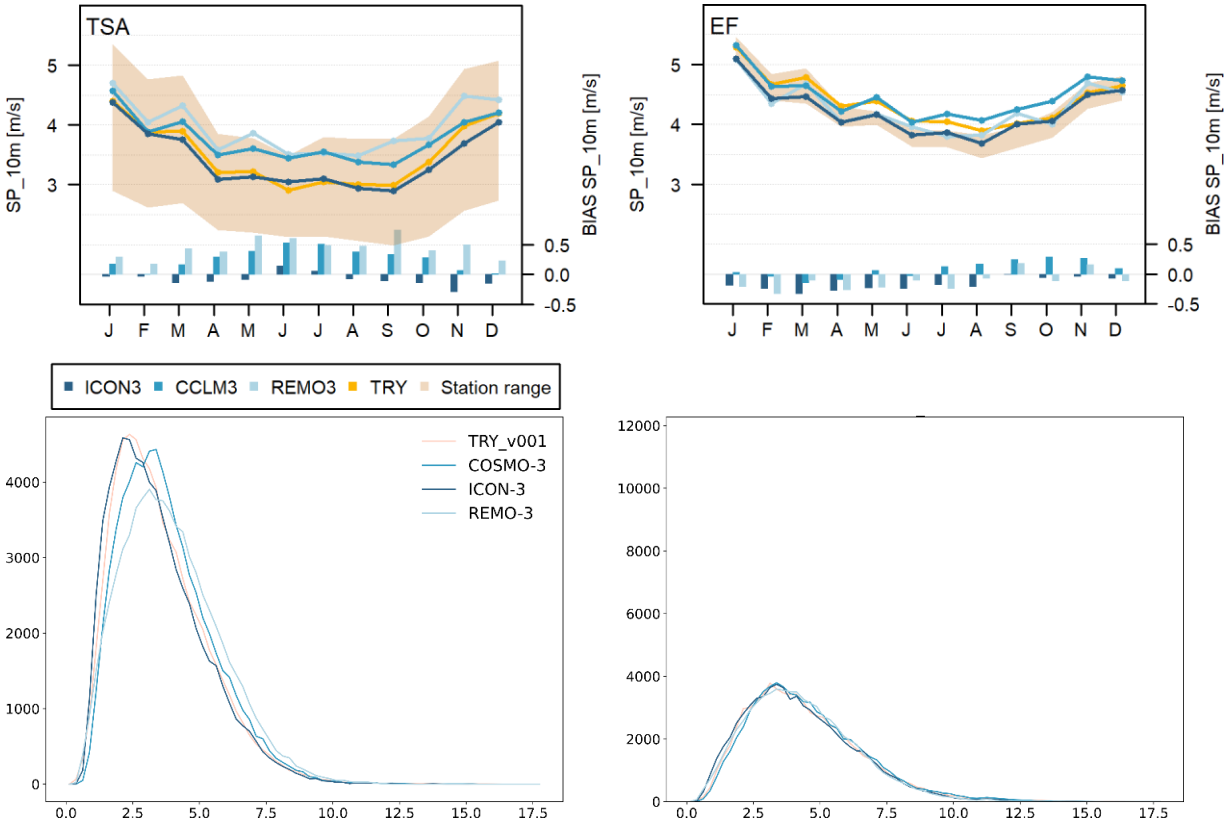


Abbildung 2.2.9: Oben: Mittlerer Jahresgang der 10 m-Windgeschwindigkeit in m/s (farbige Linien) für die beiden RegIKlim-Modellregionen KlimaKonform (links) und WAKOS (rechts) und der monatliche BIAS in m/s der Modelldaten (NUKLEUS CEU-3 Evaluierungssimulationen) gegenüber TRY_v001 als Balken (rechte Y-Achse). Braun schattiert ist der Bereich der Stationsbeobachtungen innerhalb des jeweiligen Gebietes. Unten: Häufigkeitsverteilungen der stündlichen Windgeschwindigkeiten in m/s.

Neben den bodennahen Winden lag ein weiterer Fokus auf der Auswertung der Modellergebnisse in Bezug auf den Wind in Höhe der Naben der Windkraftanlagen. Zum einen wurde die Nordseeplattform FINO1 ausgewertet, die nahe der Modellregion WAKOS liegt. Zum anderen der Grenzschichtmast in Falkenberg (DWD Observatorium MOL-RAO bei Lindenberg), der sich südöstlich von Berlin befindet. An beiden Windmasten wird die Variabilität des Windes innerhalb des Jahres relativ gut von den Modellen CCLM und ICON-CLM wiedergegeben (Abbildung 2.2.10, Daten des Modells REMO lagen nicht vor). Es wird allerdings deutlich, dass es insbesondere unter dem Einfluss der komplexeren, kontinentalen Grenzschicht zu größeren Abweichungen bei den Absolutwerten kommt. Demnach sind unabhängig von der Modellauflösung die Abweichungen bei FINO1 maximal 0.5 m/s (entspricht etwa 5 % Fehler), wohingegen in Falkenberg Abweichungen von 10 % auftreten. Bemerkenswert ist, dass die hochaufgelösten Modelle (3 km) hier größere Abweichungen aufweisen als die 12 km Läufe.

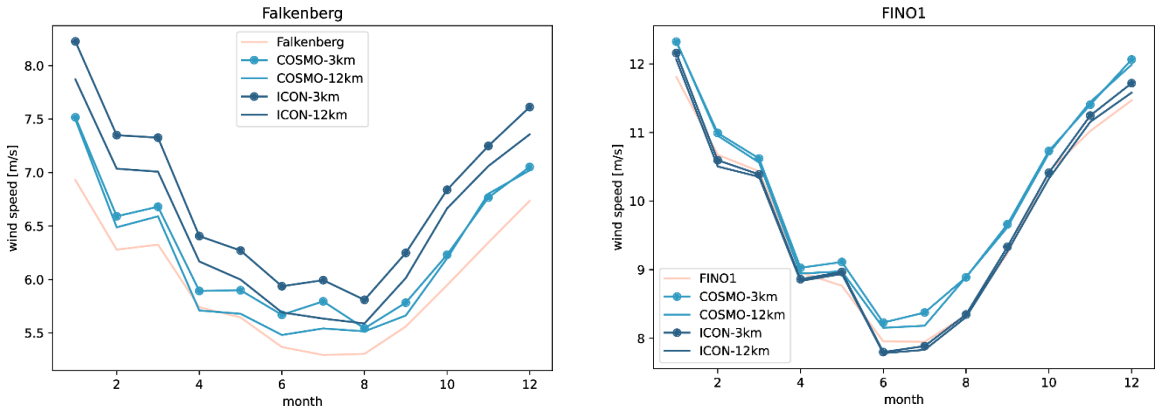


Abbildung 2.2.10: Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe in m/s an den Messmasten Falkenberg (bei Lindenberg) und FINO1.

Für die Untersuchung der mittel- und langfristigen Variabilität des Windklimas und den damit verbundenen Indikatoren wurden zum einen die Evaluierungssimulationen in Bezug auf Häufigkeitsverteilungen, Andauer von Stark- und Schwachwindphasen und zeitlicher (Jahr-zu-Jahr, jahreszeitlich und Tag-zu-Tag) sowie räumlicher Variabilität evaluiert, wobei die Informationen über Zirkulations- und Telekonnexionsmuster verwendet wurden.

Als Beispiel für diese Analysen sind in den Abbildungen 2.2.11 und 2.2.12 die auf Grundlage von stündlichen Daten jahresweise bestimmten Stärken der 5-Tage-Starkwindereignisse (relevant zur Untersuchung von Unwetterstärken) und die Andauerzeiten von Schwachwindphasen mit Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s, unterhalb derer Windturbinen nicht anlaufen, im Vergleich zum TRY_v001-Datensatz dargestellt. Sowohl küstennah (WAKOS) als auch für die Modellregion Klimakonform unterschätzt das ICON die Sturmaktivität, während Schwachwindphasen überschätzt werden. Küstennah ändert sich das Signal der ICON-Simulationen auflösungsabhängig nur wenig. Im Landesinnern führen die Änderungen jedoch durch höhere Auflösung zu einer Verbesserung der Übereinstimmung mit TRY_v001. Die COSMO-Simulationen zeigen eine bessere Übereinstimmung mit TRY_v001 als die REMO- und ICON-Simulationen.

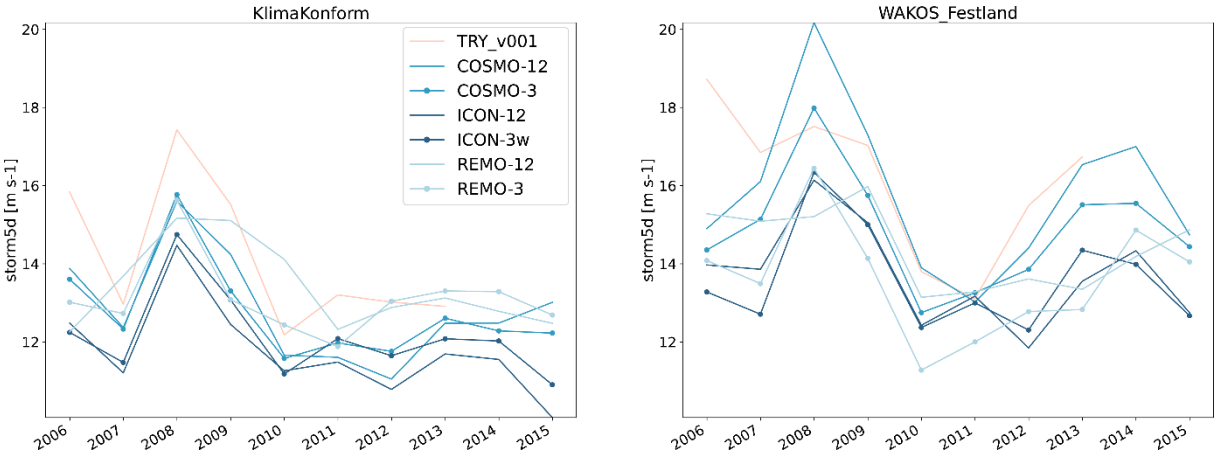


Abb. 2.2.11: Zeitserien der jährlich höchsten Windgeschwindigkeiten über 5 Tage der Nukleus Simulationen im Vergleich zu TRY_v001 im Zeitraum 2005-2015.

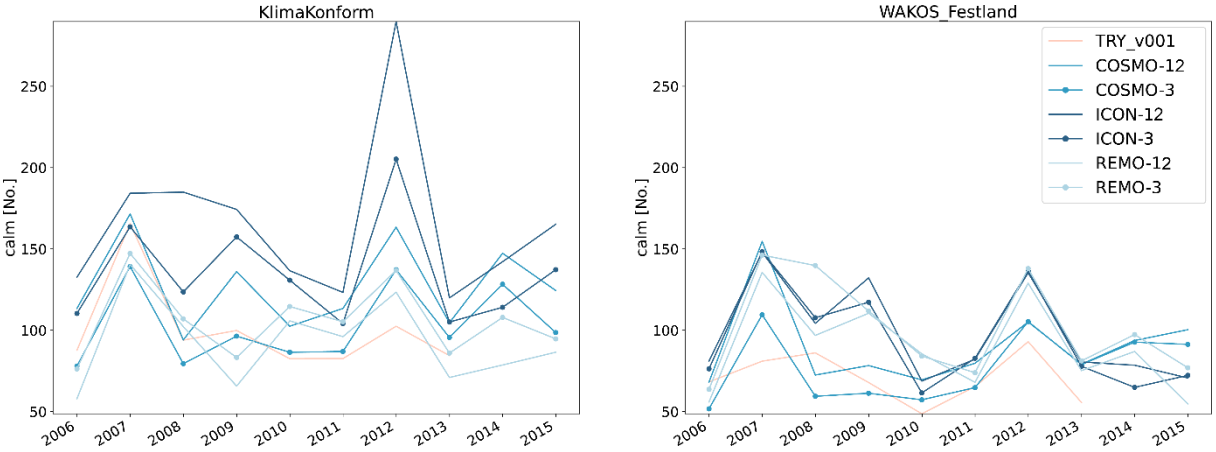


Abb. 2.2.12: Zeitserien der Andauerzeiten von Flauten (Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s) [h] der Nukleus Simulationen im Vegleich zu TRY_v001 im Zeitraum 2005-2015.

Tagesgänge

Die Tagesgänge werden hier für die Sommermonate Juni und Juli gezeigt. Die Tagesgänge der Temperatur werden durch die CEU-3 Evaluationssimulationen gut wiedergegeben (Abb. 2.2.13 Linien mit Punktmarkierung). Insgesamt erfolgt der Temperaturabfall am Nachmittag im Modell schneller als in der Realität, Ausnahme bildet hier das REMO-12. Der größten Abweichungen treten beim CCLM-12 in den Nachmittagsstunden mit Unterschätzungen der Temperatur von mehr als 1.5 K auf. Die Nachttemperaturen werden sehr gut getroffen.

