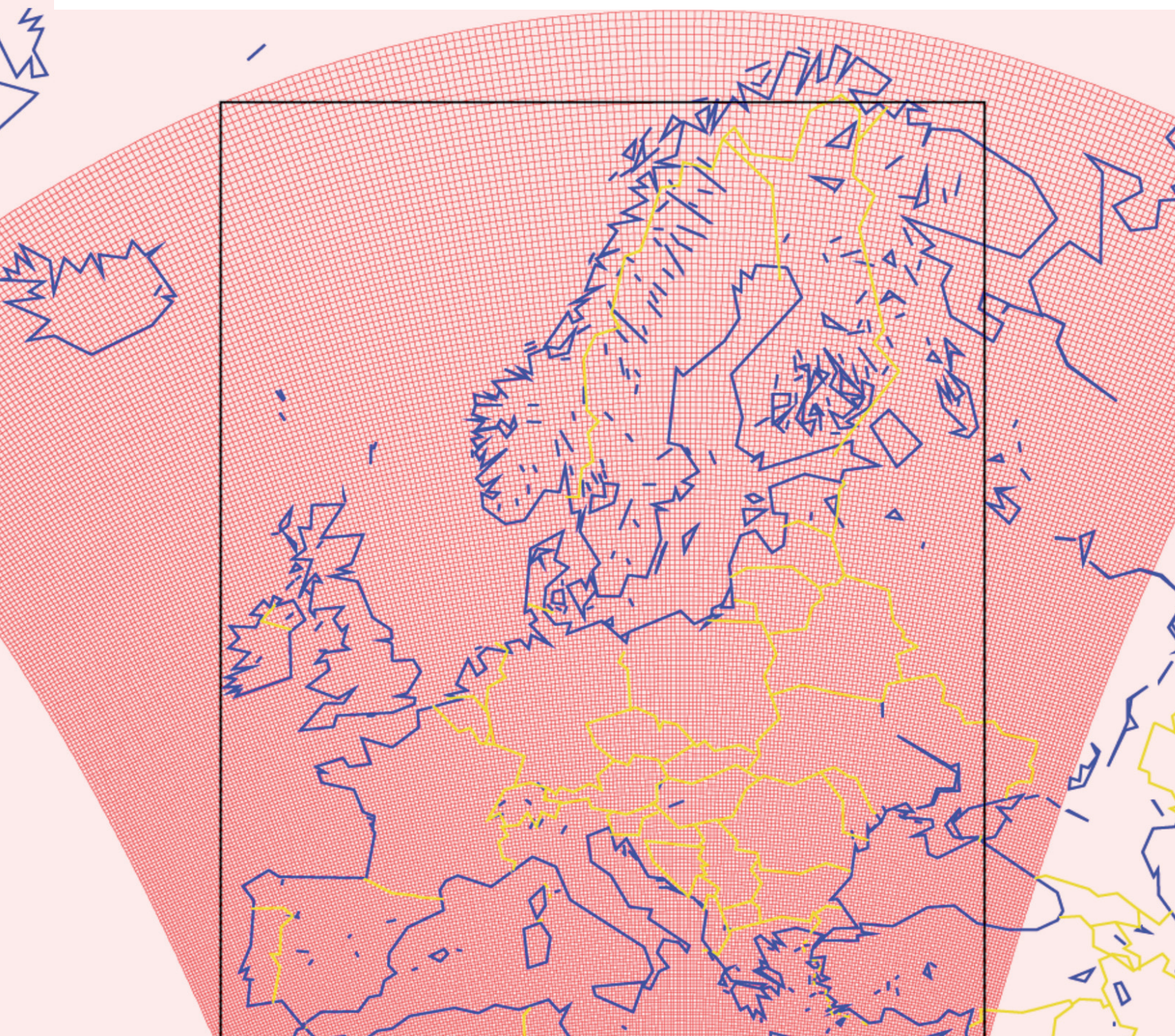


CSC Report 9

Besonderheiten und Merkmale regionaler Klimamodelle im Hinblick auf die weitere Kopplung mit Impaktmodellen



Version 1.0, Januar 2012
Kontakt: Barbara.Hennemuth@hzg.de

Titelbild: © Katharina G. Bülow

**Besonderheiten und Merkmale
regionaler Klimamodelle
im Hinblick auf die
weitere Kopplung mit Impaktmodellen**

Autoren: E. Keup-Thiel, B. Hennemuth, S. Pfeifer
Abteilung „Klimasystem“ am Climate Service Center

Vorwort

Regionale Klimamodelle verfeinern globale Klimaprojektionen und liefern so Ergebnisse auf einer horizontalen Skala von 50 km bis 10 km. Sie werden in globale Klimamodelle eingebettet und mit der global simulierten, großskaligen Zirkulation „angetrieben“ oder nutzen die Ergebnisse globaler Klimasimulationen als Eingabegrößen. Durch regionale Klimamodelle ist es möglich, ausgewählte Region detaillierter zu untersuchen. Sie sind daher eine wichtige Ergänzung der globalen Klimamodelle insbesondere in Hinblick auf die Untersuchung der Auswirkung von Klimaänderungen und der Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

In diesem Teilbericht wird ein Überblick darüber gegeben, welche Klimaprojektionen der verschiedenen regionalen Klimamodelle für die Kopplung mit Impaktmodellen zur Verfügung stehen. Es werden sowohl die Vor- und Nachteile der Modellkonzepte erläutert als auch die besonderen Merkmale der regionalen Klimamodelle.

Die Kopplung zwischen regionalen Klimamodellen und Impaktmodellen ist nicht trivial und erfordert – je nach Art des Regionalmodells und des Impaktmodells – oft umfangreiche Vorarbeiten. Dabei sind die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen beider Modelle, die Anzahl der zu nutzenden Klimamodellparameter, die Empfindlichkeit der zu modellierenden Prozesse des Impaktmodells bezüglich dieser Parameter, mögliche Modellfehler und die Zielsetzung der Impaktmodellierung zu berücksichtigen.

Zentrale Zielstellung der vom Umweltbundesamt initiierten Studie war die Ermittlung und Darstellung des Standes der Forschung über die insbesondere auf Deutschland bezogenen regionalen Klimamodelle, ökologischen Modelle und sozioökonomischen Modelle und über erkennbare Optionen ihrer Verknüpfung.

Dieser Bericht entstand als Teilbericht des Vorhabens „Vernetzung von Klimaszenarien mit weiteren Szenarien aus dem ökologischen und gesellschaftlichen Bereich“ gefördert durch das Umweltbundesamt und durchgeführt am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) in Berlin unter Mitwirkung des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung (UFZ, Halle), der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS, Osnabrück) und dem Climate Service Center (CSC, Hamburg).

Bericht für das IÖW
Werkvertrag Nr.:2/74/09/UP-CSC

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Klimasimulationen für Europa: Das Projekt ENSEMBLES	3
3. Klimasimulationen für Deutschland.....	6
3.1 Dynamische regionale Klimamodelle CCLM und REMO	6
3.1.1 Modellstruktur	6
3.1.2 Modellvalidierung	9
3.1.3 Klimaprojektionen und Daten	10
3.1.4 Bandbreite der regionalen Simulationen	12
3.2 Statistische regionale Klimamodelle	16
3.2.1 WETTREG	16
3.2.2 STAR II	17
3.3 Gegenüberstellung statistischer und regionaler Klimamodelle	18
4. Hinweise zur Kopplung von Regionalmodellen mit Wirkmodellen	19
4.1 Räumliche Auflösung	19
4.2 Zeitliche Verfeinerung	20
4.3 Bias-Korrektur	20
5. Schlussbemerkungen und allgemeine Hinweise	21
6. Literatur	21

1. Einleitung

Regionale Klimamodelle wurden entwickelt, um die simulierten globalen Klimaänderungen auf die regionale Ebene zu übertragen. Regionale Klimamodelle sind sogenannte 'limited area' Modelle, sie decken also mit ihrem Modellgebiet nur einen Teil der Erde ab. Sie werden in globale Klimamodelle eingebettet und am Rand mit der global simulierten, großskaligen Zirkulation "angetrieben". So ist es möglich, ausgewählte Region detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zwischen globalen Klimaprojektionen und lokalen Auswirkungen zu schlagen. Regionale Klimamodelle stellen somit eine wichtige Ergänzung der globalen Klimamodelle dar.

Für Europa steht dank des ENSEMBLES Projektes (van der Linden and Mitchell, 2009) ein Ensemble hochaufgelöster regionaler Klimaprojektionen zur Verfügung. Zusätzlich existieren regionale Klimaprojektionen speziell für die Region Deutschland, die zum Einen mit den dynamischen regionalen Klimamodellen COSMO-CLM (CCLM) und REMO und zum Anderen mit den statistischen regionalen Klimamodellen WETTREG und STAR durchgeführt wurden. Als Antrieb für diese regionalen Klimaprojektionen dienten die globalen Klimaprojektionen des ECHAM5/MPIOM (Roeckner et al., 1996), die für den 4. Sachstandsbericht (AR4) des 'International Panel on Climate Change' (IPCC) durchgeführt wurden.

2. Klimasimulationen für Europa: Das Projekt ENSEMBLES

Das Projekt ENSEMBLES war Teil des FP6-Forschungsprogramms der europäischen Kommission (EC) unter der Leitung des Met Office am Hadley Center in Exeter, UK, und lief für den Zeitraum 2004-2009. In dessen Rahmen wurden diverse globale und regionale Klimasimulationen für Europa und Afrika produziert und ausgewertet, die auch für Anwender zur Verfügung stehen. Die Grundidee des Projekts ist es, möglichst viele globale und regionale Klimamodelle für dasselbe Gebiet, für dieselben Zeiträume und in denselben Auflösungen laufen zu lassen, um ein Modellensemble zu erzeugen. Mit dieser Methode sollte die Genauigkeit und Verlässlichkeit von Vorhersagen verbessert werden und Unsicherheiten quantitativ geschätzt werden, um ein klareres Bild zukünftiger Klimaszenarien zu bekommen. Die allgemeinen Ziele des Projekts werden wie folgt angegeben:

- Systematische Entwicklung einer Methode, um ein Ensemble aus Klimaprojektionen zu erzeugen, die mit Hilfe von hochaufgelösten globalen und regionalen Klimamodellen simuliert wurden. Alle herangezogenen Modelle wurden in Europa entwickelt und gegen hochaufgelöste Beobachtungsdatensätze validiert. Dadurch wurde eine objektive probabilistische Schätzung der Unsicherheit von Klimaprojektionen ermöglicht, so wie sie von heutigen Klimamodellen erzeugt werden können. Die Analyse erfolgte für saisonale, dekadische, und langjährige Zeitskalen.
- Quantifizierung und Reduktion der Unsicherheiten der Repräsentation physikalischer, chemischer, biologischer und anthropogener Rückkopplungen (engl. „feedbacks“) der Erdsystemmodelle. Ein Erdsystemmodell schließt neben der Klimamodellierung auch die Modellierung des Wasserdargebots, der Landnutzung, der Qualität der Luft und des Kohlenstoffkreislaufes mit ein.