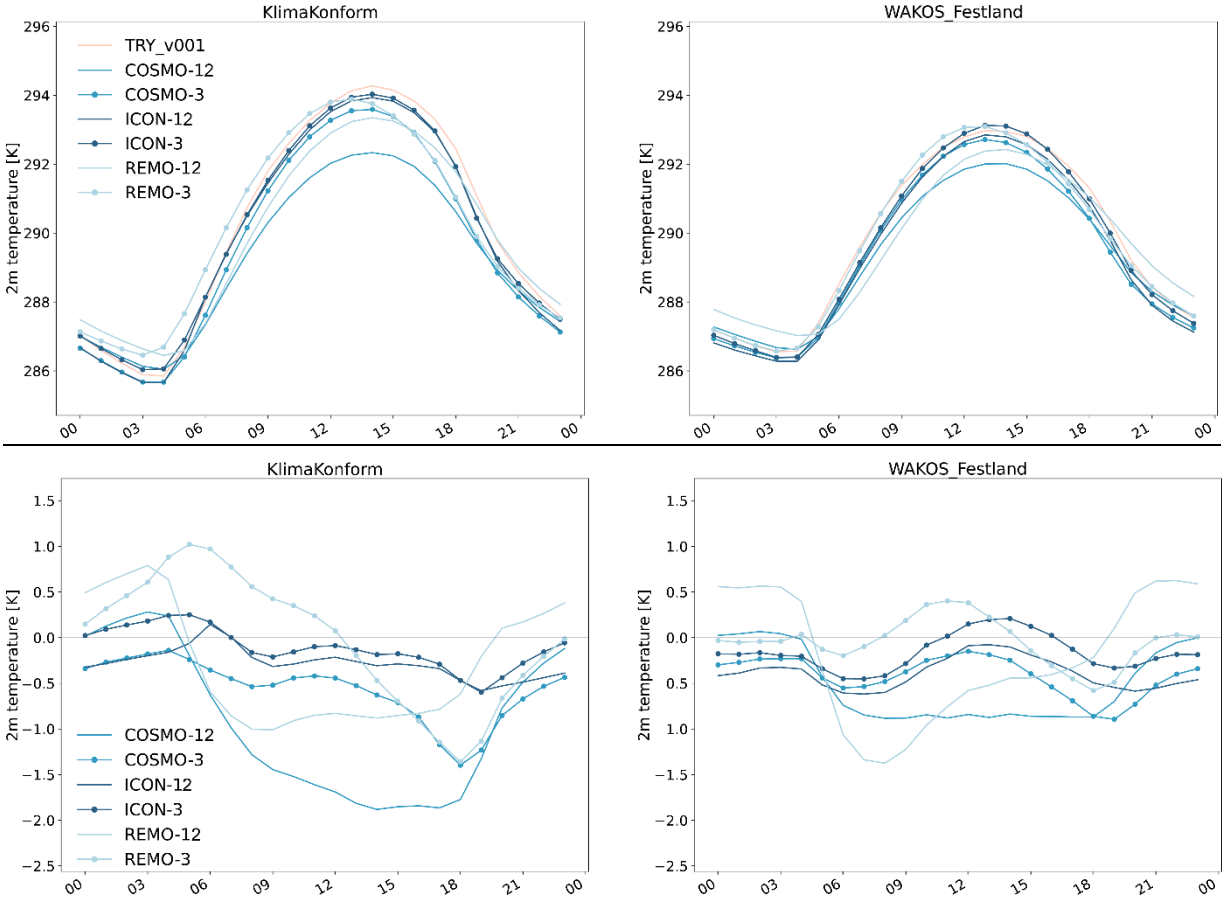


Abbildung 2.2.13: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur in 2 m Höhe in den Modellregionen KlimaKonform und WAKOS (oben). Tagesgang der Differenzen (unten) zwischen den NUKLEUS Evaluierungssimulationen und dem Datensatz TRY_v001 für die Monate Juni und Juli (2005 – 2012).

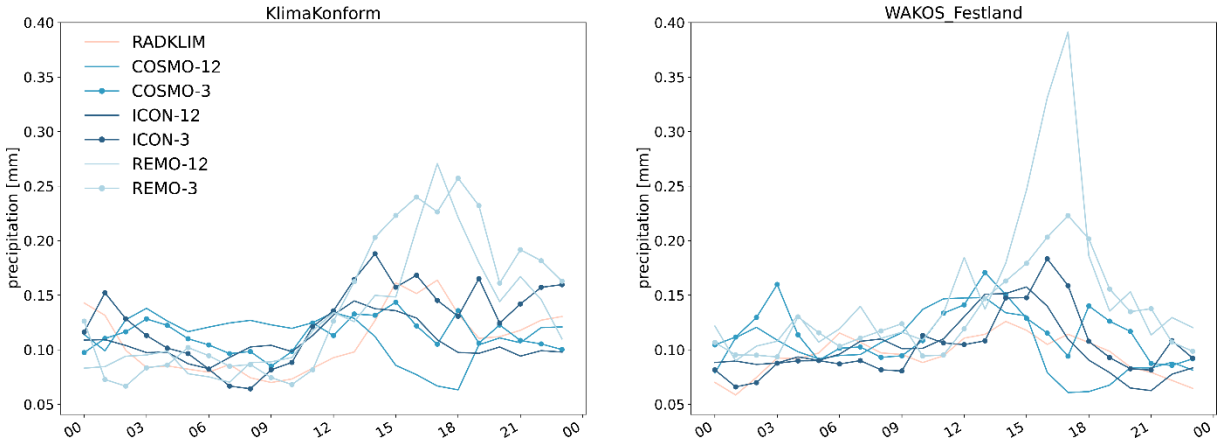


Abbildung 2.2.14: Tagesgang des Niederschlags in mm für die Monate Juni und Juli (2005 – 2014) der NUKLEUS Evaluierungssimulationen und der RADKLIM Daten für die Modellregionen KlimaKonform und WAKOS (nur Landflächen).

Die Tagesgänge des Niederschlags sind im Vergleich zum RADAR-Daten Produkt RADKLIM (Winterrath et al., 2018) z.T. nur im groben getroffen (Abbildung 2.2.14). Nur ein Teil der Simulationen zeigt eine Überschätzung der Nachmittagsniederschläge für das Gebiet KlimaKonform während im Gebiet WAKOS die nachmittäglichen bzw. frühabendlichen Niederschläge von allen Simulationen überschätzt werden.

Die Tagesgänge der Globalstrahlung (Abbildung 2.2.15) werden von ICON-CLM am besten wiedergeben, die beiden Auflösungen unterscheiden sich im Gebiet Klimakonform kaum und im WAKOS-Gebiet nur wenig mit einer Unterschätzung der Einstrahlung am Morgen und einer Überschätzung bis zum Nachmittag im Rahmen von ±20 W/m^2 (Klimakonform) bzw. ±30 W/m^2 (WAKOS). Die REMO Simulationen zeigen ein prinzipiell anderes Verhalten mit Überschätzungen am Vormittag und stärkeren Unterschätzung am Nachmittag.

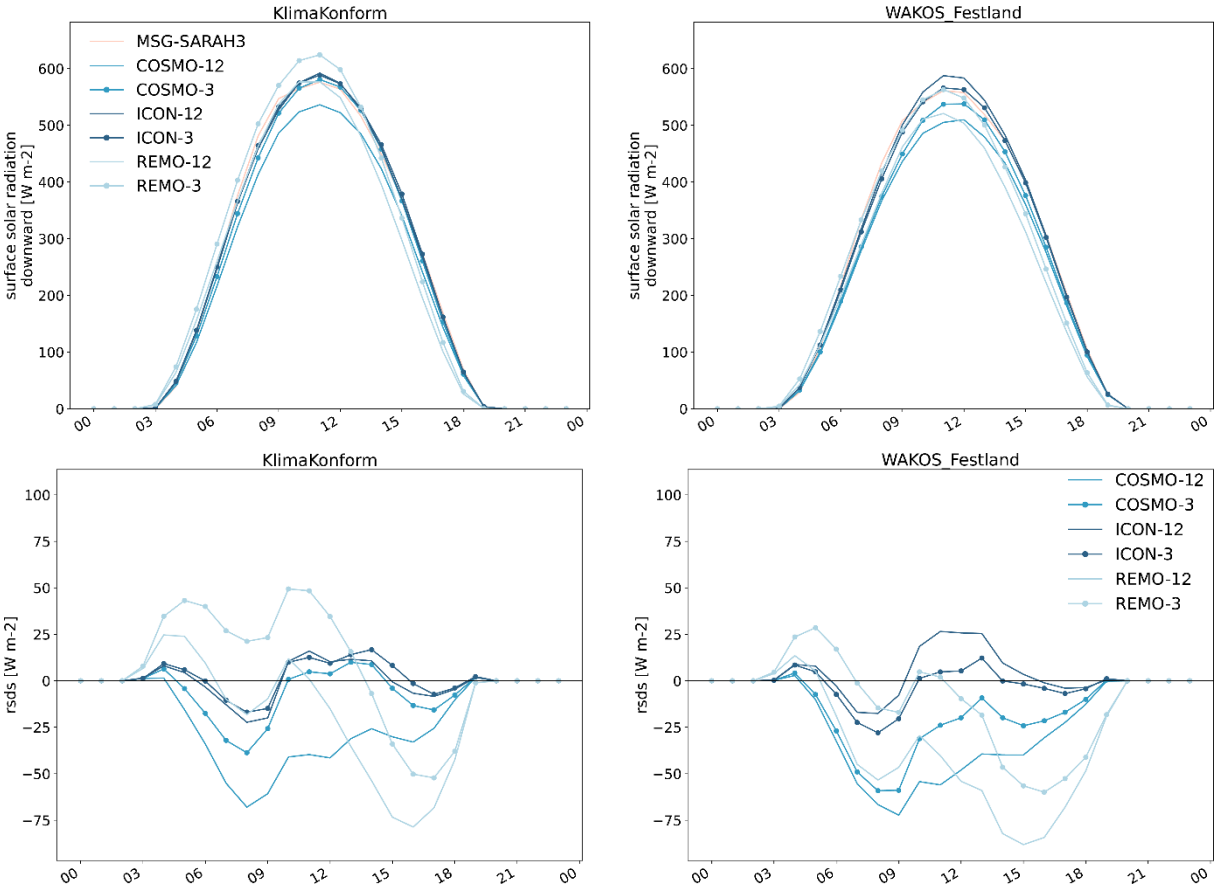


Abbildung 2.2.15: Mittlerer Tagesgänge der Globalstrahlung in den Modellregionen KlimaKonform und Wakos (oben). Tagesgang der Differenzen der Globalstrahlung zwischen den NUKLEUS Evaluierungssimulationen und dem Satellitendatensatz MSG_SARAH3 für die beiden Modellregionen KlimaKonform und WAKOS (nur Landflächen) für die Monate Juni und Juli (2005 – 2014).

Die Auswertungen der mittleren Tagesgänge der bodennahen Windgeschwindigkeit (Abbildung 2.2.16) zeigen für die Modelle und auch für die Regionen ein sehr unterschiedliches Verhalten. In Bezug auf das Gebiet KlimaKonform tritt in CCLM in den ersten etwa 15 Stunden des Tages eine Überschätzung von etwa 0.5 m/s auf, während am Nachmittag der Fehler kurzzeitig sehr gering ist und er in den Abendstunden wieder größer wird. REMO weist kaum eine Variabilität des Fehlers von der Tageszeit auf (vergleichsweise großer Fehler beim REMO-12). Die ICON-Simulationen zeigen wie CCLM eine Abhängigkeit des Fehlers von der Tageszeit. Der 3km-Lauf zeigt dennoch den kleinsten Fehler aller Modelle. Bemerkenswert ist bei dieser Simulation der Zusammenhang zwischen dem Modellfehler und dem Übergang von nächtlicher Restgrenzschicht zu gut durchmischter Grenzschicht am Tag.

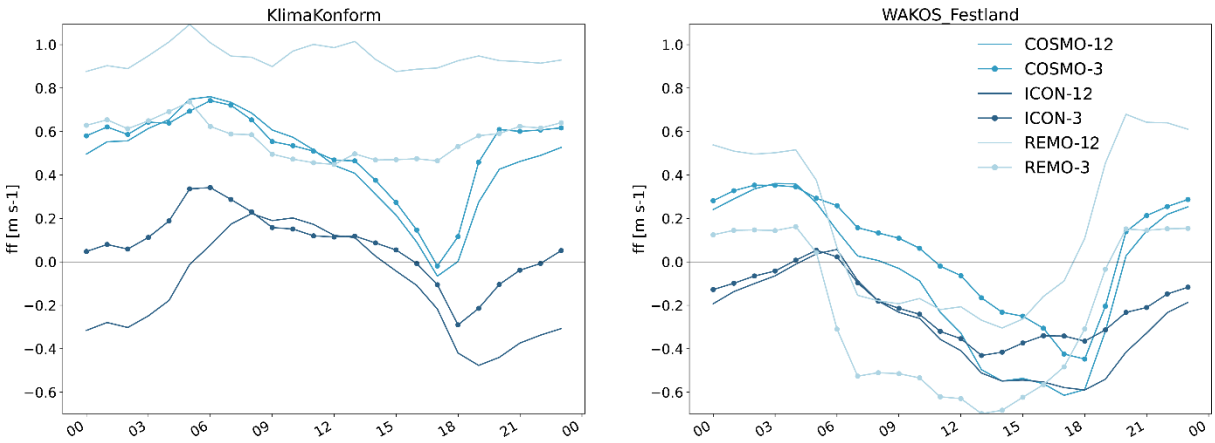


Abbildung 2.2.16: Tagesgang der Differenzen der Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe der Monate Juni und Juli (2005 – 2012) zwischen den NUKLEUS Evaluierungssimulationen und dem Datensatz TRY_v001 für die beiden Modellregionen KlimaKonform und WAKOS (nur Landflächen).

Für den Vergleich der Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe liegen für den benötigten Zeitraum keine gegitterten Daten zum Vergleich vor. Deshalb wurde er anhand der nächstliegenden Messmasten in Falkenberg (Brandenburg) und FINO1 (Nordsee) durchgeführt. Die Auswertung des Tagesgangs der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe (100 m über Grund) verdeutlich die Unterschiede bei der Grenzschichtentwicklung über See (Abbildung 2.2.17, rechts) und über Land (Abbildung 2.2.17, links). Charakteristisch für das kontinentale Falkenberg ist eine sogenannte „Doppelwelle“ in den Sommermonaten (rote Linie, links). Obwohl alle Modelle in der Lage sind, das morgendliche Minimum der Windgeschwindigkeit gut wiederzugeben, ist das abendliche Minimum nur in CCLM-12 gut ausgeprägt. Die Abweichung der Windgeschwindigkeit ist für ICON-3 am höchsten und für ICON-12 am geringsten. Im Gegensatz zu Falkenberg, ist ein Tagesgang der Windgeschwindigkeit über dem Wasser (FINO1) kaum ausgeprägt – die Variabilität über den Tag liegt bei unter 5%. Die Modelle lösen die nächtlich minimal höheren Windgeschwindigkeiten auf, wobei das CCLM-Modell die Absolutwerte um etwa 0.5 m/s überschätzt. Das ICON weist dagegen kaum einen nennenswerten Fehler auf.