- Heranziehung der Modellierungsergebnisse für anwendungsbezogene Studien („Impact Studies“), die Landwirtschaft, Gesundheitssystem, Ernährung, Energie, Wasser und das Versicherungswesen mit einschließen.

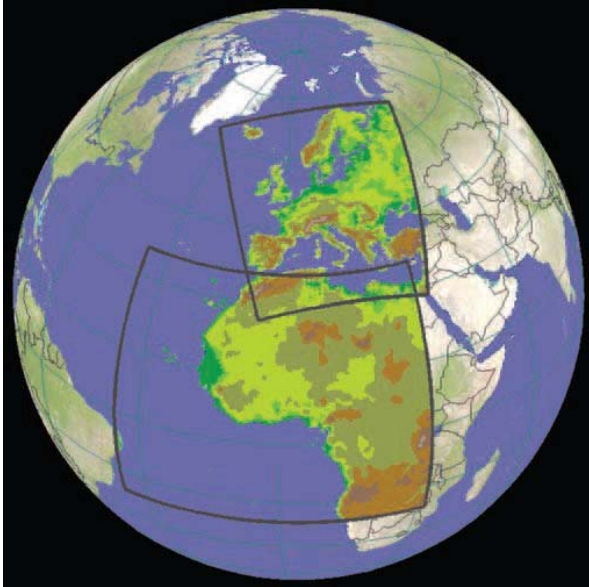


Abbildung 1: Die beiden ENSEMBLES - Regionen für die regionalen Klimasimulationen

Die Bandbreite der Modellergebnisse wurde ausgewertet und analysiert. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen Ergebnisse zur Robustheit des Klimaänderungssignals, wie sie aus dem Multi-Modell-Ensemble von 16 Modellen gewonnen wurden. Die Änderungen des simulierten Zeitraums 2021-2050 relativ zum Referenzzeitraum 1961-1990 sind für die Jahresmittel der Temperatur in 2m Höhe, im Folgenden 2 m-Temperatur genannt, und des Niederschlags dargestellt. Das Signal der 2 m Temperatur ist positiv und wesentlich größer als die Standardabweichung. Deshalb kann das Temperaturänderungssignal bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts als relativ robust bezeichnet werden. Das Niederschlagssignal zeigt dagegen eine klare Zweiteilung Europas mit einem Anstieg im Norden und einer Abnahme im Süden. Auch dieses Ergebnis kann als robust angesehen werden, während nur 2 bis 4 Modelle aus 16 keine Abnahme in Südeuropa zeigen.

GCM	ERA40	METO-HC, Std	METO-HC, Low	METO-HC, High	MPIMET	IPSL	CNRM	NERSC	CGCM3	Total
RCM										
METO-HC HadRM	1961–2002	1951–2100	1951–2100*	1951–2100*	1951–2100					4
MPIMET REMO	1961–2002				1951–2100	1951–2050*				2
CNRM ALADIN	1961–2002						1951–2050			1
DMI HIRHAM	1961–2002				1951–2100*		1951–2100	1951–2100*		3
ETH CLM	1961–2002	1951–2100								1
KNMI RACMO	1961–2002				1951–2100					1
ICTP RegCM	1961–2002				1951–2100					1
SMHI RCA3	1961–2002		1951–2100*		1951–2100*			1951–2100		3
UCLM PROMES	1961–2002	1951–2050	1951–2050							1
C4I RCA3	1961–2002			1951–2100*	1951–2050*					2
GKSS CLM	1961–2002					1951–2050*				1
Met.No HIRHAM	1961–2002	1951–2050						1951–2050*		1
CHMI ALADIN	1961–2002						1951–2050*			1
OURANOS* CRCM	1961–2002								1951–2050*	1
EC* GEMLAM	1961–2002									
VMGO* VMGO		1951–2050*								1
Total		3	3	2	7	2	3	3	1	25

Abbildung 2: Kombinationen von globalen/regionalen Klimamodellen bei 25 km Auflösung.

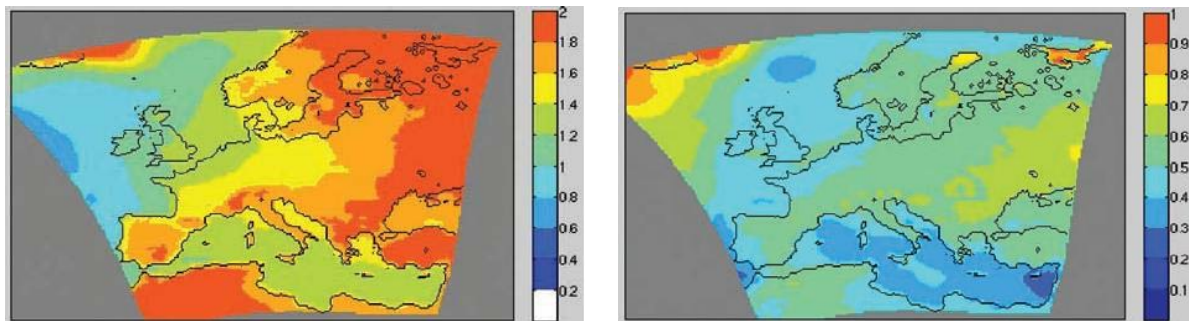


Abbildung 3: Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) der 2m Temperatur [°C]. Links: Ensemble-Mittelwert; rechts: Ensemble-Standardabweichung

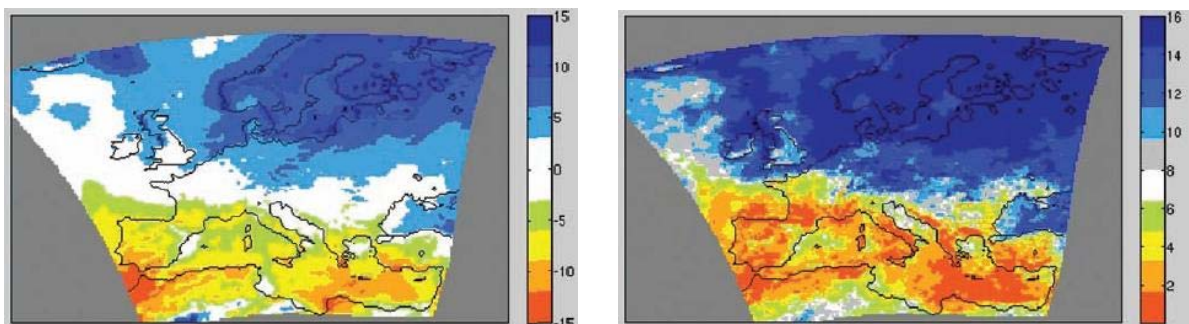


Abbildung 4: Klimaänderungssignal (2021-2050 minus 1961-1990) des Niederschlags [%]. Links: Ensemble-Mittelwert; rechts: Anzahl an Regionalmodellen (von 16 insgesamt), die einen Niederschlagsanstieg zeigen

3. Klimasimulationen für Deutschland

3.1 Dynamische regionale Klimamodelle CCLM und REMO

Dynamische regionale Klimamodelle sind 3-dimensionale atmosphärische Zirkulationsmodelle in einem begrenzten Ausschnitt des Globus. Es werden alle relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet. Hierdurch können auch nichtlineare Prozesse berücksichtigt werden. Allerdings müssen subskalige Prozesse - das sind Prozesse mit räumlichen und zeitlichen Skalen unterhalb der Auflösung des Modells - näherungsweise durch physikalische Parametrisierungen berechnet werden. Die räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle liegt derzeit zwischen 7 km und 50 km. Durch die hohe horizontale Gitterauflösung liefert ein regionales Modell wesentlich kleinräumigere Klimainformationen durch eine bessere Repräsentierung des Untergrundes (z.B. Orographie, Landnutzung) und eine Auflösung wichtiger kleinräumiger Prozesse, die in Globalmodellen parameterisiert werden müssen. Regionale Klimamodelle benötigen an den seitlichen Modellgebietsrändern Informationen über die großräumige Zirkulation. Dieser „Antrieb“ wird den regionalen Klimamodellen auf einer Randzone des Modellgebiets aufgeprägt. Die „antreibenden“ Daten können dabei von einem globalen Klimamodell, von einer regionalen Klimasimulation auf einem größeren Modellgebiet oder aus Analyse- bzw. Reanalysedaten stammen, wie sie beispielsweise in Europa vom Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) und in den USA vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) zur Verfügung gestellt werden.

Für die hier beschriebenen Klimaprojektionen wurde COSMO-CLM direkt mit den Daten des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM angetrieben. Für REMO wurde eine sogenannte Doppelnestungsstrategie angewandt, bei der die grob aufgelösten Globalmodelldaten erst als Antrieb einer REMO Simulation mit 50 km x 50 km Gitterauflösung verwendet wurden. Die Ergebnisse dieser Simulation wurden wiederum als Antrieb der hochaufgelösten 10 km x 10 km REMO Simulation verwendet.

3.1.1 Modellstruktur

COSMO-CLM ist ein regionales Klimamodell, das für Langzeitsimulationen von drei wissenschaftlichen Institutionen federführend entwickelt wurde: der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, der GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH und dem Potsdam Institut für Klimafolgenforschung. Es ist die Klima-Version des Wettervorhersagemodells des Deutschen Wetterdienstes, des 'Local Model' LM (COSMO: www.cosmo-model.org). Die weitere Entwicklung des CCLM erfolgt innerhalb der CCLM-Community, einem Konsortium wissenschaftlicher Institutionen, deren Koordination am Lehrstuhl für Umweltmeteorologie der BTU Cottbus angesiedelt ist. Die hier beschriebenen regionalen Klimaprojektionen beziehen sich auf die CCLM Konfiguration CLM_3-K.