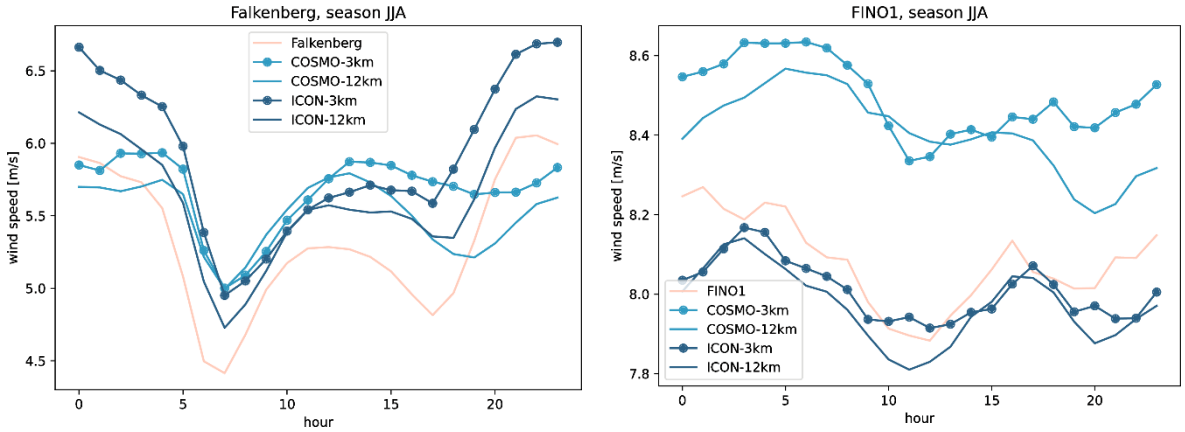


Abbildung 2.2.17: Tagesgang der Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe an den Messmasten Falkenberg (bei Lindenberg) und FINO1 für die Sommermonate Juni, Juli, August.

Durch die starken Verzögerungen bei der Bereitstellung der Daten (Details siehe AP1) konnten nicht alle geplanten Auswertungen durchgeführt werden. Die in AP2.2 nicht genutzten Ressourcen wurden insbesondere für die Durchführung der Simulationen in AP1, die deutlich mehr Aufwand erforderten, verbraucht.

AP2.3 Postprocessing und Bias-Adjustment (JMU)

Diverse Arbeiten haben den Mehrwert der Bias-Korrektur (BC) zur Verbesserung der Nutzbarkeit von RCMs für Klimafolgenstudien hervorgehoben. Dennoch ist eine vergleichende Validierung der Auswirkungen verschiedener BC-Techniken sowohl gegenüber dem statistischen als auch dem physikalischen Aspekt der bias-korrigierten RCM-Daten erforderlich. Die Gründe dafür sind, dass (i) allgemein angewandte BC-Techniken nicht alle statistischen Verteilungsaspekte des RCM verbessern (z.B. Ibebuchi et al., 2022a), sodass es notwendig ist, zu untersuchen, welche Aspekte verbessert werden können; (ii) die BC die Menge des erlaubten Niederschlags in jeder einzelnen Gitterbox korrigiert und somit die Kovariabilität der Gitter und die damit verbundenen simulierten meteorologischen Prozesse, die die raumzeitliche Kovariabilität der Gitter bestimmen, verändert werden; (iii) mögliche Modifikationen des Aspekts/ der Aspekte der simulierten statistischen Momente und der simulierten meteorologischen Muster bedeuten könnte, dass sich die physikalische Konsistenz (d.h. die Kohärenz zwischen den Klimavariablen) der bias-korrigierten Daten ebenfalls verändert. Daher werden drei verschiedene BC-Techniken in Bezug auf die statistische Verteilung und simulierte meteorologische Muster von Temperatur und Niederschlag verglichen.

Das Hauptziel dieser Projektarbeiten bestand darin, die Bewertung von regionalen Klimamodellen (RCMs) hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Darstellung großer atmosphärischer Zirkulationsmuster in Westeuropa zu untersuchen und gleichzeitig die Verbesserung der simulierten Niederschlags- und Temperaturdaten für Deutschland durch BC zu analysieren. Ein prozessbasierter Ansatz wurde angewandt, um den Mehrwert verschiedener BC-Techniken zu bewerten und deren Auswirkungen auf die physikalische Konsistenz des RCM-Outputs zu untersuchen. In diesem Kontext wurden vier Hauptziele verfolgt:

1. Evaluierung der Genauigkeit der Darstellung großer atmosphärischer Zirkulationsmuster in Westeuropa durch die RCMs unter Verwendung von Reanalyse-Daten als Referenz.
2. Vergleich der Leistung verschiedener BC-Techniken bei der Verbesserung der simulierten Statistiken von Temperatur und Niederschlag im Vergleich zu Beobachtungsdaten.
3. Bewertung des Einflusses von BC-Techniken auf die simulierten meteorologischen Muster der Klimavariablen sowie der zugrundeliegenden Mechanismen.
4. Beurteilung des Einflusses von BC-Techniken auf saisonale Korrelationen zwischen Temperatur und Niederschlag.

Die Ergebnisse dieser Studie deuten darauf hin, dass RCMs in der Lage sind, große atmosphärische Zirkulationsmuster in Westeuropa zufriedenstellend darzustellen. Dennoch können systematische Fehler in den simulierten Niederschlags- und Temperaturdaten auftreten, die durch die Anwendung von BC-Techniken verbessert werden können. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Wahl der BC-Technik einen erheblichen Einfluss auf die physikalische Konsistenz des RCM-Outputs hat. Einige BC-Techniken können zu einer übermäßigen Veränderung der Klimavariablen führen, was die Konsistenz zwischen der simulierten und tatsächlichen Variabilität beeinträchtigt. Daher ist es ratsam, die BC-

Technik sorgfältig auszuwählen und deren Auswirkungen auf die physikalische Konsistenz der RCM-Ergebnisse zu berücksichtigen.

Zusätzlich wurden Unterschiede in der Leistung der BC zwischen den Jahreszeiten und Regionen in Deutschland festgestellt. Einige BC-Methoden wiesen eine deutlichere Verbesserung der simulierten Niederschlagsstatistiken im Winter im Vergleich zum Sommer auf. Der Effekt der BC wird in Abb. 2.3.1 beispielhaft für die saisonalen Niederschlagsmuster in Deutschland dargestellt. Der Validierungszeitraum erstreckt sich von 1978 bis 2005. Für das RCM REMO zeigt sich, dass alle drei Korrekturmethoden je nach Jahreszeit und Region einen Mehrwert bei der Anpassung der mittleren täglichen Niederschlagswerte an die Beobachtungen des E-OBS-Datensatzes hervorbringen. Die teils großen Abweichungen in den Mittelgebirgen und am Alpenrand werden erfolgreich korrigiert. In den meisten Jahreszeiten reichen bereits sehr einfache Korrekturansätze wie die Linearskalierung (LS) oder eine univariate verteilungsbasierte Korrektur (EQM). Im Sommer mit seinen vorwiegend kleinräumigen konvektiven Niederschlägen wird das beste Ergebnis aber erst mit einem räumlich multivariaten verteilungsbasierten Algorithmus (MQDM) erzielt.

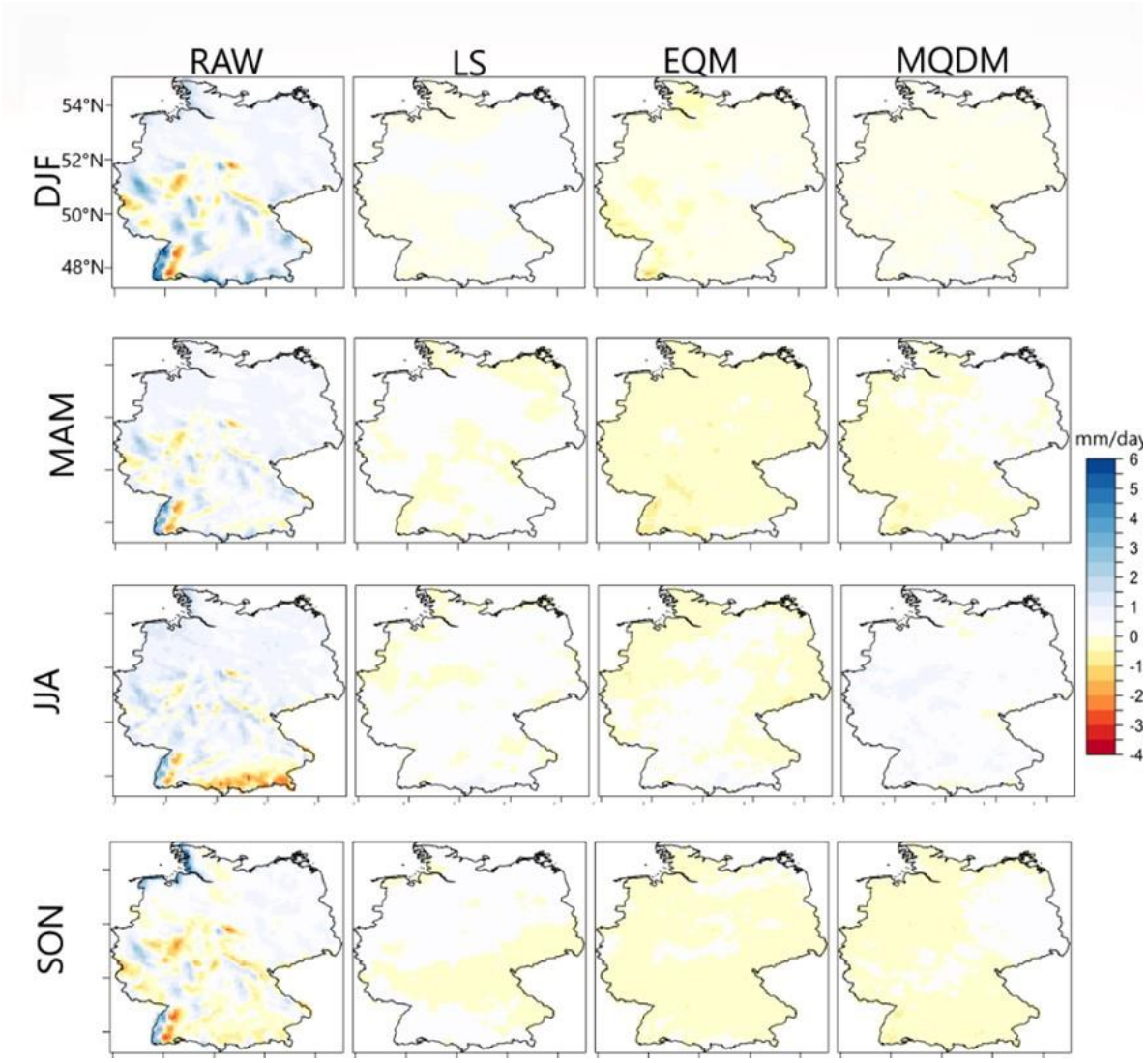


Abbildung 2.3.1: Saisonaler Niederschlags-Bias in den Rohdaten des Klimamodells REMO im Vergleich zu E-OBS (links) und Effekte dreier unterschiedlicher Bias-Korrektur-Verfahren (andere drei Spalten)

über den Zeitraum 1978-2005: LS = Linearskalierung, EQM = univariates Quantile Mapping, MQDM = multivariates Quantile Mapping.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass tägliche Daten im Vergleich zu monatlichen Daten eine bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungen aufweisen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Effekt der BC auf die simulierten meteorologischen Muster je nach räumlichem Maßstab variiert. Auf größeren Maßstäben haben die Techniken nur geringe Auswirkungen, während sie auf kleineren Maßstäben die lokalen räumlichen Muster der simulierten meteorologischen Muster beeinflussen können. Es ist auch wichtig zu betonen, dass die räumlichen und zeitlichen Skalen, auf denen die Klimavariablen betrachtet werden, eine bedeutende Rolle spielen. Die Leistung der BC kann je nach räumlicher und zeitlicher Skala variieren. Daher ist es ratsam, die Eignung der BC-Technik für verschiedene räumliche und zeitliche Skalen zu berücksichtigen.

Einige BC-Techniken können die Korrelationen zwischen den Klimavariablen, zum Beispiel zwischen Temperatur und Niederschlag, auf bestimmten Skalen unangemessen erhöhen oder verringern, was die physikalische Konsistenz des RCM-Outputs beeinträchtigt. Dies ist besonders für die Wirkmodellierung in den Modellregionen problematisch, wo gleichzeitig mehrere Klimavariablen als Antrieb verwendet werden. Abb. 2.3.2. zeigt beispielhaft, wie die Korrelationsmuster zwischen Wintertemperaturen und Winterniederschlag über Deutschland in Beobachtungsdaten und in den Rohdaten des REMO-Modells aussehen (links und Mitte). Trotz der hohen räumlichen Heterogenität reproduziert das Klimamodell das beobachtete Muster mit einer sehr hohen Güte. In der rechten Teilabbildung wird deutlich, dass dieses mutmaßlich korrekte Korrelationsmuster nach der Bias-Korrektur von Wintertemperatur und Winterniederschlag erhalten bleibt. Das bedeutet, dass die beiden Variablen jede für sich nun verlässlicher dargestellt werden können und ihre physikalische Konsistenz trotzdem nicht beeinträchtigt wurde.

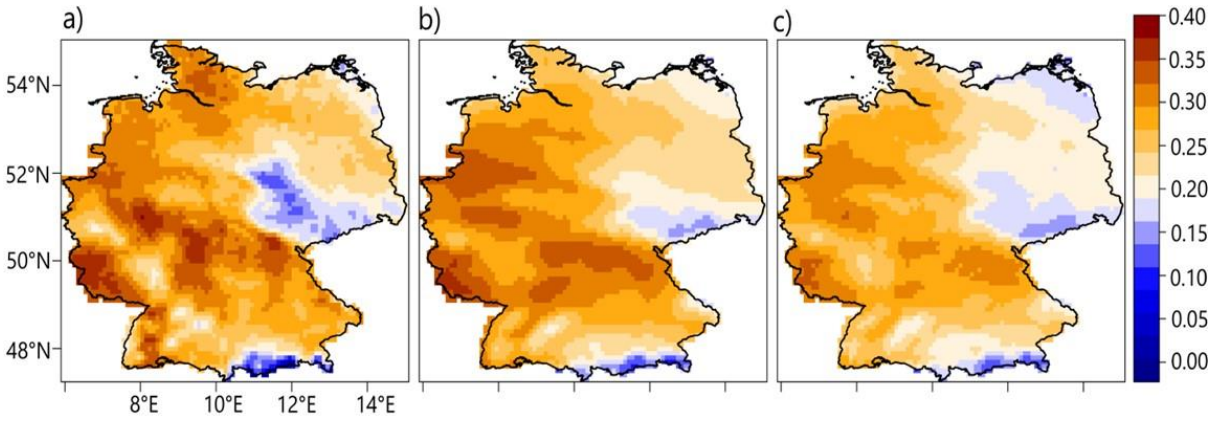


Abbildung 2.3.2.: Korrelationsmuster zwischen bodennaher Temperatur und Niederschlag im Winter (DJF) über den Zeitraum 1978-2005 in E-OBS (Links), im Originaloutput des REMO-Modells (Mitte) und in den Bias-korrigierten REMO-Daten unter Verwendung der MQDM-Methode.