Das regionale Modell REMO wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelt (Jacob, 1997, Jacob 2001, Jacob et al. 2001, Jacob et al. 2007). Es basiert auf dem dynamischen Kern des ehemaligen Wettervorhersagemodells des

Deutschen Wetterdienstes, dem EM/DM System (Majewski, 1991). Die hier beschriebenen Klimaprojektionen wurden mit REMO Version 5.7 durchgeführt, auf diese Version bezieht sich daher auch die Modellbeschreibung.

COSMO-CLM und REMO sind in ihrer Modellstruktur relativ ähnliche regionale dynamische Klimamodelle. Ihre wesentlichen Eigenschaften sind im Folgenden beschrieben und in Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst. Das jeweilige Modellgebiet, bzw. im Falle von REMO die für das Doppelnestungsverfahren verwendeten zwei Modellgebiete sind in Abbildung 5 zu finden.

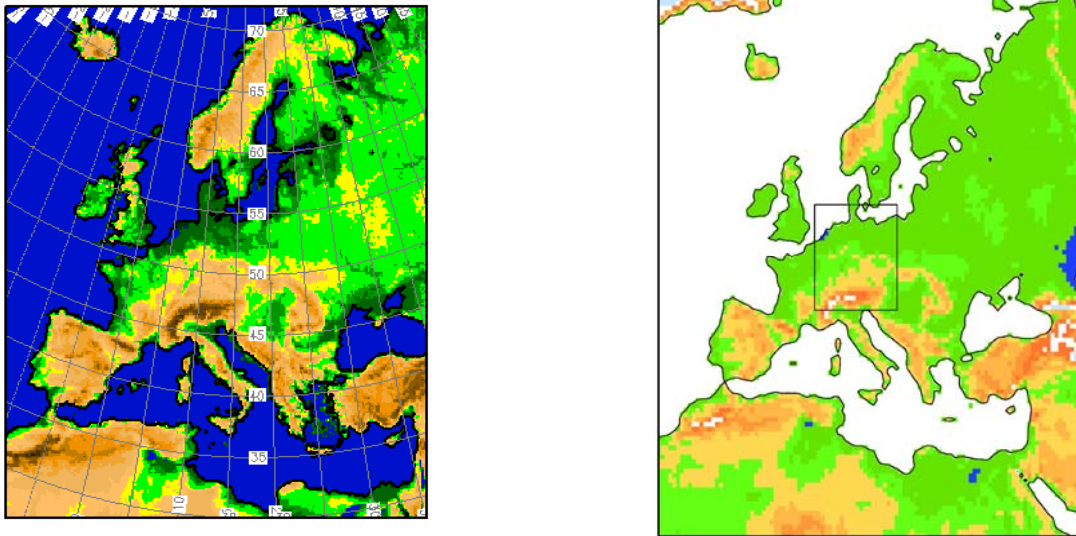


Abbildung 5: Modellgebiet des COSMO-CLM (0.167° Gitterauflösung, links), sowie REMO Modellgebiete mit 0.44° (großes Gebiet) und 0.088° Gitterauflösung (kleines Gebiet, rechts)

Sowohl COSMO-CLM als auch REMO verwenden als grundlegende Gleichungen die hydro- und thermodynamischen Grundgleichungen, REMO im Unterschied zu COSMO-CLM unter der Annahme der Hydrostasieⁱ. Beide Modelle verwenden ein rotiertes sphärisches Koordinatensystemⁱⁱ. Die Verschiebung der Pole auf der Erdoberfläche wird im Allgemeinen so gewählt, dass der reale Äquator zentral durch das Modellgebiet verläuft. Damit wird sichergestellt, dass die Modellgitterboxen annähernd gleiche Flächen und rechtwinklige Gitterkanten haben.

Die prognostischen Variablen in COSMO-CLM sind die horizontalen und vertikalen Komponenten des kartesischen Windvektors, Druckgradient, Temperatur, spezifische Feuchte, Wolkenwassergehalt, turbulente kinetische Energie und der spezifische Wassergehalt von Regen und Schnee. Prognostische Variablen in REMO sind die horizontalen Windkomponenten, der Bodendruck, die Temperatur, die spezifische Feuchte und der Flüssigwassergehalt.

Prozesse, die vom Modell nicht direkt auf der Skala des Modellgitters aufgelöst werden können, müssen parametrisiert werden, d.h. mit Hilfe von empirischen Formeln durch Parameter auf der Gitterskala beschrieben werden. Dazu gehören Turbulenz, Strahlung, Wolken- und Niederschlagsprozesse, Bodenprozesse sowie

ⁱ Annahme der hydrostatischen Approximation, d.h. die vertikale Beschleunigung der Luftbewegungen wird vernachlässigt.

ⁱⁱ In einem rotierten, sphärischen Koordinatensystem werden die Pole bzw. das gesamte Gradnetz der Erdoberfläche verschoben.

der Austausch an der Grenzfläche Boden/Atmosphäre. Die physikalischen Parametrisierungen in REMO wurden dem am Max-Planck-Institut entwickelten globalen Klimamodell ECHAM in der Version ECHAM4 (Roeckner et al, 1996) entnommen und an die feinere Auflösung angepasst. Die physikalischen Parametrisierungen des COSMO-CLM wurden dem LM entnommen und beruhen auf dem früheren LM/DM System.

Tabelle 1: Modellstruktur von COSMO-CLM und REMO

Modell	Dynamischer Kern	Prognostische Variablen	Physikalische Parametrisierungen
COSMO_CLM	Hydro- und thermodynamische Bewegungsgleichungen	Horizontale und vertikale Windkomponenten	LM Konvektion (Tiedtke, 1989)
	nicht - hydrostatisch	Druckgradient	Strahlung (Ritter und Geylen, 1989)
	rotiertes sphärisches Koordinatensystem	Temperatur	Turbulenz (Mellor und Yamada, 1982, Louis, 1979)
	dynamischer Kern basiert auf LM	spezifische Feuchte	Bodenprozesse (Jacobsen und Heise, 1984)
		Wolkenwassergehalt turbulente kinetische Energie spezifischer Wassergehalt von Regen und Schnee	
REMO	Hydro- und thermodynamische Bewegungsgleichungen	Horizontale Windkomponenten	ECHAM4 (Roeckner et al 1996)
	hydrostatisch	Bodendruck	Konvektion (Tiedtke, 1989; Nordeng, 1994)
	dynamischer Kern des EM/DM Systems des Deutschen Wetterdienstes (Majewski, 1991)	Temperatur spezifische Feuchte	Wolken (Sundquist, 1978)
		Flüssigwassergehalt	Strahlung (Morcrette 1986, Giorgetta and Wild 1995)
	rotiertes sphärisches Koordinatensystem		Turbulenz (Louis, 1979)

Für beide regionalen Klimamodelle stellt der Erdboden bzw. die Meeresoberfläche die untere Randbedingung des Modells dar. Die Meeresoberflächentemperatur wird als zeitlich variable Größe aus dem globalen Klimamodell vorgegeben. Die Verteilung der Land- und Meeresflächen wird fest vorgegeben und ist angepasst an die horizontale Auflösung des Modells. Die Land-See Verteilung wird fraktionell für jede Gitterbox vorgegeben, eine Gitterbox kann also Land und Wasseranteile enthalten. Für die Landflächen werden die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur vom Modell berechnet. Dies geschieht in COSMO-CLM mit dem Bodenmodell TERRA auf 10 Schichten. REMO berechnet Bodentemperaturen auf 5 Bodenschichten, die Berechnung der Bodenfeuchte basiert auf einem sogenannten „bucket“- Modell. Beide Modelle geben feste Randbedingungen über eine Bodenbibliothek vor. Für CCLM enthält diese die Höhe der Erdoberfläche über dem Meeresniveau, die Rauigkeitslänge, den Blattflächenindex, die Vegetationsbedeckung, die Wurzeltiefe, den Bodentyp und die Temperatur der untersten Bodenschicht des Bodenmodells, für REMO sind konstant vorgegeben die

Höhe der Erdoberfläche über Meeresniveau, die Rauheitslänge, die fraktionelle Waldbedeckung und die maximale Wasserhaltekapazität des Bodens. Die Vegetationsbedeckung, der Blattflächenindex sowie die Hintergrundalbedo des Bodens werden in REMO (Rechid and Jacob, 2006) und CCLM monatlich variabel als mittlerer Jahresgang vorgeschrieben.

3.1.2 Modellvalidierung

Der Vergleich von Modelldaten mit Beobachtungsdaten ist nicht trivial, da Stationsdaten (Punktdaten) mit Flächendaten (Mittelwerte über 100 oder 324 km² und entsprechend gemittelter Orographie und Landnutzung) verglichen werden. Daher werden für die Validierung größere Regionen herangezogen.

Eine umfangreiche Validierung des Modells CCLM wurde an der TU Cottbus durchgeführt (Hollweg et al., 2008). Die Analysen der TU Cottbus zeigen sowohl die Qualität der Daten aber auch die Modelldefizite. Für verschiedene Regionen in Europa wurden die Parameter Temperatur, Niederschlag, Luftdruck auf Meeresniveau, 10 m – Wind (Wind in 10m Höhe) und zahlreiche Klimakenntage (Sommertage, Frosttage, Tage mit Starkregen etc.) mit Beobachtungsdaten verglichen. Die Vergleiche erfolgten in zwei Schritten. Zuerst wurden CCLM-Läufe, die mit Reanalysedaten (ERA40) angetrieben wurden, mit Beobachtungsdaten verglichen, um Aufschluss über Modellfehler zu erhalten. Dann wurden die mit ERA40-Daten angetriebenen Läufe mit Klimäläufen des Gegenwartsklimas verglichen, um die Güte der Gegenwartssimulationen zu bewerten. Es wurden 20 Jahres-Mittelwerte verglichen. Alle Vergleiche sind graphisch dargestellt und in der CERA-Datenbank verfügbar

http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/EntryList.jsp?acronym=CLM_PLOTS_2008

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Validierung von Temperatur und Niederschlag. Die Validierung des 2 m-Lufttemperatur hat ergeben, dass die vom CCLM simulierte Temperatur zu niedrig ist. Dieser sogenannte 'cold bias' beträgt für Deutschland -0.8 bis -1.1 K, abhängig von den Referenzdaten für die jeweilige Region. Die Abweichungen sind besonders groß im Winter, im Sommer sind die Abweichungen geringer als die Variabilität der Beobachtungsdaten. Die Abweichungen sind regional unterschiedlich. Die Qualität der regionalen Simulationen ist auch abhängig von den Antriebsdaten, d.h. andere Antriebsdaten könnten diesen Fehler verringern. Der 'cold-bias' hat auch Auswirkungen auf sekundäre Klimaparameter, so wird die Anzahl der Sommertage eher unterschätzt und die Anzahl der Frosttage überschätzt.