AP3 – Schnittstellen (Leitung: DKRZ)

Ein weiterer wesentlicher Aspekt in NUKLEUS neben der reinen Datensammlung war die Verbesserung der Schnittstelle zu den Anwendern in den Modellregionen. Dafür wurde die etablierte Analyseinfrastruktur Freva genutzt. Basierend auf den Arbeiten mit den Modellregionen wurden Schnittstellen entwickelt, die zum Teil als Freva Plugins umgesetzt werden konnten.

AP3.1 Bereitstellung einer einheitlichen Analyseinfrastruktur (DKRZ, Hereon)

An der Schnittstelle zwischen der Klimamodellierung in NUKLEUS und den anwendungsorientierten Projekten der verschiedenen Modellregionen wurden bedeutende Fortschritte in der Entwicklung und Implementierung von Schlüsselsoftware-Komponenten erzielt. Im Zentrum stand die Freva Software (Kadow et al., 2021), die als leistungsfähiges Werkzeug für die Datenanalyse und -suche fungiert (Abb. 3.1.1.).

*Abb. 3.1.1: Für das Gesamtprojekt RegIKlim dient **www-regiklim.dkrz.de** als Web-Schnittstelle zu den Klimamodelldaten von NUKLEUS und den Analyse Tools.*

Entwickelte Plugins

Während der Fördermaßnahme wurde das Freva Plugin *ClimPact* (https://ch1187.gitlab-pages.dkrz.de/plugins4Freva/climpact/) entwickelt. Dieses Werkzeug ermöglicht es Forschern und Anwendern, maßgeschneiderte Klimadaten für ausgewählte Regionen zu extrahieren und abzurufen. Sein Design und seine Funktionen wurden durch intensive Kollaboration und Rückmeldungen von beteiligten Modellregionen geprägt, wodurch es als Paradebeispiel für nutzergetriebene Innovation dient. Der Workflow von *ClimPact* wurde für die zweite RegIKlim Statuskonferenz visualisiert (Abb. 3.1.2). Das Plugin stellt nicht nur Klimakenngrößen bereit, sondern ermöglicht auch die Speicherung dieser Daten im gewünschten Format auf dem Cloudspeicher des DKRZ, wodurch eine leichtere Zusammenarbeit und Datenweitergabe zwischen den Projektpartnern ermöglicht wird. Mit über 500 Anwendungen während der ersten NUKLEUS Phase ist *ClimPact* eines der populärsten Freva Plugins.

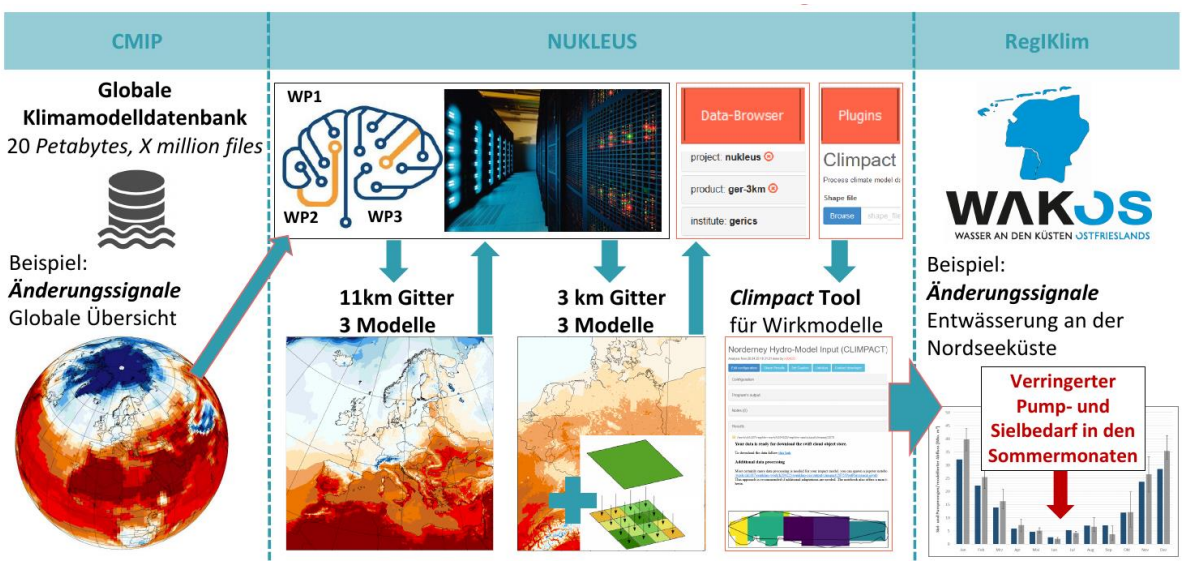


Abbildung 3.1.2: Modellkette und Ko-Kreation des ClimPact Plugins zur Datenaufbereitung. (Visualisierung NUKLEUS und Jenny Kebschull (Balkendiagramm zu Pump- und Sielbedarf, WAKOS).

Neben *ClimPact* wurde im Austausch mit den Klimamodellierern von NUKLEUS ein weiteres Plugin zur Berechnung von lokalen Klimawandelsignalen erstellt. Das Plugin *ClimateChangeProfile* (siehe Abb. 3.1.3.) ist in der Lage, sich verschiedene Klimawandelindikatoren von unterschiedlichen Variablen in vor- oder nutzerdefinierten Regionen zu berechnen.

Systemnachhaltigkeit

Um die Nachhaltigkeit und Skalierbarkeit des Freva-Systems zu gewährleisten, wurde eine zentrale Deployment-Routine erstellt. Dieses Tool, verfügbar unter *Freva-deployment.readthedocs.io*, wird verwendet, um Freva Instanzen effizient auf einer Vielzahl von Systemen und Institutionen einzurichten. Weiterhin wurde das System modernisiert und optimiert, indem alle zugehörigen Services, wie den Datenbankserver und den „Apache Solr“ Suchserver, in Docker Containern bereitgestellt wurden und die Weboberfläche des Systems überarbeitet wurde. Diese Entscheidung war maßgeblich, um maximale Flexibilität sowie Wartungs- und Nutzerfreundlichkeit zu gewährleisten.

Zudem wurde eine innovative Datenbrowser API entwickelt, die in zukünftigen Projektphasen weitreichende Anwendung finden wird. Diese API erweitert das Potenzial der Software und ermöglicht eine effizientere und vielseitigere Datennavigation und -analyse.

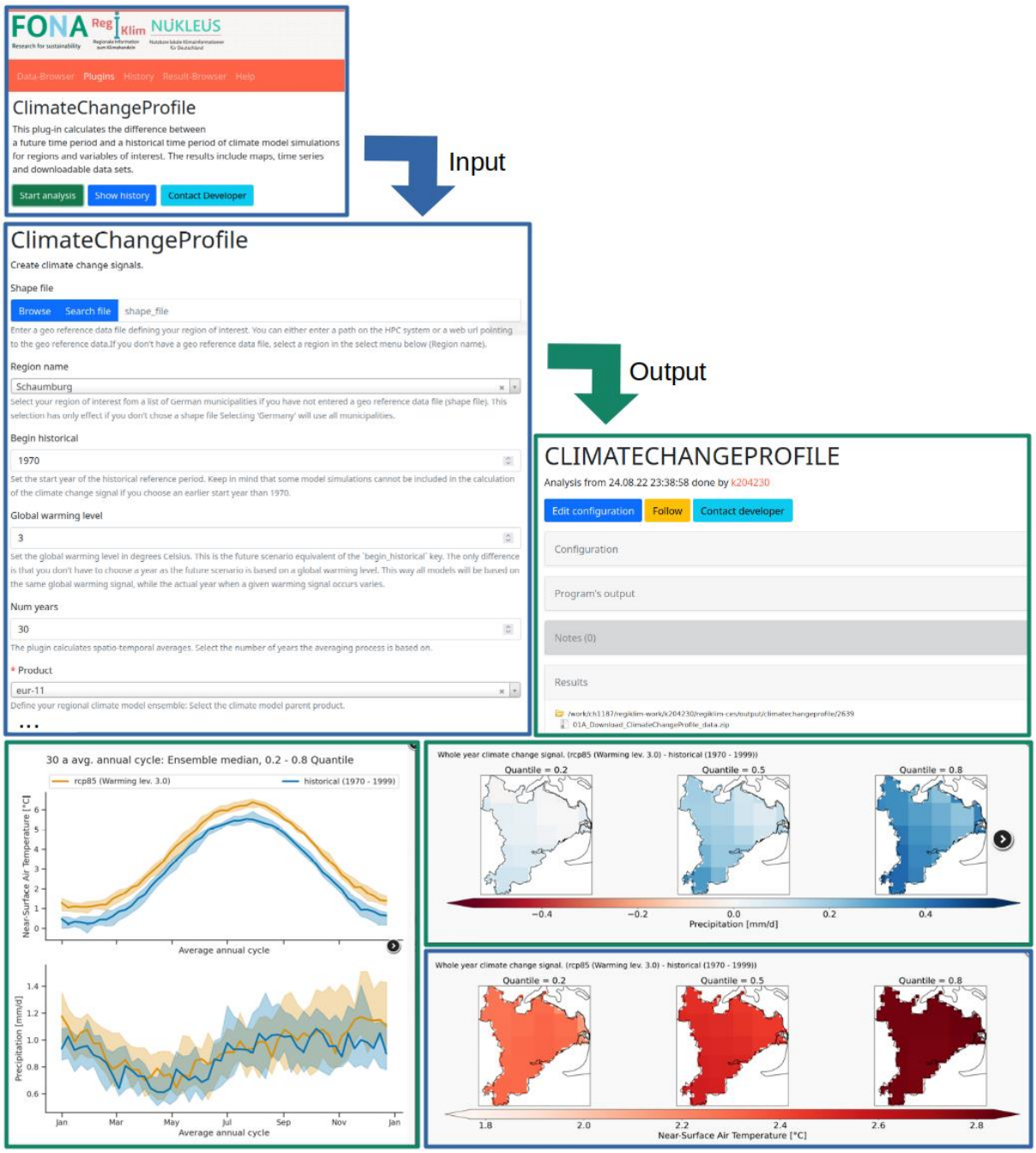


Abbildung 3.1.3: Beispielhafter Workflow für ClimateChangeProfile vom Start der Analyse über den Masken-Input der Weboberfläche zum Output mit Karten des Klimaänderungssignals, Linienplots der gemittelten Jahresgänge und der Download-Option der zugrundeliegenden Daten.

AP3.2 Definition und Implementierung von Schnittstellen zu den Modellregionen (Hereon, JLU, TUD)

Ein wichtiger Baustein von AP3 war die Verankerung von Schnittstellen zwischen der Klimainformation und den Anwendungen der Modellregionen. Die Definition und Implementierung der Schnittstellen ist u.a. von der Sensitivität von Wirkmodellen auf meteorologische Eingabegrößen und Geodaten abhängig. Verschiedene Stadtklimamodelle wurden mit den Ausgaben aus Klimamodellen und mit

Geodaten verschiedener Genauigkeitsstufen und räumlicher Auflösungen angetrieben, um die Unsicherheiten und Sensitivitäten der Wirkmodelle zu quantifizieren. Für Anwendungen der Modellregionen, die eine höhere räumliche und zeitliche Skala als von AP1 angeboten Modelldaten benötigen, wurden nachgefragte Simulationen mit verschiedenen Verfahren der Bias-Korrektur und des Downscalings nachbearbeitet.

Bedarfsabfrage in den Modellregionen

Startpunkt für die Definition der benötigten Schnittstellen zwischen Klima- und Wirkmodellen war eine Abfrage der Bedarfe der Modellregionen an regionalen und lokalen Klimainformationen. In einer resultierenden Matrix wurden Informationen über die nachgefragten Anwendungen in den Modellregionen zusammengestellt: u.a. (1) Prozesse, (2) direkte und abgeleitete Klimagrößen, (3) zeitliche und räumlich Auflösung, (4) statistische Datenaufbereitung, (5) Unsicherheitsbereiche. Aus gemeinsamen Workshops wurden Vorgaben für die Definition von Schnittstellen zwischen regionalen Klima- und mikroskaligen Wirkmodellen (u.a. Hydrologie- und Stadtklima-Modelle) abgeleitet, eine Vorarbeit für die Entwicklung von Plugins auf der Freva-Plattform (AP 3.1). Darüber hinaus wurden mit den Modellregionen zentrale Fragen der NUKLEUS-Klimamodellsimulationen diskutiert, die zu einem abgestimmten Simulationsprotokoll führten (AP 1). Die entwickelten Plugins wurden fortlaufend getestet (insbesondere *ClimPact*) bzw. Tests der Anwender in den Modellregionen begleitet.

Unsicherheiten in der Modellkette und Quantifizierung von Modellsensitivitäten

Ein Fokus der inhaltlichen Arbeiten im AP 3.2 war auf die folgenden Kernfragen gerichtet: (1) Wie sensitiv reagieren Wirkmodelle auf Unsicherheiten der Klimamodelldaten im Vergleich zu Unsicherheiten in topografischen und Landnutzungsdaten? (2) Welche Unsicherheiten sind für die Anwendungen in der Praxis akzeptabel?

Um diese Fragen anhand ausgewählter Wirkmodellsimulationen (*Tabelle 3.2.1*) zu untersuchen, wurde anhand der Bedarfsanalyse ein Anwendungsfall mit sehr hoher Priorität für die Modellregionen ausgewählt: Bewertung der Hitzebelastung in Städten und Ableitung von wirksamen Anpassungsmaßnahmen. Dabei wurden die mikroskaligen Atmosphärenmodelle ENVI-met (u.a. Bruse und Fleer, 1998), SOLWEIG (u.a. Lindberg et al., 2008) und HIRVAC (u.a. Ziemann, 1998) eingesetzt.

Tabelle 3.2.1: Übersicht zu den verwendeten Stadtklimamodellen für die Sensitivitätsanalysen.