Validiert wurden auch die Niederschlagssummen pro Monat und Jahr. Hier gibt es erhebliche Unterschiede zwischen Modell und Beobachtung, aber auch die Beobachtungsdatensätze unterscheiden sich stark. Für die Region Deutschland wird die Summe des Niederschlags im Modell um 12 bis 96 mm/Jahr überschätzt, abhängig vom Referenzdatensatz. Besonders im Winter und Frühling ist die Niederschlagssumme im Modell für die Region Deutschland höher als in den Beobachtungen, im Sommer jedoch niedriger. Der Jahresgang wird vom CCLM im Wesentlichen richtig wiedergegeben, aber es gibt große regionale Unterschiede. Daher sollte jedes Untersuchungsgebiet einzeln betrachtet werden, und auch die mögliche Ungenauigkeit der Beobachtungsdaten sollte bedacht werden. Interpretations- und Nutzungshinweise und Hinweise auf Modelldefizite sind zusammengetragen unter http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/EntryList.jsp?acronym=CLM_PLOTS_2008

REMO wird schon seit vielen Jahren in diversen nationalen und internationalen Projekten angewandt. Dabei wurde das Modell für verschiedenste Regionen der Erde aufgesetzt und validiert. Viele diese Validierungsstudien stehen als Veröffentlichungen zur Verfügung. Exemplarisch können hier z.B die Arbeiten von H. Paeth für Afrika (Paeth et al, 2005), G. Silvestri für Südamerika (Silvestri et al, 2007), die Ergebnisse des ARCMIP Projektes für die Arktis (Rinke et al., 2005, Tjernstroem et al, 2005, Wyser et al., 2008), sowie die Ergebnisse des BALTIMOS Projektes, die in einem „special issue“ zusammengefasst wurden (z.B. Bennarts et al, 2009) genannt werden.

Für die vorliegenden REMO Modellsimulationen auf dem 0.088° Modellgebiet sind eine ausführliche Validierung und weitere Untersuchungen im Abschlussbericht des UFOPLAN Vorhabens veröffentlicht, der von den Internetseiten des Umweltbundesamtes heruntergeladen werden kann (Jacob et al, 2008). Für die Parameter Temperatur und Niederschlag wird im Folgenden eine kurze Übersicht der wesentlichen Ergebnisse gegeben. Die horizontalen Muster der Jahresmittel von der 2m- Temperatur und dem Niederschlag werden von REMO in weiten Teilen des Modellgebietes zufriedenstellend berechnet. Die REMO-Ergebnisse zeigen allerdings mehr regionale Informationen bzw. Details als die verwendeten Beobachtungsdatensätze. Die Niederschlagsmuster spiegeln auch kleinräumig das Gelände relief wider. Das berechnete Jahresmittel der Temperatur entspricht im gesamten Modellgebiet dem beobachteten Temperaturniveau. Auch stimmen in weiten Teilen des Modellgebietes die berechneten und gemessenen Niederschlagssummen gut überein. Entlang der Nordseeküste und der Ostseeküste wird der Niederschlag in REMO jedoch überschätzt.

Hinweise auf Auffälligkeiten in REMO sind zu finden unter:

http://www.anpassung.net/nn_700712/DE/Klimaprojektionen/Daten/daten.html

Zur Zeit werden die beiden dynamischen Modelle in Anpassungsprojekten genutzt. So werden für begrenzte Regionen neue Erkenntnisse über die Modellgüte ermittelt.

3.1.3 Klimaprojektionen und Daten

Die Klimaprojektionen von COSMO-CLM und REMO umfassen den Zeitraum von 1960 bis 2100 (COSMO-CLM) bzw 1950-2100 (REMO) und das Gebiet Europa (CCLM) und Deutschland sowie Österreich und die Schweiz (REMO) (Abbildung 5). Ihre räumliche Auflösung liegt bei ca. 18 km für COSMO-CLM sowie 10 km für REMO (auf dem kleineren Modellgebiet, Abb 1). Sowohl das gegenwärtige Klima als auch verschiedene Klimaszenarien wurden dabei mehrfach gerechnet (sog. Ensemble-Simulationen). Das regionale Simulationsensemble besteht aus je drei Modellrechnungen (sog. Realisierungen) für die jüngste Vergangenheit (1950/1960-2000) und vier (COSMO-CLM) bzw. fünf (REMO) für das 21. Jahrhundert (2001-2100). Für die zukünftige Entwicklung der Treibhausgase wurden die IPCC-Emissionsszenarien A1B und B1 und A2 zugrunde gelegt.

Die Konfigurationen für die hier vorgestellten Klimaprojektionen sowie die durchgeführten Simulationen sind in Tabelle 2 wiedergegeben

Die Simulationsdaten der beiden Modelle wurden auf einem rotierten Gitter (Modellgitter des CCLM bzw REMO) herausgeschrieben und teilweise als Zeitreihen

Tabelle 2: Konfiguration der Klimaprojektionen

Modell	Modellgitter	Antrieb	Simulationen	
COSMO-CLM	Horizontal: 18x18 km, rotiertes sphärisches Koordinatensystem	Einfachnestung ECHAM5/MPI-OM → COSMO-CLM 0.167°	CLM_C20_1	1960 - 2000
			CLM_C20_2	1960 - 2000
	vertikal: 32 Atmosphären - level,		CLM_C20_3	1960 - 2000
			CLM_A1B_1	2001 - 2100
REMO	Horizontal: 10x10 km, rotiertes sphärisches Koordinatensystem	Doppelnestung ECHAM5/MPI-OM → REMO 0.44° → REMO 0.088°	CLM_A1B_2	2001 - 2100
			CLM_B1_1	2001 - 2100
	vertikal: 26 Atmosphären - level,		CLM_B1_2	2001 - 2100
Boden: 10 Bodenschichten				
REMO	Horizontal: 10x10 km, rotiertes sphärisches Koordinatensystem	Doppelnestung ECHAM5/MPI-OM → REMO 0.44° → REMO 0.088°	REMO_C20_1	1950 - 2000
			REMO_C20_2	1950 - 2000
	vertikal: 26 Atmosphären - level,		REMO_C20_3	1950 - 2000
			REMO_A1B_1	2001 - 2100
Boden: 5 Bodenschichten		REMO_A1B_2	2001 - 2100	
		REMO_A1B_3	2001 - 2100	
		REMO_B1_1	2001 - 2100	
		REMO_A2_1	2001 - 2100	

im World Data Center for Climate (WDCC) archiviert. Der direkte Modelloutput wird im WDCC als Datenstrom 2 (D2) definiert. Für Anwender wurde für CCLM-Daten und für die REMO-UBA-Daten der Modelloutput zusätzlich auf ein reguläres, geographisches Gitter interpoliert. Das ist der sogenannte Datenstrom 3 (D3), mit dem das Ausschneiden von Gebieten schon beim Herunterladen der Daten aus der Datenbank möglich ist. Bei der Transformation wurde für atmosphärische Größen die bilineare Interpolation verwendet, für Bodenparameter und einige Oberflächenparameter die ‚nearest-neighbour-Methode‘. Die Gebiete der beiden Datenströme unterscheiden sich, dies zeigt die Abbildung 6 beispielhaft für COSMO-CLM. Das Ausgabeformat der Daten im Datenstrom 2 ist NetCDF für CCLM und ieg für REMO, im Datenstrom 3 ist es für beide Modelle NetCDF.

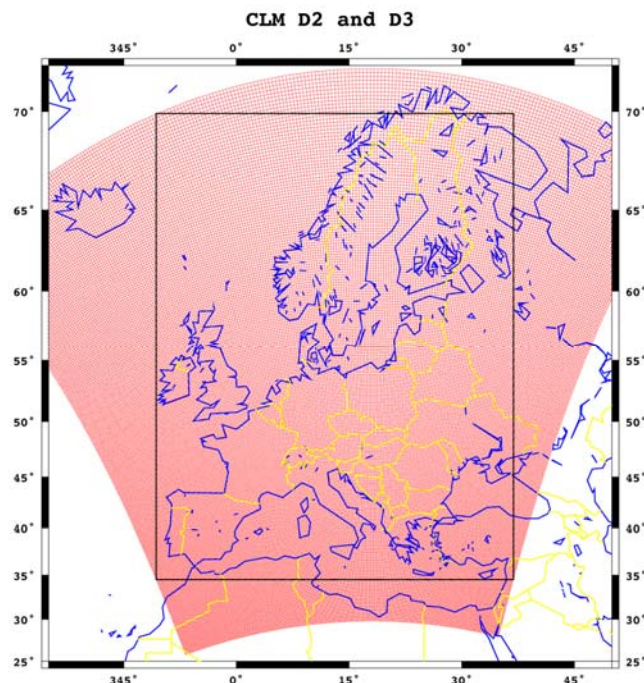


Abbildung 6: Gebiete des Datenstrom2 (rot) und Datenstrom3 (schwarze, feine Linie) der CCLM-Klimaprojektionen.

Eine Liste der Ausgabeparameter für COSMO-CLM befindet sich sowohl im Report (Hollweg et al., 2008) als auf der Internetseite unter:

http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/clm_parameter_weblast.pdf.

Die zeitliche Auflösung der CCLM Ausgabeparameter ist 1-stündig bzw. 3-stündig für Bodendaten jedoch täglich. Tages-, Monats- und Jahresmittelwerte bzw. -summen und Extremwerte wurden für Datenstrom 3 nachprozessiert. Ferner wurden Klimakenntage bspw. Sommertage, Eistage, Tage mit bestimmten Niederschlags-summen nachträglich berechnet und die Anzahlwerte pro Monat und Jahr bereitgestellt.