Eigenschaften/Modell	ENVI-met	SOLWEIG	HIRVAC
Modelltyp	3D prognostisches Grenzschichtmodell (RANS) mit Boden/Vegetation	3D Strahlungstransfermodell	1D, 2D prognostisches Grenzschichtmodell (RANS) mit Boden/Vegetation
Geodaten	DOM, **Variation Landnutzung**	**Variation DOM-Auflösung**, Vegetationsbedeckung	**Variation Landnutzung**, räumlich aufgelöste Vegetation
Meteorologische Anfangsdaten	**Variation der Initialwerte** Temperatur, Wind, Feuchte, Strahlung	Stündliche meteorologische Daten (Tagesgang), **Variation Strahlung**	Initialwerte Temperatur, Wind, Feuchte, Strahlung
Auflösung Ausgabedaten	dx: 1…10 m, dz: 0.4 m und mit der Höhe zunehmend	dx: 0.25…2 m (DOM), Ausgabe an der Oberfläche	dx: 1…100 m, dz: 0.1 m und mit der Höhe zunehmend

Mit dem etablierten dreidimensionalen Stadtklimamodell ENVI-met wurden insgesamt ca. 80 instationäre Modellsimulationen durchgeführt in je einem Großstadt-Quartier in Dresden (Plattenbau) und Erfurt (Gründerzeitviertel; *BMBF-Projekt HeatResilientCity I und II*) sowie in den Mittelstädten Plauen und Naumburg (Modellregion *KlimaKonform* im Projekt RegIKlim). Das Ziel dieser

Sensitivitätsanalyse bestand darin zu prüfen, inwiefern sich durch Änderungen des meteorologischen Antriebs aus Klimamodelldaten räumliche Muster der Lufttemperatur verändern und damit auch Auswirkungen auf die Bestimmung von Hotspots der urbanen Wärmebelastung haben. Außerdem wurden Parameter der Landnutzung variiert (u.a. mit/ohne Topografie, mit Planungsszenarien: mehr/weniger urbanes Grün/Versiegelung). Damit wurde die Auswirkungen der Unsicherheit von Geodaten (z.B. geringe räumliche Auflösung, veraltete Datengrundlage Landnutzung) getestet. Im Folgenden werden einige Ergebnisse von Simulationen vorgestellt. Die Simulationen wurden für wolkenlose Sommertage mit Starttemperaturwerten durchgeführt, die für mittlere oder extreme Hitzeperioden in der Gegenwart bzw. Zukunft in Mitteldeutschland typisch sind.

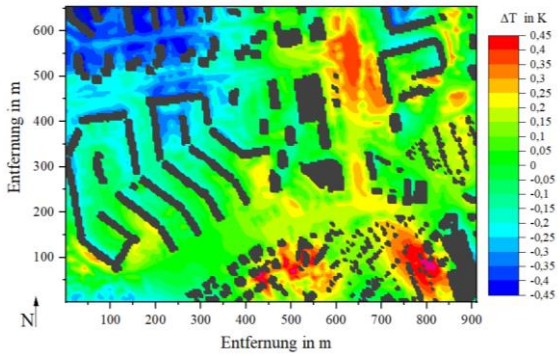
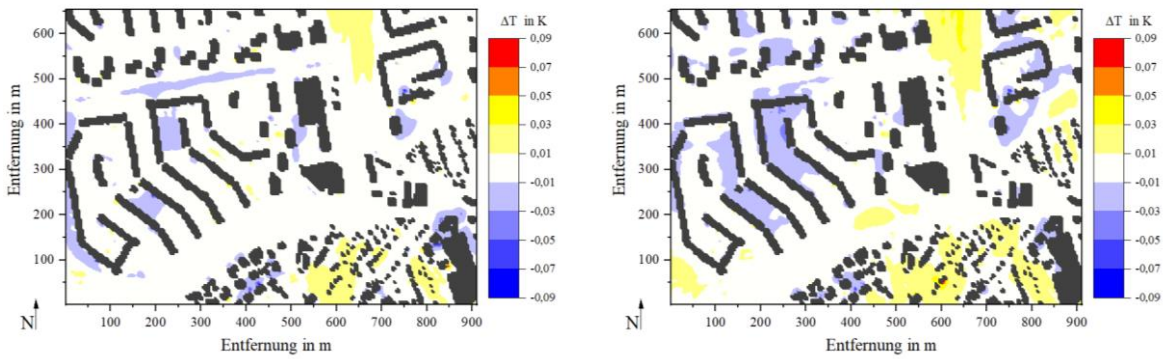


Abbildung 3.2.1: ENVI-met-Simulation Dresden, 15. Juni, 14:00 MEZ, Abweichung der Lufttemperatur in 1 m Höhe ü. Gr. vom Flächenmittelwert, Gebäude: Dunkelgrau, initiale Lufttemperatur T_{init}=22°C, Wind: 4 m/s.

Versiegelte und relativ offene Flächen haben in der Mittagszeit eine vergleichsweise höhere Lufttemperatur (Abb. 3.2.1: gelb-rot). Die Wirkungen von Bäumen, primär durch Beschattung und sekundär durch Transpiration, führen erwartungsgemäß zu einer geringeren Lufttemperatur (Abb. 3.2.1: blau-grün). Es ist zu berücksichtigen, dass die Hitzebelastung im Quartier auch durch Strahlungsgrößen, Luft-feuchte und Windgeschwindigkeit bestimmt wird. Resultierende thermische Indizes weisen strahlungsbedingt eine deutlich stärkere räumliche Variabilität als die Lufttemperatur auf (Ziemann et al., 2021).

Die räumlichen Muster des Temperaturfelds ändern sich bei variabler Initialtemperatur nur geringfügig (Abb. 3.2.2). Diese Ergebnisse bestätigen sich auch durch die Analyse der Häufigkeitsverteilung der räumlichen Temperaturunterschiede und sind ebenfalls für andere Tageszeiten gültig (Abb. 3.2.3 links und Mitte).



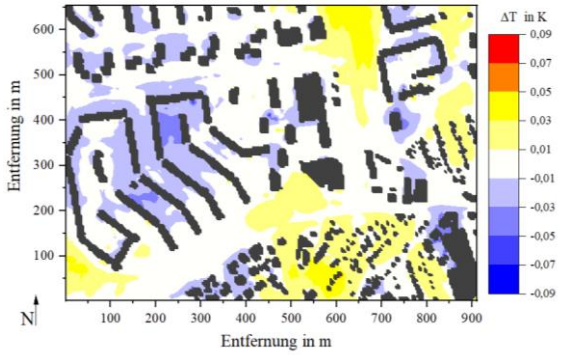


Abbildung 3.2.2: ENVI-met-Simulationen siehe Abb. 3.2.1, Farbskala: Differenzen der Abweichung vom Flächenmittelwert für verschiedene initiale Lufttemperaturwerte, oben links: DT24-DT22, oben rechts: DT26-DT22, unten links: DT28-DT22.

Im Vergleich zum Temperaturantrieb hängt die Spannbreite der räumlichen Variabilität stärker von der initialen Windgeschwindigkeit und von der Landnutzung ab (Abb. 3.2.3 links und Mitte). Spielen die Absolutwerte der Temperatur eine Hauptrolle, dann ist eine aktuelle und hochaufgelöste Information zu den Landnutzungsklassen maßgeblich. Die Simulation ohne Vegetation erhöht die Lufttemperatur im räumlichen Mittel um 1,2 K gegenüber dem Szenario mit realer Vegetation im Modellgebiet in der Mittagszeit.

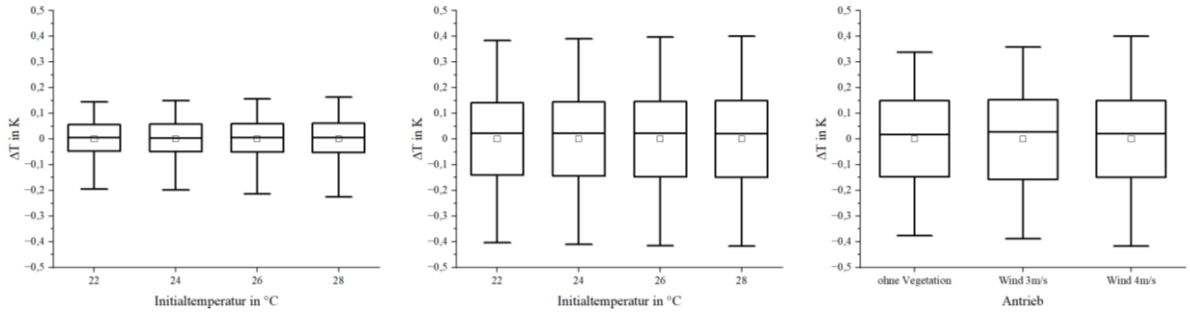


Abbildung 3.2.3: ENVI-met-Simulationen siehe Abbildung 1, Variabilität räumlicher Unterschiede der Lufttemperatur: Box: 25% - 75% mit Median-Linie, Quadrat: Mittelwert, Whisker: 1% - 99%, 04:00 MEZ (links) und 14:00 MEZ (Mitte), rechts: T_{init}=28 °C mit ursprünglicher Vegetation bei unterschiedlicher mittlerer Windgeschwindigkeit und ohne Vegetation (Wind: 4 m/s).

Generelle räumliche Verteilungen der Lufttemperatur bleiben auch bei einer geänderten Modellversion erhalten. Die Weiterentwicklung von Version 3.1 zu 5.02 führte bei den ENVI-met Simulationsergebnissen zu einer Verstärkung der räumlichen Unterschiede in den „warmen“ und „kalten“ Bereichen. Damit vergrößert sich insgesamt der Wertebereich der räumlichen Variabilität und stimmt eher mit Messungen überein (Ziemann et al., 2019). Die Nutzung verschiedener Modellversionen ist mit einer begrenzten Übertragbarkeit von Ergebnissen verbunden.

Die folgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse von ENVI-met Modellsimulationen aus der Modellregionen KlimaKonform. In diesem Modellgebiet in Plauen spielt die Topografie eine Rolle. Von Südwest nach Nordost fließt die Weiße Elster (Abbildung 3.2.4, links). In der Mittagszeit ist die Oberflächentemperatur (nicht dargestellt), aber auch die Lufttemperatur (Abbildung 3.2.4, Mitte) am Südhang signifikant höher als am Nordhang. Die Auswirkungen der Nichtbeachtung der relativen Höhenunterschiede auf die Oberflächen- und Lufttemperatur standen im Fokus der Sensitivitätsstudie. Bereits bei relativen Unterschieden bis zu 60 Höhenmetern resultieren signifikante Unterschiede in der Oberflächentemperatur T_S (Abbildung 3.2.4, rechts): eine markante Verringerung von T_S auf dem Nordhang und punktuelle Abweichungen von T_S durch eine Verschiebung von Schattenwurf (z.B.

Bäume). Geeignete Wirkmodelle und aktuelle Topografiedaten sind für realitätsnahe Simulationsergebnisse eine notwendige Voraussetzung.

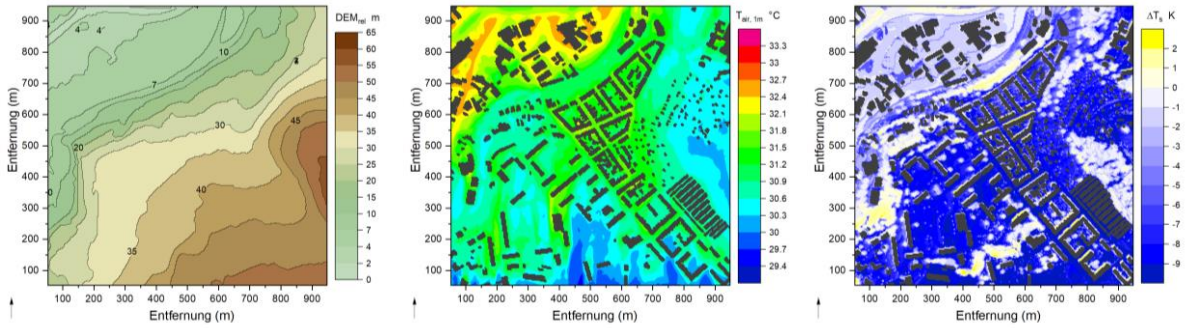


Abbildung 3.2.4: Modellgebiet ENVI-met Plauen: Relative Topografie (links), Lufttemperatur am 03. Juli um 12:00 MEZ in 1 m Höhe ü. Gr. (Mitte), Differenz der Oberflächentemperatur zwischen den Modellsimulationen mit und ohne Topografie (rechts).

Weitere Modellsimulationen mit SOLWEIG und HIRVAC untersuchten den Einfluss der räumlichen Auflösung des digitalen Geländemodells, der Art der Landnutzung, der Vegetationsparameter sowie der Globalstrahlung auf Größen der thermischen Belastung (mittlere Strahlungstemperatur, Lufttemperatur).

Zusammenfassend lässt sich aus den Sensitivitäts- und Unsicherheitsstudien feststellen: Je höher aufgelöst die Simulationen durchgeführt werden und je kleinteiliger das Simulationsgebiet ist, desto höher ist auch der Einfluss von Geodaten auf das Ergebnis von mikroskaligen Modellen im Vergleich zum Modellantrieb mit Klimadaten. Aktuelle, hoch aufgelöste und genaue Geodaten sind für verlässliche Wirkmodellanalysen unerlässlich.

Der umfangreiche Datensatz an vergleichbaren Modellsimulationen ermöglicht auch für die nächste Phase von RegIKlim weitere Bewertungen der Sensitivität von häufig in der Praxis genutzten Wirkmodellen für Stadtklimaanalysen. Die bisher genutzten Klimamodelldaten zur Ableitung des Klimaänderungssignals der maximalen Tagestemperatur (CMIP5, EURO-CORDEX) werden aktuell durch die inzwischen vorliegenden CMIP6-Daten des hoch aufgelösten NUKLEUS-Modellensembles ersetzt.

Schnittstellenverbesserung durch Bias Korrektur und statistische Herunterskalierung (Downscaling)

In AP3 wurden verschiedene Wege eingeschlagen die Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Klimamodellierung und Anwendung zu beleuchten (Bedarfsabfrage und Sensitivitätstudien) und zu verbessern (Bereitstellung und Aufbereitung relevanter Datensätze über Freva). Einen weiteren Ansatz stellt die Nachbearbeitung der regionalen Modelsimulationen mit geeigneten Bias-Korrekturmethoden dar. Hierbei ist das Ziel verlässliche Informationen über den Klimawandel und eine statistische Herunterskalierung auf eine geeignete Auflösung zu liefern, die den Bedarfen der Modellregionen entspricht. Denn u.a. bestätigte die Bedarfsabfrage in den Modellregionen, dass regionale Klimamodelle aufgrund ihrer systematischen Fehler (Bias), inhärenten Unsicherheiten und geringen räumlichen Auflösung kaum für Impaktanalysen und politikrelevante Anwendungen geeignet sind.

Die Bias-Korrektur (BC) umfasste eine Vielzahl von Klimavariablen, einschließlich des täglichen Niederschlags, der mittleren, minimalen und maximalen Tagestemperaturen, der lang- und kurzwelligen Strahlung und der 10-m-Windgeschwindigkeit testweise aus einem Ensemble von 5 RCMs, die von 5 CMIP5 GCMs angetrieben werden (Tabelle 3.2.2). Die Modelle besitzen jeweils eine

Auflösung von 0,11° und wurden aus der vorherigen Phase der EURO-CORDEX-Initiative ausgewählt. Die bias-korrigierten Ergebnisse decken den Zeitraum von 1961 bis 2100 ab.

Tabelle 3.2.2. GCM/RCM-Kombinationen: Die Verfügbarkeit einer bestimmten Variablen wird durch die farbigen Kästchen angezeigt (hier Niederschlag in grün und Temperatur in braun). Weiße/leere Kästchen bedeuten, dass die entsprechende Variable nicht vorhanden ist.

GCM/RCM	COSMO-CLM4		GERICS-REMO2015		DMI-HIRHAM5		KNMI-RACMO22		SMHI-RCA4	
CNRM-CM5										
EC-EARTH										
HadGEM2-ES										
MPI-ESM-LR										
NorESM1-M										

Täglicher Niederschlag
Tägliche Mitteltemperatur

In NUKLEUS wurde das Quantil-Delta-Mapping-Ansatz von Cannon et. al. (2015) angepasst, um die Bias in den Verteilungseigenschaften der RCM-Outputs zu reduzieren. Diese BC wird auf monatlicher Basis durchgeführt, um die Variation der Verteilungen der Klimavariablen von Monat zu Monat genau zu erfassen. Anschließend wird das bias-korrigierte Ergebnis einem umfangreichen Validierungsprozess unterzogen, bei dem Referenzdaten für Niederschlag und Temperatur aus DWD-HYRAS (Rauthe et al. 2013) und Reanalysedaten für Strahlung und Oberflächen-windgeschwindigkeit aus ERA5-LAND für den Zeitraum 2006 bis 2015 verglichen werden.

Die Modell- und Referenzquantile zeigen nach der BC eine bessere Übereinstimmung (Abb. 3.2.5 für Temperatur und Niederschlag). Mit Ausnahme des von EC-EARTH angetriebenen Modells RACMO (für Frühling und Sommer) und des von HadGEM angetriebenen Modells CCLM (für Herbst) zeigen alle Modelle nach der BC eine Verbesserung in der Darstellung der saisonalen Eigenschaften des Niederschlags. Die Gesamtverbesserung beim Niederschlag liegt zwischen 5% und über 50%. Bei der mittleren Temperatur ist eine Zunahme des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) von bis zu 20% zu beobachten, insbesondere im Frühjahr, Sommer und Herbst.

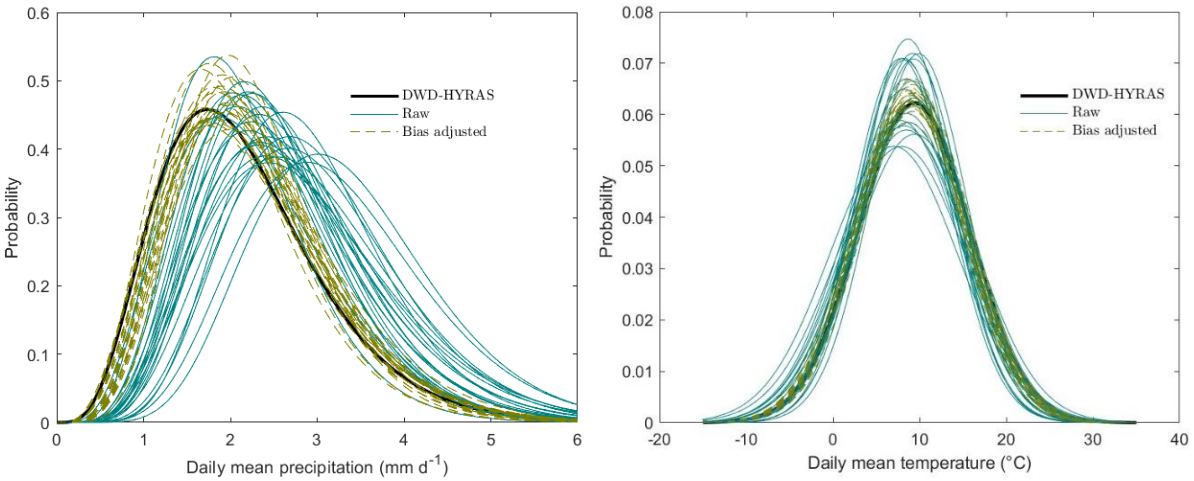


Abbildung 3.2.5 Wahrscheinlichkeitsverteilung für den mittleren Jahreszyklus von Niederschlag (links) und Temperatur (rechts)

Nach Anwendung der BC auf die Oberflächenstrahlung wurde in allen Jahreszeiten eine Verringerung der jeweiligen Bias beobachtet. Der Effekt dieser Methode zeigt sich im RMSE für alle Jahreszeiten und für alle Modelle, einschließlich der fünf vom MPI-ESM-Modell gesteuerten RCMs, sowohl für die kurzwelligen als auch für die langwelligen Komponenten.

Die Windgeschwindigkeit wurde mit den gleichen Modellen wie die Strahlung berechnet. Die Ergebnisse zeigen eine bemerkenswerte Verbesserung von fast 30-40% in der Darstellung der mittleren Windgeschwindigkeitseigenschaften für jede Jahreszeit nach der Bias-Korrektur.

Auswirkung der Bias-Korrektur auf die Mittelwerte und die Variabilität für verschiedene GWL (Global Warming Level)

Temperatur- und Niederschlagsänderungen für drei globale gemittelte Global Warming Level (GWL, 1,5 °C, 2 °C und 3 °C, Tabelle 3.2.3) wurden abgeschätzt. Die BC verbesserte die Übereinstimmung zwischen den Modellen und verringerte die Streuung des Ensembles bzw. die Unsicherheit, insbesondere in den ersten beiden Dekaden. Auch das S/N-Verhältnis verbesserte sich nach der BC um mehr als 70% für den Niederschlag und um 40-50% für die Temperatur, insbesondere in Süddeutschland. Abb. 3.2.6 zeigt die Karten der fraktionalen Änderungen des S/N-Verhältnisses für die Niederschlags- und Temperaturprojektionen für den Zeitraum der 3 °C Erwärmung.

Tabelle 3.2.3 GCMs und die entsprechenden GWLs (des RCP 8.5 Szenarios) sowie die Ensemblegröße der Testdaten aus der CMIP5 Generation in der Studie

GCMs	Ensemble size	GWL 1.5°C	GWL 2°C	GWL 3°C
NorESM1-M	5	2013-2042	2029-2058	2055-2084
CNRM-CM5	5	2012-2041	2027-2056	2050-2079
EC-EARTH	3	2009-2038	2024-2053	2049-2078
HadGEM2-ES	4	2000-2029	2013-2042	2034-2063
MPI-ESM-LR	5	2009-2038	2025-2054	2049-2078

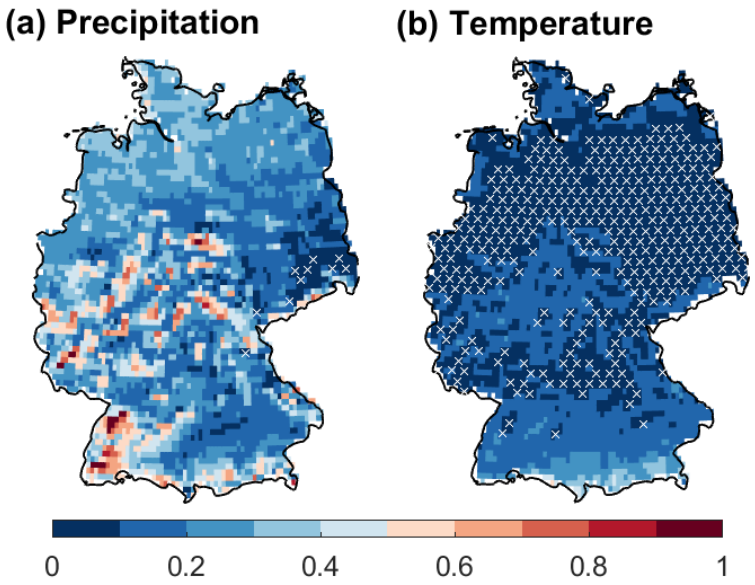


Abbildung 3.2.6 Fraktionsweise Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses in den bias-korrigierten Projektionen im Vergleich zu den Rohprojektionen der mittleren Niederschlags- (a) und Temperaturänderung (b) für die GWL 3 °C. Weiße, kreuzweise Schraffuren zeigen Regionen an, in denen die Nullhypothese gleicher Mittelwerte (statistisch unbedeutende Bereiche) bei einem Signifikanzniveau von 0,01 nicht verworfen werden kann. Positive Werte zeigen eine Verbesserung des S/N-Verhältnisses um die entsprechende Größenordnung nach der Bias-Anpassung an.

Statistisches Downscaling

In NUKLEUS wurden moderne statistische Downscaling-Techniken untersucht und ihre Stärken, Schwächen und Eignung analysiert. Diese Bewertung umfasste fortgeschrittene Methoden wie stochastische Wettergeneratoren, Quantile Mapping, Modellausgangsstatistiken und "perfect prognosis".

Der gewählte "perfect prognosis" (PP) Ansatz (Manzanas et al. 2020), der für NUKLEUS angepasst wurde, basiert auf der Konstruktion von atmosphärischen Analogs aus dem ausgewählten Satz von Prädiktoren. Ein Satz "perfekter" Prädiktoren wird auf der Grundlage des vorhandenen Wissens über die Klimadynamik und der Literatur ausgewählt. Für das Downscaling der Temperatur wird die geopotenzielle Höhe von 500 hPa als Prädiktor gewählt, während für den Niederschlag der Mittlerer Bodendruck reduziert auf Meeresniveau (MSLP), die geopotenzielle Höhe von 500 hPa und die Feuchte von 850 hPa als Prädiktoren dienen. Die Trainings- und Testperioden der PP-Methode sind für die Prädiktoren (Tagesmitteltemperatur und Tagesniederschlag) unterschiedlich, da die Beobachtungsdatensätze der Prädiktoren für unterschiedliche Zeiträume zur Verfügung stehen. Für die mittlere Temperatur wurden die EMO-Daten (Gomes et al. 2020; 1 arcmin Auflösung) gewählt, die für den Zeitraum 1990 bis 2021 verfügbar sind, während für den täglichen Niederschlag die DWD-HYRAS-Daten (1 km Auflösung) für den Zeitraum 1931 bis heute verwendet werden können. Die Methode wurde bereits implementiert und die ersten Ergebnisse sind vielversprechend.

AP3.3 Entwicklung von Modulen für anwenderorientierten Klimamodelloutput (Hereon)

Für den Meilenstein M3.3 (Implementierung von Modulen für die Onlinediagnostik) haben sich im Austausch mit den Modellregionen (siehe AP3.2) keine akuten Bedarfe für kurz- oder langfristig umsetzbare Diagnostiken ergeben. Aus diesem Grund wurde die eingeplante Arbeitszeit für M3.3 in die bei der Projektplanung unterschätzte Schnittstellenarbeit von M3.2 verschoben.

2. Wesentliche Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende Teil der projektbezogenen Ausgaben entfiel auf Personalkosten. Dabei wurden die kalkulierten Kosten eingehalten. Hinsichtlich der Sachkosten entfiel der überwiegende Teil der Ausgaben auf Dienstreisen. Von den ursprünglich geplanten Projekttreffen fanden nach der Corona Pandemie ein NUKLEUS Treffen in Thüngersheim (Juni 2022) und ein RegIKlim-Treffen in Halle/Saale (Mai 2022).

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die dargestellten Arbeiten hätten ohne die BMBF-Zuwendung in dieser Form nicht durchgeführt werden können. Auch die Art und Höhe der Zuwendung sowie der Umfang der geleisteten Arbeiten war angemessen, um die Projektziele zu erreichen.

4. Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

NUKLEUS will die im Projekt erzeugten Simulationsdaten anderen zugänglich machen. Folgende Datenstrategie wird verfolgt: Die Daten der NUKLEUS Simulationen werden derzeit weiter inhaltlich und formal geprüft. Die Konzeption des NUKLEUS Ensembles und wesentliche Untersuchungen werden in einer Referenz Publikation veröffentlicht werden, die derzeit vervollständigt wird. Über das FREVA System wurden den RegIKlim-Partnern bereits NUKLEUS Daten zur Verfügung gestellt. Es gibt bereits mehrere weitere Interessenten außerhalb des Projekts für die Ensemble Simulationen. Es ist nach Einreichung der Referenz-Publikation geplant die Daten auch anderen Interessenten zur Verfügung zu stellen. Es ist das Ziel von NUKLEUS die Simulations-Daten über den DKRZ-Konten des ESGF-Portals frei verfügbar zu machen. Dies erfordert aber noch weitere technische Tests (formale Qualitätsprüfung der Daten und Metadaten gemäß CMOR-Standards) und formale Absprachen (Konformität mit CORDEX-CMIP6 Protokoll, Data Reference Syntax, etc.) notwendig, damit dieser Schritt erfolgen kann. Erfahrungsgemäß dauern diese Prozesse einige Zeit, selbst wenn NUKLEUS bereits erheblichen Aufwand betrieben hat, um die Standards zu erfüllen.

Die in der ersten Phase durchgeführte Analyse der erstellten Simulationen zeigen spezifische Defizite der Regionalmodelle bei der Anwendung auf sehr feinmaschige horizontale Gitterweiten (3 km). Diese Erkenntnisse bilden die Basis für eine Optimierung der Regionalmodelle in laufenden (z.B. BMBF UDAG) und zukünftigen Forschungsvorhaben.

Ein wichtiger Schritt in Richtung einer Operationalisierung und Transferierbarkeit der Modellketten wurde durch die Einbindung der Daten in Freva und die Entwicklung von Plugins in Freva erzielt. Die Einbindung in Freva erlaubt es jedem Nutzer, die Daten selbst auf Verlässlichkeit zu überprüfen und über die in NUKLEUS entwickelten Plugins für die Wirkmodelle passend aufzubereiten. Dies wird besonders dann relevant, wenn die Datenbasis kontinuierlich anwächst und die Evaluierung und Datenaufbereitung von allen Nutzern quasi operationell durchgeführt werden können.