Die REMO Szenarienrechnungen A1B_1, B1_1 und A2_1 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) am MPI-M durchgeführt. Im Rahmen der Projekte KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen: <http://www.kliwas.de/>) und KLIMZUG NORD (Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg: <http://www.klimzug-nord.de/>) wurden am MPI-M neben der 1. Realisierung der Kontrollsimulation C20_1 und des Szenarios A1B_1 zwei weitere Realisierungen der Kontrollsimulationen (C20_2 und C20_3) und des A1B Szenarios (A1B_2 und A1B_3) mit REMO dynamisch regionalisiert. Informationen zu den REMO Simulationen finden sich auf der REMO homepage: <http://www.remo-rcm.de/>

Eine Anleitung zur Nutzung der REMO Daten verbunden mit einem Fortran - Programm zum Einlesen des ieg Formates der Datenstrom 2 Daten befindet sich auf der REMO-Internetseite zum REMO-UBA-Projekt:

http://remo-rcm.de/fileadmin/user_upload/remo/UBA/pdf/REMO-UBA-Hinweise.pdf

Zusätzlich befindet sich eine Liste der Ausgabeparameter im Anhang sowie unter obigem Link.

3.1.4 Bandbreite der regionalen Simulationen

So wie das reale Klima eine mehrjährige Variabilität besitzt, so zeigen auch Klimamodelle aufgrund der Nichtlinearität der in ihnen verwendeten Gleichungen eine interne Variabilität. Eine relativ kleine Störung im Anfangszustand des Modells kann also zu einer anderen Abfolge der Wetterereignisse im Modell führen. Diese Variabilität wird in Klimaänderungsstudien berücksichtigt, indem nicht eine Simulation eines Klimaänderungsszenarios betrachtet wird, sondern mehrere sogenannte Ensemble-Member oder Realisierungen, die auf den identischen vorgeschriebenen Treibhausgasentwicklungen beruhen, aber kleine Änderungen im Anfangszustand aufweisen.

Mit beiden dynamischen, regionalen Klimamodellen wurden mehrere Realisierungen der Simulation der nahen Vergangenheit und der im 4. Sachstandsbericht des IPCC beschriebenen Emissions-Szenarien A1B, A2 und B1 durchgeführt. Grundlage und Antrieb der regionalen Klimasimulationen sind jeweils die Simulationen des globalen

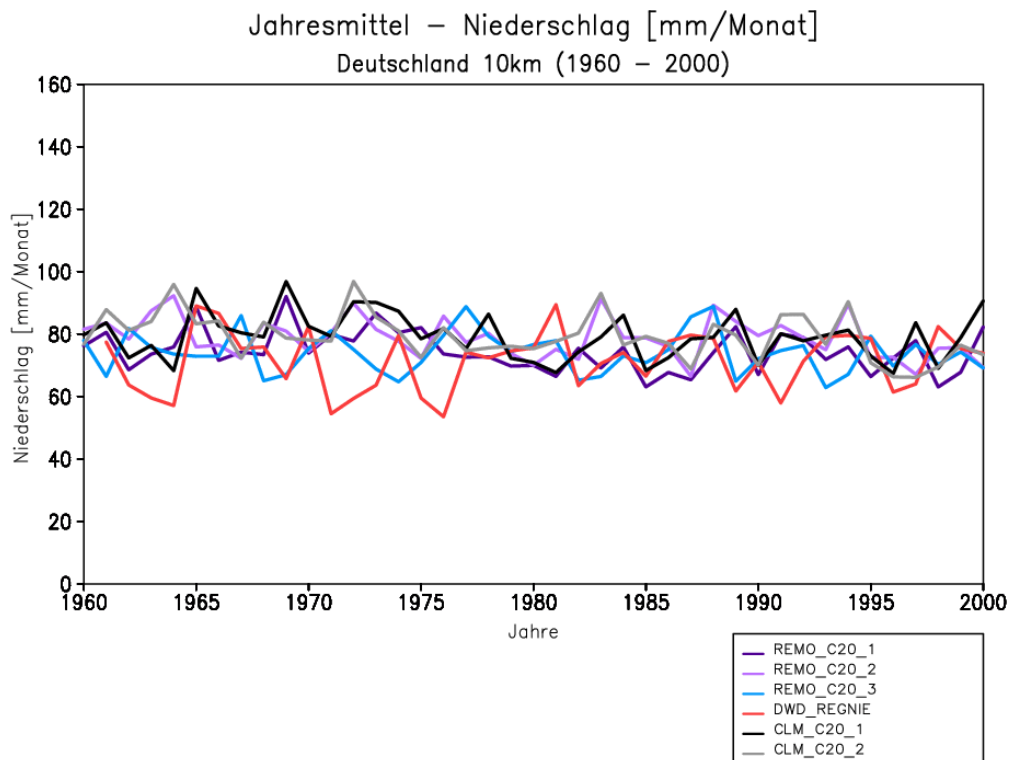
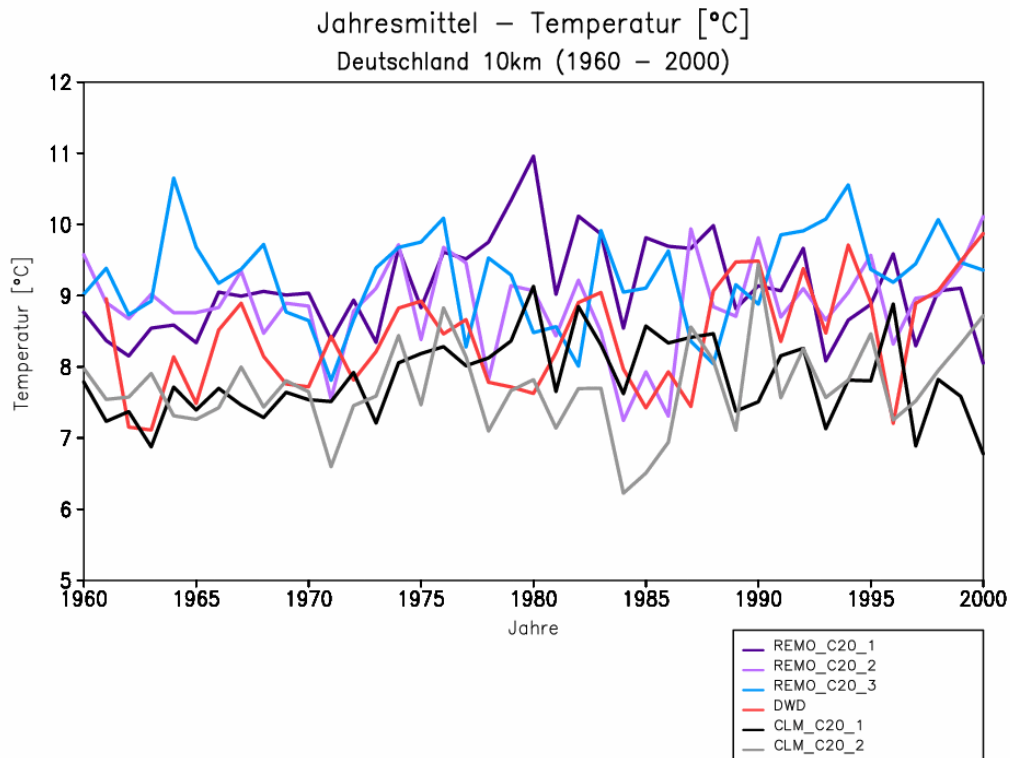


Abbildung 7: Vergleich der Jahresmittelwerte der 2m-Temperatur (obere Abb.) und der Monatssummen des Niederschlags mit Beobachtungsdaten (DWD).

Klimamodells ECHAM5/MPI-OM. Die Ergebnisse dieses Ensembles von Klimaprojektionen werden im Folgenden vorgestellt.

Klimaprojektionen unterschiedlicher Modelle, Realisierungen und Szenarien spannen für jeden Parameter einen Korridor an möglichen Entwicklungen auf. Das gilt auch für die Simulationen der nahen Vergangenheit (1961-2000), die mit Beobachtungsdaten verglichen werden können. Abbildung 7 (Rechid et al., 2010) zeigt den Korridor für das Jahresmittel der 2 m-Temperatur und die Jahresmittelwerte der monatlichen Niederschlagsraten im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD für die Region Deutschland.

Die Ursache für die Bandbreite der Ergebnisse liegt in Modelldefiziten und in der internen Variabilität. Wie oben gezeigt, weist bspw. das CCLM eine zu niedrige Lufttemperatur auf und entsprechend liegen die CCLM-Werte fast immer unterhalb der Kurve der Beobachtungsdaten. Die interne Variabilität (Klimavariabilität des Modells) zeigt sich in den großen Abweichungen aufeinander folgender Jahre oder Jahrzehnte.

Auch die Jahresmittel der Monatsniederschläge zeigen eine Klimavariabilität, jedoch zeigt sich insgesamt eine deutlich bessere Übereinstimmung der Modelle als bei der Temperatur. Die Abweichungen der Simulationsdaten beider Modelle von Beobachtungsdaten sind von der gleichen Größe wie die Abweichungen der Modelle und der Realisierungen untereinander. Jedoch sind die Abweichungen unterschiedlicher Beobachtungsdatensätze größer als der Korridor verschiedener regionaler Klimamodelle (Hollweg et al., 2008).

Die Abbildung 8 zeigt die Bandbreite des Klimaänderungssignals für die jährliche Änderung der 2 m-Temperatur und der Niederschlagsrate für REMO und CCLM und für verschiedene IPCC Szenarien. Der Korridor der Klimaprojektionen ergibt sich hier aus den unterschiedlichen regionalen Klimamodellen und Realisierungen und den unterschiedlichen IPCC-Szenarien. Man erkennt das eher schwache B1-Szenario in der Temperaturentwicklung, aber für die Szenarien A2 und A1B sind die Kurven aufgrund der Variabilität nicht mehr eindeutig zu unterscheiden. Teilweise gruppieren sie sich eher nach den Realisierungen (die beide denselben Anfangszustand haben) als nach den Modellen.

Die Spannweite der Ergebnisse der Klimaprojektionen ist kein Systemfehler, sie ist systemimmanent. Denn nur *ein* Globalmodell, *ein* Regionalmodell, *eine* Realisierung und *ein* Szenario stellen auch nur *eine* mögliche Zukunft dar. Nur durch die Nutzung einer Vielzahl von Modellen, Realisierungen und Szenarien erhält man eine belastbare Aussage über zukünftige Entwicklungen. Dies sollte in weiteren Anpassungsprojekten bzw. bei der Impaktmodellierung berücksichtigt werden, d.h. die Eingabeparameter sollten möglichst aus mehreren Global- und Regionalmodellen und Realisierungen stammen.

Modellfehler des globalen Klimamodells, die an das regionale Klimamodell übergeben werden, beinhalten natürlich eine Abweichung der Ergebnisse in der Gegenwart und in der Zukunft. Dieser Fehler kann durch die Betrachtung der Klimaänderungssignale vermindert werden. Die Klimaänderungssignale werden aus den Differenzen zwischen dem zukünftigen und dem heutigen Klima bestimmt. Diese Vorgehensweise wird empfohlen.

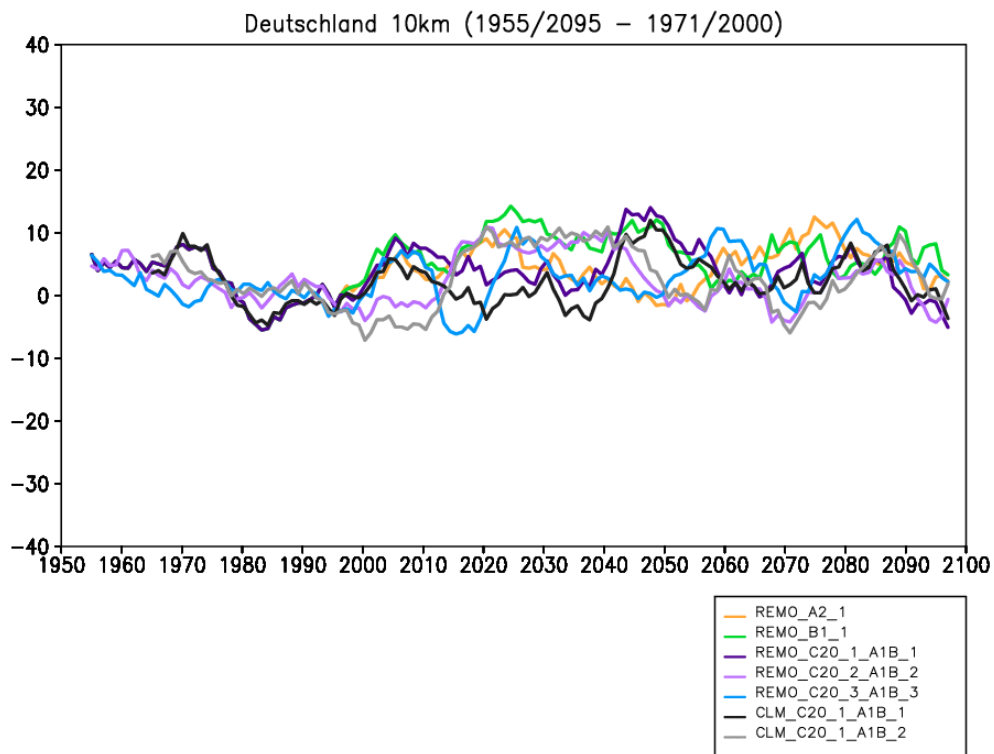
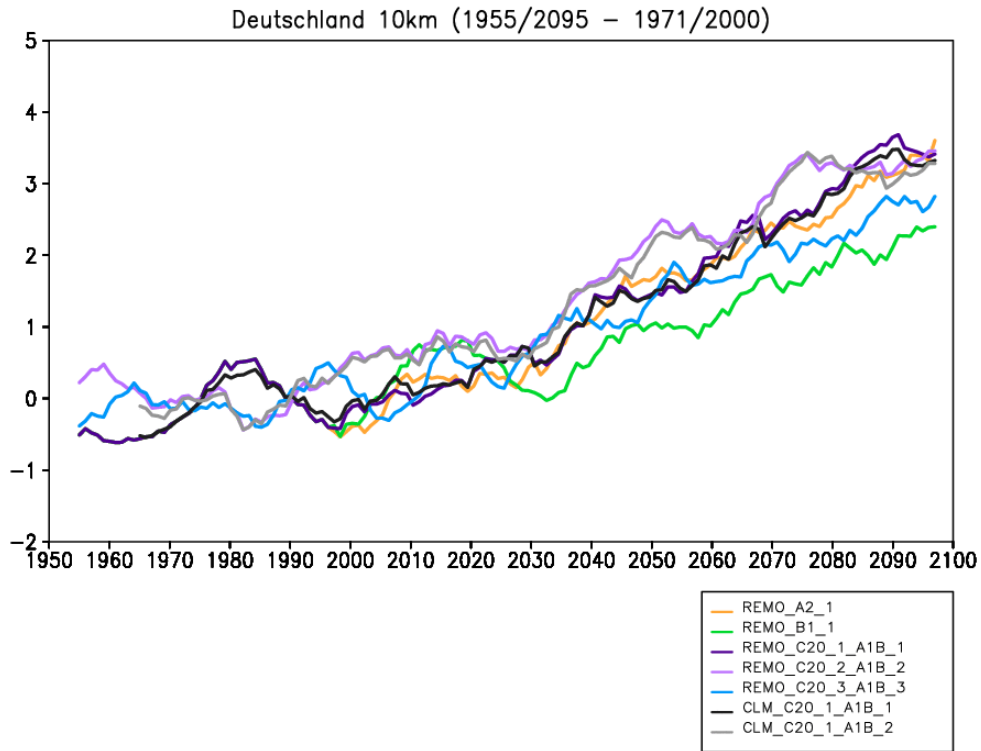


Abb. 8 Gegenüberstellung der jährlichen Klimaänderungssignale für den Zeitraum von 1955 bis 2095 gegenüber der Referenzperiode 1971 bis 2000 der Modelle CCLM und REMO für die Region Deutschland für die 10-Jahresmittel der 2m-Temperatur in [K] (oben) und des Niederschlag in [%] (unten) (Rechid et al., 2010).

3.2 Statistische regionale Klimamodelle

Die statistischen Klimamodelle basieren auf der Analyse statistischer Zusammenhänge zwischen beobachteten großräumigen atmosphärischen Strukturen und dem lokalen Wettergeschehen. Unter der Annahme, dass diese Zusammenhänge auch in Zukunft gültig bleiben, wird der Grund für eine lokale Klimaänderung in einer sich ändernden Häufigkeit und Intensität großräumiger meteorologischer Strukturen gesehen. Auch statistische Modelle benötigen die Vorgaben von globalen dynamischen Modellen zur Regionalisierung. Das ist für die beiden deutschen statistischen Regionalmodelle WETTREG und STAR II das Globalmodell ECHAM5/MPIOM. Beide statistische Modelle liefern Tageswerte.

3.2.1 WETTREG

Das statistische, regionale Klimamodell WETTREG (WETTERlagenbasierte REGionalisierungsmethode) wurde von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) entwickelt. WETTREG arbeitet nach einer Konditionierungsmethode, in der die zeitliche Entwicklung der Wetterlagenhäufigkeit und der Eigenschaften einzelner Wetterlagen vorgegeben werden. Die Vorgaben können regionalspezifisch variieren. WETTREG benötigt direkt modellierte dynamische Größen eines Klimamodells. Extrahiert wird in WETTREG nicht die Information an einzelnen Gitterpunkten, sondern die simulierte großräumige atmosphärische Situation jedes Tages, so z. B. die Felder des Geopotentials, der Luftfeuchte und der Temperatur. Als Globalmodell wird wie bei den dynamischen Modellen ECHAM5/MPIOM genutzt. Es werden Wetterlagenklassifikationen (Enke et al., 2005) genutzt, die sowohl den Temperaturbezug als auch den Feuchtebezug enthalten. Die Zeitreihen der Messdaten werden anhand der Leitgröße Temperatur in übernormal warme bzw. unternormal kalte Abschnitte unterteilt. Per Zufallsgenerator wird eine Neukombination der Witterungsabschnitte zu einer simulierten Zeitreihe unter der Prämisse einer bestmöglichen Annäherung an die vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen durchgeführt. Aufeinanderfolgende Wetterlagen müssen eine Übergangswahrscheinlichkeit von mehr als 10% aufweisen. Jeder Tag dieser simulierten Zeitreihe enthält eine Zuordnung zu Wetterlagen des Temperatur- und Feuchte-Regimes und den originalen Datumsbezug. Der Jahresgang der meteorologischen Größen, der als Abweichung vom stationsspezifischen Jahresgang vorliegt, wird anschließend auf die simulierte Zeitreihe aufgeprägt. Die simulierten Werte liegen auf dieser Verarbeitungsstufe im Wertebereich der Messwerte, können jedoch eine andere Häufigkeitsverteilung annehmen. (Quelle für diesen Abschnitt: <http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html>).

Die Regionalisierung wird für die nahe Vergangenheit (1960-2000) und für die Szenarien A1B, A2 und B1 (2001-2100) durchgeführt. Die Ausgabedaten sind Tageswerte, die repräsentativ für eine Dekade sind. Es stehen 282 Klima- und 1695 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Ausgewertet werden 10 Parameter: Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum), Niederschlag, relative Feuchte, Bedeckungsgrad, Luftdruck, Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit.

Das statistische Klimamodell WETTREG beinhaltet keine Rückkopplungen wie z. B. das Abtauen der Gletscher oder Landnutzungsänderungen. Es geht davon aus, dass sich diese Rückkopplungen in den atmosphärischen Eigenschaften des globalen Klimamodells widerspiegeln.

Die regionalen Klimaprojektionen für Deutschland mit WETTREG wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit einer Finanzierung durch die Bundesländer durchgeführt. Die Daten sind im World Data Center for Climate (WDCC) archiviert. Ein Beispiel für die mittleren 2 m Temperaturen in Zeitintervall 1961 – 1990 ist in Abbildung 9 gezeigt.