Die Forschungsergebnisse und Datenprodukte aus NUKLEUS werden auch eine wichtige Rolle für andere Forschungsvorhaben bis hin zu internationalen Syntheseberichten wie IPCC spielen. Zu den nationalen Stakeholdern zählen z.B. Forschungsvorhaben wie ClimXtreme und Anschlussprojekte zu Stadtklima im Wandel, die auf Grund ihrer Forschungsfragen von den hochaufgelösten Klimadaten profitieren können. Auf internationaler Ebene werden die Ergebnisse Projekte wie EUCP und die WCRP CORDEX FPS on Convection Initiative mit komplementären Daten unterstützen. Über die Datenprodukte hinaus werden die Ergebnisse und Analysemethoden in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Tagungen vorgestellt.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Erkenntnisse aus anderen Projekten zu regionalen Klima-Ensembles

Erkenntnisse aus CORDEX FPS Convection

Mehrere Partner des NUKLEUS Projekts sind an der Flagship Pilot Study on Convection FPSConv (Coppola et al., 2020) beteiligt. Die Simulationen der Partner wurden auch für NUKLEUS bereitgestellt (vgl. AP1.2). Im Rahmen des Projektes wurde das erste systematische Multimodell Ensemble auf der konvektionserlaubenden Skala (CPM) erstellt. Es wurden dabei wertvolle Erkenntnisse über den Mehrwert aber auch die Herausforderungen bezüglich Simulationen auf der Kilometer Skala erzielt. Einen klaren Mehrwert wurde für Niederschlag gefunden (Ban et al., 2021, Pichelli et al., 2021, Caldas-Alvarez et al., 2023). Relevant sind auch die Erkenntnisse zur Änderung der Charakteristika von konvektiven Zellen und Extremniederschlagsereignissen im Klimawandel (Müller et al., 2022; 2023). Die Studie fand, dass in der Region gegen Ende des 21. Jahrhunderts Extremniederschläge häufiger (12 %) und intensiver (50% mehr Starkniederschläge) werden. Darüber wurde gezeigt, dass sich konvektive Zellen schneller fortbewegen, länger andauern (>5 %) und eine größere Fläche (>15 %) betreffen werden. Weniger eindeutig ist der Mehrwert bei der Temperatur: z.B. fanden Soares et al. (2023), dass die räumlichen Strukturen in CPM-Ensembles besser wiedergegeben werden als auf der EURO-CORDEX Auflösung von 12.5 km (RCM). Sangelantoni et al. (2023) zeigt aber, dass CPM-Simulationen oft Hitzewellen überschätzen. Dies lässt über die unterschiedliche Aufteilung der Flüsse von sensibler und latenter Wärme erklären, die zu einer zu starken Austrocknung des Bodens in CPM-Simulationen und damit über einen erhöhten sensiblen Wärmestrom zu höheren Temperaturen und länger andauernden Hitzewellen führt. Diese Abweichungen betreffen aber vor allem den Bereich südlich der Alpen. Belušić Vozila et al. (2023) zeigten, dass CPM-Ensembles regionale Windsysteme besser wiedergeben können. Diese Kooperation brachte damit wertvolle Erkenntnisse und Untersuchungsansätze für NUKLEUS. Das Modellgebiet deckt allerdings nur den Süden Deutschlands ab und die Simulationen können nur begrenzt für die RegIKlim Modellregionen eingesetzt werden, da nur die ISAP- und die KARE-Region am nördlichen Rand des FPSConv Modellgebiets liegen.

Erkenntnisse aus RegIKlim ISAP

Das KIT ist neben NUKLEUS auch an den Arbeiten in der Modellregion ISAP (Region Stuttgart) beteiligt. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Ensemble aus vier Downscaling-Simulationsketten (CMIP5, rcp8.5) mit CCLM5 vervollständigt, welches Süddeutschland über den Zeitraum 1971-2100 und einer Gitterweite von 2.8 km transient abdeckt. Auf der Grundlage diesen Ensembles wurden die Eingangsdaten für Impaktmodellierung in der Region Stuttgart erzeugt. Schwerpunkte waren die Hitzebelastung (Impaktmodell PALM4U) und Starkniederschlagsgefahrenkarten (hydraulische Modellierung). Die Daten wurden für mehrere Studien erstellt. Eine befasst sich mit der Charakterisierung zukünftiger Hitzewellen in Süddeutschland (Hundhausen et al., 2023a). Eine weitere untersucht angelehnt an KOSTRA-DWD Starkniederschläge verschiedener Dauerstufen und Wiederkehrperioden im Klimawandel (Hundhausen et al., 2023b). Weiterhin wurden die Ensemble-Daten für eine 2-teilige Studie zur Ahr/Erft Flut im Juli 2021 verwendet (Mohr et al., 2023; Ludwig et al., 2023), die eine Einordnung des Ereignisses in den Klimawandel enthalten. Die in diesen Studien gewonnen Erfahrungen in der Nutzung derartiger Daten für Praxisanwendungen sollen in Phase 2 auf

NUKLEUS übertragen werden. Umgekehrt ist in ISAP2 ein Übergang auf das aktuellere NUKLEUS Ensemble vorgesehen

Erkenntnisse aus EUCP

In EUCP wurde eine Simulation auf konvektionserlaubender Skala von Hereon durchgeführt, die auch als Testdaten in NUKLUES Phase 1 genutzt wurden. Darüber hinaus haben die Projektpartner in EUCP diverse weitere hoch aufgelöste Simulationen über verschiedenen Regionen Europas durchgeführt und ausgewertet. So ergaben verschiedene Studien zu Niederschlag und Wind, dass die die höher aufgelösten Daten nicht zwingend die Unsicherheiten des Klimaänderungssignal in den Projektionen reduzieren, aber für viele Anwendungen besser geeignet sind, um lokale Phänomene wie Starkniederschlag und Extremwinde zu beschreiben oder bessere Daten für Wirkmodelle wie z.B. Abflussmodelle liefern.[1] Eine wichtige Erkenntnis ist, dass lokale Starkwinde sogenannte „Sting Jets", die für große lokale Schäden verantwortlich gemacht werden, nur mit hoch aufgelösten Klimamodellen dargestellt werden können und in einem wärmeren Klima häufiger auftreten werden (Manning, et al, 2021). Eine weitere Erkenntnis ist, dass das Zusammenspiel von mehr Feuchtigkeit als Folge höherer Temperaturen und die Zunahme quasi-stationärer Wetterlagen unter Klimawandel zu einem höheren Risiko von Starkregenereignissen führt (Kahraman et al., 2021). Eine ähnliche Situation hat u.a. zu der Ahrtalflut 2021 in Deutschland geführt.

Entwicklungen auf dem Gebiet der Bias-Korrektur

Die Nachbearbeitung von Modellsimulationen im Zuge zunehmenden Bedarfs durch die Auswirkungen des Klimawandels sowie dem Bereitstellen von Frühwarnsystemen, etc. hat zu zahlreichen Bias-Korrekturen, gezielte Downscaling-Übungen sowie neuen Ansätzen im Rahmen anderer Forschungsprojekte geführt. So hat beispielsweise das vom BMWK geförderte DAKI-FWS bias-korrigierte und auf 1 arcmin herunterskalierte saisonale Vorhersagesimulationen für Deutschland erstellt und diese mit MLP mit Faltungsschichten, Convolution--Dense--Deconvolution Networks und Residual Convolutional Neural Networks (CNNs) getestet (Wang et al., 2021; Kumar et al., 2021, Wang and Tian, 2022). Des Weiteren hat das H2020-CLINT-Projekt (Climate Intelligence) KI-gestützte Climate Services für Anwendungen in den Bereichen Wasser, Energie und Landwirtschaft generiert. Für diese Services implementiert CLINT KI-basierte Bias-Korrektur und Downscaling-Pipelines von hochauflösenden CMIP6-ESMs für Europa unter Verwendung von ERA5-Reanalysen und unter Anwendung von CNNs (Vaughan et al., 2022; Wang et al., 2021), insbesondere Deep Residual Network (ResNet)-Architekturen (He et al., 2015). Darüber hinaus befassen sich neue Projekte mit ähnlichen Aspekten, wie beispielsweise das vom BMBF finanzierte ClimXtreme 2-CROP4Europe, mit der Vorbereitung eines Erntemodell-Emulators, der auf einem physikbasierten Bayes'schen Lernsystem (Mullachery et al., 2018) und KI-bias-korrigierten Klimavariablen basiert. Damit können die Auswirkungen von Compound Events auf die Pflanzenproduktivität bewertet werden. Bias-korrigierte und herunterskalierte Daten mit KI-Ansätzen werden auch im Rahmen des Horizon Europe-Projekts MedEWSa (Mediterranean and pan-European forecast and Early Warning System against natural hazards) für die Vorbereitung eines Netzwerks von Multi-Hazard-Frühwarnsystemen verwendet.

[1] https://www.eucp-project.eu/eucp-updates/eucp-final-meeting-may-2022-part-3-high-resolution-models-and-where-to-go-from-here/

Hiermit kann ein schnellerer und effizienterer Einsatz von Rettungskräften in von Naturgefahren gefährdete Gebiete im Raum Europa-Mittelmeer-Afrika optimal unterstützen. Schließlich entwickelt das von Horizon Europe unterstützte Projekt CARMINE (Climate Resilient Development in Metropolitan Areas) Simulationsketten für die Modellierung der Risikobewertung mittels integrierter physikalischer Modelle und Erdsystemprozessen. Physikalisch basierte Modelle für räumlich begrenzte Gebiete und Assimilationssysteme werden dabei für das dynamische Downscaling atmosphärischer Parameter auf der städtischen Skala (1x1 km) angewendet. Mikroklimasimulationen auf feinerer räumlicher Skala werden durch verschiedene neuartige statistische/AI-basierte Ansätze (z.B. LSTM, GAN) und Datenassimilation durchgeführt. Schließlich werden im Rahmen des neuen Projektes Gefahrenindikatoren und Nachbearbeitungstools entwickelt, einschließlich der Bewertung von Unsicherheiten zur Verbesserung der Risikobewertungsanalyse.

Erkenntnisse aus der Bereitstellung von Freva in anderen Projekten

Weitere Freva-Instanzen laufen derzeit im Rahmen von BMBF Projekten wie ClimXtreme (www.xces.dkrz.de) und WarmWorld (gems.dkrz.de) und anderen Institutionen (z.B. https://freva.met.fu-berlin.de/ an der FUB und MAVIS beim DWD), die neue Anforderungen mit sich bringen und zwangsläufig Innovationen in das Ökosystem eingebracht haben und einbringen werden. Unterschiedliche Vorhaben mit unterschiedlichem Fokus, aber der gemeinsamen Idee, Daten und Software gemeinschaftlich zu entwickeln, zu nutzen und zur Verfügung zu stellen.

Entwicklung bei Projekten, die Klimamodelldaten in Klimawirkungsanalysen übersetzten

NUKLEUS stand mit den Projekten der sechs RegIKlim-Modellregionen während der gesamten Projektlaufzeit im Austausch. Dabei wurden verschiedene Austausch-Formate genutzt und unterschiedliche Themen diskutiert:

- Meetings der RegIKlim-Arbeitsgruppe 1 „Klimadaten“: Feststellung der Bedarfe an Klimamodelldaten, Planung der Klima-Simulationen (NUKLEUS Simulationsprotokoll), Planung von Inhalten der Freva-Plattform (Plugins), Angebote für Daten-Qualitätssicherung (Unsicherheiten in der Modellkette, Bias-Korrektur und Downscaling der Klimamodelldaten)
- Workshops der Wirkmodellierer in den Modellregionen: Schnittstellen und Vernetzung der Wirkmodellierer, Spezialthemen: Hydro-Modelle und Stadtklima-Modelle, Freva-Nutzung
- Bilaterale Gespräche zur individuellen Beratung der Modellregionen und Diskussion, welche Klimamodelldaten in welcher Form für spezielle Anwendungen geeignet sind
- Gemeinsame Entwicklung von Freva Plugins: Climpact (process climate model output to impact model input) und ClimateChangeProfile (create climate change signals)

Am 07.10.2022 wurde ein Workshop „NUKLEUS meets KlimaKonform“ an der TU Dresden in Tharandt durchgeführt, um erste Ergebnisse zu Niederschlag und Lufttemperatur hochaufgelöster NUKLEUS-Modellsimulationen für die Modellregion KlimaKonform zu diskutieren. Im Anschluss daran wurden die Niederschlagsdaten aus den ICON-Evaluierungsläufen für eine hydrologische Impaktmodellierung für das KlimaKonform-Modellgebiet verwendet. Im Fokus standen Starkregen-Extremereignisse, die

besonders im Bereich der Fließgewässer in Mittelgebirgsregionen dramatische Auswirkungen haben können. Aus der Modellkette Klima-Wirkmodell wurde das 99%-Perzentil der stündlichen Niederschlagsmenge ausgewertet und mit Messdaten verglichen. Dabei konnte der Mehrwert konvektionserlaubender Klimamodellierung quantitativ nachgewiesen werden.

Das Thema „Unsicherheiten in der Modellkette von regionalen Klima- bis zu Wirkmodellen“ spielte in der Zusammenarbeit mit den Modellregionen und bei der methodischen Schnittstellenbildung eine wesentliche Rolle. Die Diskussion in einem gemeinsamen Workshop von NUKLEUS und Modellregionen wurde bilateral insbesondere mit KlimaKonform, R2K-Klim+ und IAWAK-EE weitergeführt. Die dabei entstandene Materialsammlung kann in der Projektphase 2 von RegIKlim als Grundlage für die Ableitung von Leitlinien für den Umgang mit Unsicherheiten aus RCM-Daten für die Wirkmodellierer in den Modellregionen genutzt werden.

Der Austausch mit inhaltlich benachbarten Projekten (insbesondere BMBF-Projekte innerhalb von RegIKlim wie KlimaKonform, innerhalb von ClimXtreme wie DUCA, Leitinitiative Zukunftsstadt: HeatResilientCity HRC II, Stadtklima im Wandel: 3DO+M) wurde und wird auch weiterhin gepflegt. Für die Durchführung des Projektes NUKLEUS lagen im Berichtszeitraum keine relevanten Forschungsergebnisse von dritter Seite vor, die eine Korrektur an Zielen oder Arbeitsprogramm des Projektes zur Folge hatten. Vielmehr konnten Methoden aus dem Projekt HRC II (Stadtklimamodelle ENVI-met, SOLWEIG, Grenzschichtmodell HIRVAC, statistische Auswertung von Klimamodelldaten) erfolgreich im Vorhaben NUKLEUS angewendet und weiterentwickelt werden.