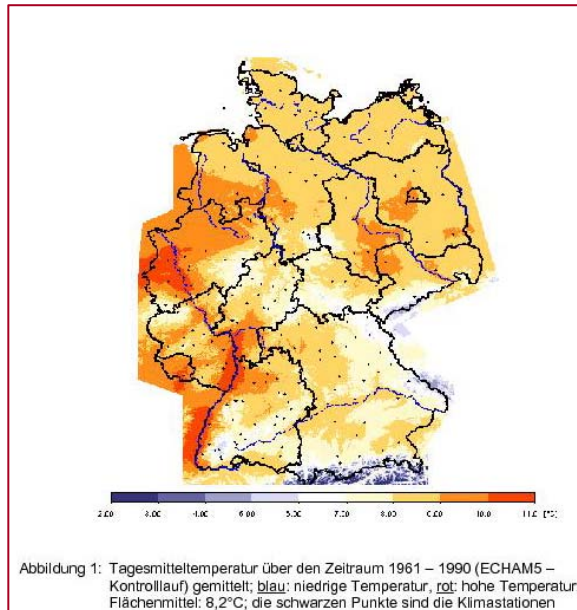


Abbildung 9: Simulation der Tagesmitteltemperatur mit WETTREG, Darstellung der Klimastationen als schwarze Punkte.

Es ist möglich, dass die Eigenschaften der Wetterlagen sich ändern und auch neue Extreme auftreten. Die bisherige Prämisse des WETTREG war, dass die Eigenschaften der zukünftigen Wetterlagen sich nicht fundamental ändern. In der modellierten 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts können Abweichungen insbesondere im Sommer auftreten. Eine neue Modellversion (WETTREG2010) berücksichtigt auch Wetterlagen, die gegenwärtig nicht oder nur selten auftraten. Das WETTREG2010 ist dadurch stark an die Vorgabe des verwendeten globalen Klimamodells angepasst.

3.2.2 STAR II

Das STAR II (STATistisches Regionalisierungsmodell) ist ebenfalls ein stationsbasiertes, statistisches Klimamodell. Es wurde am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung entwickelt und vom CEC umgesetzt. Für die statistische Regionalisierung wird der Temperaturtrend aus globalen Klimaprojektionen sowie die Beobachtungsdaten von Klimastationen benutzt. Die Vorgehensweise ist in Orłowsky et al. (2008) beschrieben und wird im Folgenden erläutert.

Langjährige Messreihen werden mit einem statistischen Verfahren so aufbereitet, dass sie in Form von Szenarienzeitreihen aus globalen Klimamodellen entnommene regionale klimatische Änderungen wiedergeben. Als Grundannahme wird die großräumige Änderung meteorologischer Größen (speziell der langjährigen Mittelwerte der Temperatur) regional als richtig angesehen. Der entsprechende Trend wird auf eine per Zufallszahlengenerator unter Berücksichtigung der interannuellen Variabilität und des Ranges erzeugte Rekombination der Jahresmittelwerte aufgeprägt. Für die gemessenen Tageswerte (Tagesmitteltemperatur) eines jeden Jahres werden die Abweichungen vom Jahresmittelwert ermittelt und unter Beachtung der Rangfolge zufällig ausgewählter Jahre der simulierten Zeitreihe der Jahresmittel zugeordnet. Die Zeitreihe der Meßdaten wird anhand von temperaturbezogenen Parameterkombinationen (Tagesmittel, Tagesamplitude, astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, Temperaturverhalten der Vortage) einer Clusteranalyse unterzogen und die Tageswerte in Cluster ähnlicher Tage aufgeteilt. Für die simulierte Zeitreihe werden ebenfalls die Parameterkombinationen für jeden Tag berechnet und jede dieser Kombinationen über ein Distanzmaß einem der Beobachtungscluster und in diesem wiederum einem konkreten Tag zugeordnet. Damit können die kompletten meteorologischen Informationen dieses Tages in die Simulation übernommen werden. Diese Methode wird zunächst auf ausgewählte, für die Region repräsentative Stationen angewendet und danach aufgrund der Tageszuordnung auf alle Stationen übertragen. Somit wird die räumliche Konsistenz gewahrt. (Quelle für diesen Abschnitt:

<http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html>)

Im STAR II Modell werden 11 Klimaparameter: Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum), Niederschlag, relative Feuchte, Luftdruck, Dampfdruck, Sonnenscheindauer, Bewölkung, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Mit den Temperaturtrends aus dem ECHAM5/MPIOM wurden 3 unterschiedliche Realisierungen des A1B Szenarios berechnet, eine trockene, eine mittlere und eine feuchte Realisierung. Diese sind für den Zeitraum von 2007 bis 2060 durchgeführt und im World Data Center for Climate (WDCC) archiviert.

Das Modell benötigt nur geringe Rechnerkapazitäten. Nachteilig ist die Beschränkung auf die Änderung der Jahresmitteltemperatur, dadurch können keine jahreszeitlich spezifischen Trends erfasst werden.

Durch erneute Rekombinationen der Jahresmittelwerte der Temperatur und Durchführung der nachfolgenden Arbeitsschritte können beliebig viele Szenarienrealisationen erstellt werden. Dadurch ist es möglich, ein statistisch bewertbares Stichprobenkollektiv zu erstellen, um so die Spannweite möglicher Klimaänderungen abzusichern

3.3 Gegenüberstellung statistischer und dynamischer Klimamodelle

Statistische Klimaprojektionen sind Zeitreihen stationsgebundener atmosphärischer Größen, erzeugt mittels eines Zufallsgenerators aus Witterungsabschnitten einer Vielzahl von Beobachtungsstationen. Die jeweilige zeitliche Entwicklung der meteorologischen Größen wird durch eine spezifische Konditionierungsmethode vorgegeben. Änderungssignale entstehen z. B. durch einen erhöhten Einbau von warmen Witterungsabschnitten bzw. durch die Vorgabe des Klimaänderungssignals aus globalen Klimasimulationen.

Diese Zeitreihen sind für das Gegenwarts-klima im Wesentlichen biasfrei, weil bei der Simulation der Gegenwart keine systematischen Änderungen gegenüber dem beobachteten Klima hinzugefügt werden. Jedoch kann auch hier durch die statistische Methode und die Übertragung eines gesamten Parametersatzes eine Abweichung von beobachteten Mittelwerten vorkommen.

Der Vorteil der statistischen Modelle liegt in der geringen Rechenzeit, so dass ein Ensemble von Realisierungen gerechnet werden kann, und in den leicht handhabbaren, relativ kleinen Ergebnisdatensätzen. Zudem sind stationsbasierte Klimaprojektionen in Impaktmodellen, die auf Beobachtungsdaten beruhen, einfach umzusetzen. Von Nachteil ist unter Umständen die Beschränkung auf wenige Parameter (ca. 10). Zudem benötigen statistische Modelle immer die Vorgabe eines globalen Zirkulationsmodells. Denn die grundlegende Annahme besteht darin, dass der Zusammenhang zwischen den großräumigen, atmosphärischen Strukturen und dem regionalen Klima auch zukünftig gilt. Statistische Modelle sind für sich allein nicht in der Lage sich ändernde regionale Klimate zu erzeugen.

Bei der dynamischen Modellierung werden regionale Vorhersagemodelle genutzt, die auf physikalischen Grundgleichungen und parametrisierten Prozessbeschreibungen basieren. Sie sind in der Lage, das Klima kontinuierlich über mehr als einhundert Jahre zu simulieren und dabei auch viele Rückkopplungsprozesse zwischen Atmosphäre, Boden und Ozean zu erfassen. Sie benötigen allerdings die Vorgaben zeitabhängiger seitlicher Randwerte aus einem übergeordneten Regionalmodell oder aus einem globalen Klimamodell. Die regionalen Simulationen liefern im Gegensatz zu den statistischen Simulationen sehr viele physikalische Größen (ca. 60) in meist stündlicher Auflösung. Die Ergebnisse sind abhängig von der Komplexität des Modells, den verwendeten Näherungen, der räumlichen Auflösung und den Randwerten.

Generell verfolgen die dynamische und statistische Klimamodellierung zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, die nur sehr schwer miteinander zu vergleichen sind. Alle dynamischen Klimamodelle verfolgen den gleichen Ansatz, aber bei den statistischen Modellen existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen methodischen Ansätzen, die einen generellen Vergleich der Vor- und Nachteile beider Methoden nicht zulassen.

4. Hinweise zur Kopplung von Regionalmodellen mit Wirkmodellen

Die Schnittstelle zwischen regionalen Klimamodellen und Impaktmodellen ist nicht fest vorgegeben und erfordert – je nach Art des Regionalmodells und des Impaktmodells – teilweise umfangreiche Vorarbeiten. Dabei sind die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen der Modelle, die Anzahl der zu nutzenden Klimamodellparameter, die Empfindlichkeit der zu modellierenden Prozesse des Impaktmodells bezüglich dieser Parameter, mögliche Modellfehler und die Zielsetzung der Impaktmodellierung zu berücksichtigen.

4.1 Räumliche Auflösung

Wirkmodelle, die mit Stationsdaten betrieben werden können, können sicherlich ohne große Probleme die Ergebnisse von statistischen Regionalmodellen

verwenden. Sollen aber dynamische Modelle genutzt werden, so stimmt in den meisten Fällen die räumliche Auflösung von Klimamodellen und Impaktmodellen nicht überein. Hier ist meist eine räumliche Verfeinerung der Klimamodelldaten nötig. Es kommen statistische und dynamische Verfeinerungsmethoden in Frage. Auch GIS kann verwendet werden, wenn die Parameter zur Verfeinerung die wesentlichen Merkmale der jeweiligen Größe (Temperatur, Wind, Niederschlag, ...) beschreiben. Meist werden – auch um bei den statistischen Modellen die Stationsdaten in die Fläche zu bringen – Interpolationsverfahren angewendet. Hierbei müssen alle Einflussfaktoren (z.B. die Windrichtung) berücksichtigt werden.

4.2 Zeitliche Verfeinerung

Anwendungsbezogene Modelle benötigen teilweise eine höhere zeitliche Auflösung, als es die Klimamodelle liefern können. Das liegt nicht nur am zeitlichen Mittel der Ausgabeparameter (statistische Modelle: 1 d, dynamische Modelle höchstens 1 h) sondern bei den dynamischen Modellen auch daran, dass die meisten Prozesse in Bodennähe parametrisiert sind, d.h. durch mittlere Größen beschrieben werden und dass sie Mittelwerte über die Gitterbox darstellen. Dadurch können keine Spitzenwerte etwa der Windgeschwindigkeit oder des Niederschlags wiedergegeben werden. Hier kann nur eine Korrektur mit Hilfe von Beobachtungsdaten vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 4.3).