6. Publikationen

Publikationen mit Projekt Erwähnungen

Behr, L., Luther, N., Josey, S.A., Luterbacher, J., Wagner, S., and Xoplaki, E. (2022): On the representation of Mediterranean overflow waters in global climate models. J. Phys. Ocean., https://doi.org/10.1175/JPO-D-21-0082.1.

Degroot, D., Anchukaitis, K., Bauch, M., Burnham, J., Carnegy, F., Cui, J., de Luna, K., Guzowski, P., Hambrecht, G., Huhtamaa, H., Izdebski, A., Kleemann, K., Moesswilde, E., Neupane, N., Newfield, T., Pei, Q., Xoplaki, E., Zappia, N. (2021): Towards a Rigorous Understanding of Societal Responses to Climate Change. Nature, https://doi.org/10.1038/s41586-021-03190-2.

Hundhausen, M., Feldmann, H., Laube, N., Pinto, J.G. (2023a): Future heat extremes and impacts in a convection permitting climate ensemble over Germany. Nat Hazards Earth Syst Sci, https://doi.org/10.5194/nhess-2022-283.

Hundhausen, M., Feldmann, H., Kohlhepp, R., Pinto, J.G. (2023b): Climate change signals of extreme precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble, International Journal of climatology, under revision.

Ibebuchi, C. C. (2022): On the representation of atmospheric circulation modes in regional climate models over Western Europe, International Journal of climatology, https://doi.org/10.1002/joc.7807.

Ibebuchi, C. C., Schönbein, D. & H. Paeth (2022): On the added value of statistical post-processing of regional climate models to identify homogeneous patterns of summer rainfall anomalies in Germany, Climate Dynamics, https://doi.org/10.1007/s00382-022-06258-5.

Ibebuchi, C. C., Schönbein, D., Adakudlu, M., Xoplaki, E. & H. Paeth (2022): Comparison of Three Techniques to Adjust Daily Precipitation Biases from Regional Climate Models over Germany, Water, 14(4):600, https://doi.org/10.3390/w14040600.

Ludwig, P., Ehmele, F., Franca, M. J., Mohr, S., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J. E., Ehret, U., Feldmann, H., Hundhausen, M., Knippertz, P., Küpfer, K., Kunz, M., Mühr, B., Pinto, J. G., Quinting, J., Schäfer, A. M., Seidel, F., Wisotzky, C. (2023): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe. Part 2: Historical context and relation to climate change Nat Hazards Earth Syst Sci, doi:10.5194/nhess-2022-225.

Mohr, M., Ehret, M., Kunz, M., Ludwig, P., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J.E., Ehmele, F., Feldmann, H., Franca, M.J., Gattke, C., Hundhausen, M., Knippertz, P., Küpfer, K., Mühr, B., Pinto, J.G., Quinting, J., Schäfer, A.M., Scheibel, M., Seidel, F. and Wisotzky, C. (2023): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 1: Event description and analysis. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 23, 525–551, https://doi.org/10.5194/nhess-23-525-2023.

Sieck, K., Pinto, J.G., Keuler, K., Beier, C., Feldmann, H., Geyer, B. (2023): NUKLEUS - A Kilometer Scale Climate Model Ensemble Part 1: Experiment Design and Evaluation (in Vorbereitung)

Xoplaki, E., Luterbacher, J., Luther, N., Behr, L., Wagner, S., Jungclaus, J., Zorita, E., Toreti, A., Fleitmann, D., Izdebski, A., and Bloomfield, K. (2021): Hydrological changes in Late Antiquity: spatio-temporal characteristics and socio-economic impacts in the Eastern Mediterranean. In: Erdkamp, P., J. G. Manning, and K. Verboven (Eds.) Climate Change and Ancient Societies in Europe and the Near East. Diversity in Collapse and Resilience, Palgrave Studies in Ancient Economies, Palgrave MacMillan, https://doi.org/10.1007/978-3-030-81103-7_18.

Yuan, N., F. Xiong, E. Xoplaki, W. He, and J. Luterbacher (2021): A new approach to correct the overestimated persistence in tree-ring width based precipitation reconstructions. Climate Dynamics, https://doi.org/10.1007/s00382-021-06024-z.

Zitierte Publikationen

Ban, N. and co-authors among them Keuler, K. (2021): The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation, Climate Dynamics, 57, 275–302, doi:10.1007/s00382-021-05708-w.

Belušić Vozila, A., Belušić, D., Telišman Prtenjak, M. et al. (among them Feldmann, H.) (2023): Evaluation of the near-surface wind field over the Adriatic region: local wind characteristics in the convection-permitting model ensemble, Clim Dyn., https://doi.org/10.1007/s00382-023-06703-z.

Brunner et al. (2020): Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence, Earth Syst. Dynam., 11, 995-1012, https://doi.org/10.5194/esd-11-995-2020.

Bruse, M. und Fleer, H. (1998): Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model, Environ Modell Softw, 13, 373–384, https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5.

Caldas-Alvarez, A., Feldmann, H., Lucio-Eceiza, E., Pinto, J.G. (2023): Scale-dependency of extreme precipitation processes in regional climate simulations of the greater Alpine region. Weather and Climate Dynamics, https://doi.org/10.5194/wcd-2022-11.

Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? J. Climate, 28, 6938–6959, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

Coppola, E., and co-authors among them Sieck, K., Rockel, B. (2020): A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean, Climate dynamics, 55, 3–34, https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8.

Diez-Sierra, J., and co-authors among them Feldmann, H., Jacob, D. Keuler, K. (2022): The Worldwide C3S CORDEX Grand Ensemble: A Major Contribution to Assess Regional Climate Change in the IPCC AR6 Atlas, Bull. Amer. Meteor. Soc., 103, E2804–E2826, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0111.1.

Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927–2058, doi:10.1017/9781009157896.021.

Jones et al. (1993): A comparison of lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol.*, **13**, 655-663, https://doi.org/10.1002/joc.3370130606.

He, K., X. Zhang, S. Ren, and J. Sun (2015): Deep Residual Learning for Image Recognition, arXiv:1512.03385.

Hersbach et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049, https://doi.org/10.1002/qj.3803.

Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Bedia, J., Cimadevilla, E., Díez-Sierra, J., Manzanas, R., Casanueva, A., Baño-Medina, J., Milovac, J., Herrera, S., Cofiño, A.S., San Martín, D., García-Díez, M., Hauser, M., Huard, D., Yelekci, Ö. (2021): Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.3691645. Available from: https://github.com/IPCC-WG1/Atlas.

Kahraman, A., Kendon, E. J., Chan, S. C., & Fowler, H. J. (2021): Quasi-stationary intense rainstorms spread across Europe under climate change, Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092361. https://doi.org/10.1029/2020GL092361.

Kadow, C., Illing, S., Lucio-Eceiza, E.E., Bergemann, M., Ramadoss, M., Sommer, P.S., Kunst, O., Schartner, T., Pankatz, K., Grieger, J., Schuster, M., Richling, A., Thiemann, H., Kirchner, I., Rust, H.W., Ludwig, T., Cubasch,

U. and Ulbrich, U. (2021): Introduction to Freva – A Free Evaluation System Framework for Earth System Modeling. Journal of Open Research Software, 9(1), p.13.DOI: https://doi.org/10.5334/jors.253.

Kumar, B., Chattopadhyay, R., Singh, M., Chaudhari, N., Kodari, K., Barve, A. (2021): Deep learning–based downscaling of summer monsoon rainfall data over Indian region. Theoretical and Applied Climatology 143:1145–1156. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03489-6.

Lindberg, F., Holmer, B. and Thorsson, S. (2008): SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology, 52, 697–713, https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7.

Manning, C., Kendon, E.J., Fowler, H.J. et al. (2022): Extreme windstorms and sting jets in convection-permitting climate simulations over Europe, Clim Dyn 58, 2387–2404, https://doi.org/10.1007/s00382-021-06011-4.

Manzanas, R., Fiwa, L., Vanya, C., Kanamaru, H., & Gutiérrez, J. M. (2020): Statistical downscaling or bias adjustment? A case study involving implausible climate change projections of precipitation in Malawi, Climatic Change, 162(3), 1437–1453. https://doi.org/10.1007/s10584-020-02867-3.

Moemken, J., Koerner, B., Ehmele, F., Feldmann, H., Pinto, J. G. (2022): Recurrence of Drought Events Over Iberia. Part II: Future Changes Using Regional Climate Projections. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 74, 262–279. doi:10.16993/tellusa.52.

Mullachery, V., A. Khera, and A. Husain (2018): Bayesian Neural Networks. https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.07710.

Müller, S. K., Caillaud, C., Chan, S., de Vries, H., Bastin, S., Berthou, S., Brisson, E., Demory, M.-E., Feldmann, H., Goergen, K., Kartsios, S., Lind, P., Keuler, K., Pichelli, E., Raffa, M., Tölle, M. H., Warrach-Sagi, K. (2022): Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in convection-permitting regional climate models using a set of tracking algorithms, Climate Dynamics. doi:10.1007/s00382-022-06555-z.

Müller, S.K., Pichelli, E., Coppola, E., Berthou, S., Briennen, S., Callaud, C., Demory, M.-E., Doble, A., Feldmann, H., Mercogliano, P., Tölle, M. (2023): The Climate Change Response of Alpine-Mediterranean Heavy Precipitation Events, Climate Dynamics, doi:10.1007/s00382-022-06608-3.

Pichelli, E. and co-authors, among them Keuler, K. (2021): The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation, Climate dynamics, 56, 2036–2045. doi:10.1007/s00382-021-05657-4.

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., and Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology–Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), Meteorol. Z, 22, 235–256, https://doi.org/10.1127/0941-615 2948/2013/0436.

Reyers, M., Pinto, J.G., and Moemken, J. (2015): Statistical-dynamical downscaling for wind energy potentials: evaluation and applications to decadal hindcasts and climate change projections. Int. J. Climatol., 35, 229-244, https://doi.org/10.1002/joc.3975.

Sangelantoni, L., Sobolowski, S., Lorenz, T. et al., among them Feldmann, H. (2023): Investigating the representation of heatwaves from an ensemble of km-scale regional climate simulations within CORDEX-FPS convection, Clim Dyn. https://doi.org/10.1007/s00382-023-06769-9.

Scherrer et al. (2006): Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region. Int. J. Climatol., 26, 233-249, https://doi.org/10.1002/joc.1250.

Schubert, D., van der Linden, R., Reyers, M., Fink, A.H., Massmeyer, K., and Pinto, J.G. (2017): Statistical-dynamical downscaling of precipitation for Vietnam: methodology and evaluation for the recent climate. Int. J. Climatol., 37, 4211-4228, https://doi.org/10.1002/joc.5062.

Soares, P.M.M., Careto, J.A.M., Cardoso, R.M. et al. among them Feldmann, H. and Sieck, K. (2022): The added value of km-scale simulations to describe temperature over complex orography: the CORDEX FPS-Convection multi-model ensemble runs over the Alps. Clim Dyn (2022). https://doi.org/10.1007/s00382-022-06593-7.

Sobolowski et al. (2023): EURO-CORDEX CMIP6 GCM Selection & Ensemble Design: Best Practices and Recommendations, Zenodo, https://doi.org/10.5281/zenodo.7673400.

Tibaldi & Molteni (1990): On the operational predictability of blocking. Tellus A, 42, 343-365, https://doi.org/10.3402/tellusa.v42i3.11882.

Vaughan, A., W. Tebbutt, J. S. Hosking, and R. E. Turner (2022): Convolutional conditional neural processes for local climate downscaling, Geoscientific Model Development, 15, 251–268, https://doi.org/10.5194/gmd-15-251-2022.

Wang. F., and Tian, D. (2022): On deep learning based bias correction and downscaling of multiple climate models simulations. Climate Dynamics 59 (11-12): 3451-3468. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06277-2.

Wang, F., Tian, D., Lowe, L., Kalin, L., and Lehrter, J. (2021): Deep learning for daily precipitation and temperature downscaling. Water Resources Research, 57, e2020WR029308. https://doi.org/10.1029/2020WR029308.

Ziemann, A. (1998): Numerical simulation of meteorological quantities in and above forest canopies. Meteorol. Z., 7, 120-128, DOI: 10.1127/metz/7/1998/120.

Ziemann, A., Goldberg, V., Richter, B., Bernhofer, C. (2019): Thermische Exposition von Fußgängern im Dresdner Stadtteil Gorbitz im Sommer 2018: Auswertung von Fußgänger-Messungen und Modellsimulationen, IÖR Schriften, 77, 265-273, ISBN: 978-3-944101-77-4, https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-722941.

Ziemann, A., Moderow, U., Goldberg, V., & Bernhofer, C. (2021): "Meteorologische und humanbiometeorologische Wirkungen in hitzebelasteten Stadtquartieren" : Schlussbericht des Teilprojekts : im Verbundprojekt HeatResilientCity : HeatResilientCity - Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten - Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt : Förderprogramm: Leitinitiative Zukunftsstadt : Schwerpunkt: Klimaresilienz durch Handeln in Stadt und Region : Projektlaufzeit: 01.10.2017 bis 31.01.2021. Technischen Universität Dresden. https://doi.org/10.2314/KXP:1820028399.

Datenquellen

Gomes, Goncalo; Thiemig, Vera; Skøien, Jon Olav; Ziese, Markus; Rauthe-Schöch, Armin; Rustemeier, Elke; Rehfeldt, Kira; Walawender, Jakub; Kolbe, Christine; Pichon, Damien; Schweim, Christoph; Salamon, Peter (2020): EMO: A high-resolution multi-variable gridded meteorological data set for Europe. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] doi: 10.2905/0BD84BE4-CEC8-4180-97A6-8B3ADAAC4D26 PID: http://data.europa.eu/89h/0bd84be4-cec8-4180-97a6-8b3adaac4d26.

Krähenmann, S.; Walter, A.; Brienen, S.; Imbery, F. & Matzarakis, A. Monthly, daily and hourly grids of 12 commonly used meteorological variables for Germany estimated by the Project TRY Advancement, DWD Climate Data Center, 2016

Winterrath, Tanja; Brendel, Christoph; Hafer, Mario; Junghänel, Thomas; Klameth, Anna; Lengfeld, Katharina; Walawender, Ewelina; Weigl, Elmar; Becker, Andreas (2018): RADKLIM Version 2017.002: Reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), Niederschlagsstundensummen (RW); https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002

Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Drücke, Jaqueline; Trentmann, Jörg; Schröder, Marc; Selbach, Nathalie; Hollmann, Rainer (2023): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003