4.3 Bias-Korrektur

Bei einer systematischen Abweichung der Modelldaten von Beobachtungsdaten ist es unter Umständen notwendig eine Korrektur der Modelldaten durchzuführen. Benötigt wird eine Abbildungsvorschrift, die die Simulationsdaten der Gegenwart auf Beobachtungsdaten abbildet. Dabei muss vorher festgelegt werden, was angepasst werden soll (Mittelwerte, hochaufgelöste Daten, ...). Für Jahresmittelwerte ohne Betrachtung der Variabilität kann die einfache bias-Korrektur (offset-Bestimmung) ausreichend sein. Bei Modellfehlern (systematische Fehler wie z.B. cold bias der Temperatur im CCLM) können Korrekturen vorgenommen werden. Sollen aber mehrere Modellparameter genutzt werden, ist dies meist nicht möglich, da die Korrekturen getrennt voneinander ermittelt werden und folglich die Daten untereinander nicht mehr konsistent sind. Bei der Nutzung der dynamischen Modelle wird daher eher die Nutzung der unkorrigierten Daten empfohlen, da nur dann die Erhaltungssätze von Energie, Masse, Impuls sind erfüllt. Um den Einfluss systematischer Modellfehler zu minimieren, sollte möglichst mit den Klimaänderungssignalen gearbeitet werden.

Häufig werden bias-Korrekturen angewendet, um eine Annäherung der Häufigkeitsverteilungen von Modell- und Beobachtungsdaten zu erzielen. Hier gibt es Verfahren, die sich auf Quartals-, Monats- und Tageswerte beziehen wie bspw. das von Piani et al. (2010) oder Leander und Buishand (2007). Die Transferfunktion kann dann ein Polynom höherer Ordnung sein, um eine gute Übereinstimmung zu erzielen. Auf diese Weise werden auch höhere Extremwerte erzeugt, die bspw. auch für eine zeitliche Verfeinerung genutzt werden können. Welches Verfahren angewendet werden sollte, hängt von den Anforderungen des Wirkmodells ab. Nach Anwendung einer bias-Korrektur auf die Modelldaten wird somit mit 'verfälschten'

Klimamodelldaten gearbeitet. Das Thema bias-Korrektur von Klimamodelldaten ist erst seit wenigen Jahren intensives Forschungsthema.

Es wird empfohlen, für die jeweilige Region zunächst durch Vergleiche mit Beobachtungsdaten die Abweichungen zu ermitteln und den Einfluss auf das Wirkmodell zu quantifizieren.

5. Schlussbemerkungen und allgemeine Hinweise

Erst seit kurzem werden Klimamodelldaten von Experten, die nicht aus der Klimaforschung kommen, in Impaktmodellen genutzt, um bspw. Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu entwickeln. Dazu sollten Regionalmodelle verwendet werden, da sie eine bessere Auflösung kleinräumiger Prozesse als Globalmodelle enthalten. Für Deutschland stehen neben den ENSEMBLES-Regionalmodellen mit einer horizontalen Auflösung von ca. 25 km die vier speziell für Anpassungsfragen genutzten Regionalmodelle REMO, CCLM, WETTREG und STAR II zur Verfügung. In Validierungsstudien wurden für REMO und CCLM regional unterschiedliche Abweichungen von Beobachtungsdaten ermittelt, so dass allgemeine Aussagen nicht möglich sind. Generell wird die Nutzung mehrerer Regionalmodelle, basierend auf verschiedenen Globalmodellen empfohlen, um die Bandbreite der Projektionen zu erfassen.

Die Eignung dynamischer und statistischer Modelle für den Einsatz in Wirkmodellen muss anwendungsbezogen beurteilt werden und hängt stark von der Konzeption und den Anforderungen des Wirkmodells ab. In den meisten Fällen ist eine Aufbereitung der Klimamodelldaten zur Nutzung in Wirkmodellen nötig.

Es wird empfohlen, eine Sensitivitätsstudie des genutzten Wirkmodells bezüglich der Eingangsdaten durchzuführen, d.h. es ist zu prüfen, ab welcher Änderung der Eingangsdaten sich die Wirkmodellergebnisse relevant ändern. Dadurch kann dann die Notwendigkeit einer Bias-Korrektur der Klimamodelldaten abgeschätzt werden.

Es gibt zur Zeit weltweite Bestrebungen, die Schnittstelle zwischen Klimamodellen und Impaktmodellen genauer zu erfassen, beiderseitige Anforderungen zu definieren und so eine bessere Koppelung der Modelle zu erreichen (NKGCF, 2009).

6. Literatur:

Bennartz R., P. Lorenz und D. Jacob, 2009: Validation of the BALTIMOS coupled climate model using the Advanced Scanning Microwave Radiometer (AMSR-E), Theoretical and Applied Climatology, DOI10.1007/s00704-009-0178-x

Enke, W., F. Schneider und T. Deutschländer, 2005: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. Theor. Appl. Climatol 82, 51—63.

Giorgetta, M. und M. Wild, 1995: The water vapour continuum and its representation in ECHAM4. Max-Planck Institut für Meteorologie Report No. 162, 38pp.

Hollweg, H.-D., U. Böhm, I. Fast, B. Hennemuth, K. Keuler, E. Keup-Thiel, M. Lautenschläger, S. Legutke, K. Radke, B. Rockel, M. Schubert, A. Will, M. Woldt und C. Wunram, 2008: Ensemble Simulationen over Europe with the Regional Climate Modell CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Technical Report No. 3, Modelle & Daten, ISSN 1619-2257.

Jacob, D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz und K. Siek, 2007: Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, UBA Forschungsbericht 20441138, ISSN 1862-4359.

Jacob D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz und K. Sieck, 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland -- Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 13

Jacob, D., D. Rechid, L. Kotova und R. Podzun, 2010: Projekt des Monats KLIMZUG-NORD: <http://klimzugnord.de/index.php/page/2009-05-25-Projekt-des-Monats>

Jacobsen, I. und E. Heise, 1984: A new economic method for the computation of the surface temperature in numerical models. *Contr. Atmos. Phys.*, 55, 128-141.

Leander, R. und T.A. Buishand, 2007: Resampling of climate model output for the simulation of extreme river floods, *J. Hydrology*, Vol. 332, 487-496.

Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteor.*, 17, 187-202.

Majewski, D, 1991: The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models, Vol.2, 147-191.

Mellor, G. und T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. and Space Physics* 31, 1796-1806.

Morcrette, J.-J., L. Smith und Y. Fourquart, 1986: Pressure and temperature dependence of the absorption in longwave radiation parameterizations. *Beitr. Phys. Atmos.* 59, 455-469.

Nationales Komitee für Global Change Forschung (Hrg.), 2009: Regionale Klimamodelle – Potentiale, Grenzen und Perspektiven-. ISBN 978-3-9813068-1-1, c/o Institut für Weltwirtschaft, Kiel.

Nordeng, T.E., 1994: Extended versions of the convective parametrization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics. ECMWF Research Department, Technical Memorandum No. 206, October 1994, 41 pp, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK.
Piani, 2010 ...

Orlowsky, B., F.-W. Gerstengarbe und P.C. Werner, 2008: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM, *Theor. Appl. Climatology*, 92, 209-223.

Paeth H., K. Born, R. Podzun und D. Jacob, 2005: Regional dynamical downscaling over West Africa: model evaluation and comparison of wet and dry days. *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 14, pp 349-367

Piani, C., J.O. Haerter und E. Coppola, 2010: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 99, 187-192.

Rinke, A., K. Dethloff, J. Cassano, J.H. Christensen, J.A. Curry, J.-E. Haugen, D. Jacob, C. Jones, M. Koltzow, A.H. Lynch, S. Pfeifer, M.C. Serreze, M.J. Shaw, M. Tjernstroem, K. Wyser, M. Zagar (2005): Ensemble Performance in ARCMIP1 Experiments: Spatial Patterns and Height Profiles. *Climate Dynamics* 26 (5) 459-472, DOI 10.1007/s00382-005-0095-3

Ritter, B. und J.-F. Geleyn, 1992. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 303-325.

Rechid, D. & Jacob, D. (2006): Influence of monthly varying vegetation on the simulated climate in Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 99-116.

Rechid, D., D. Jacob and P.Lorenz, 2010: The Range of Regional Climate Change Projections in Central Europe: How to Deal with the Spread of Climate Model Results, in W. Endlicher, F.-W. Gerstengarbe (ed): *Continents under climatic change*, PIK-Report No. 115, 122.

Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese und U. Schulzweida, 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.218, Hamburg, Germany, 90pp.

Silvestri G., C. Vera, D. Jacob, S. Pfeifer, C. Teichmann, 2007: A high-resolution 43-year atmospheric hindcast for South America generated with the MPI regional model, *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-008-0423-5

Spekat, A., W. Enke und F. Kreienkamp, 2007: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für SRES Szenarios B1, A1B und A2, UBA Forschungsbericht 20441138.

Sundquist, H., 1978: A parameterization scheme for non-convective condensation including precipitation including prediction of cloud water content. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 104, 677-690.

Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779-1800.

Tjernstroem, M., M. Zagar, G. Svensson, J.J. Cassano, S. Pfeifer, A. Rinke, K. Wyser, K. Dethloff, C. Jones und T. Semmler, 2005: Modeling the Arctic boundary

layer: An evaluation of six ARCMIP regional-scale models with data from the SHEBA project. *Boundary-Layer Meteorol.* 117(2), 337-381

van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.

Wyser, K., C.G. Jones, P. Du, E. Girard, U. Willén, J. Cassano, J.H. Christensen, J.A. Curry, K. Dethloff, J.-E. Haugen, D. Jacob, M. Körtzow, R. Laprise, A. Lynch, S. Pfeifer, A. Rinke, M. Serreze, M.J. Shaw, M. Tjernström und M. Zagar, 2008: An Evaluation of Arctic Cloud and Radiation processes during the SHEBA year: Simulation results from 8 Arctic Regional Climate Models. *Climate Dynamics*, 30, 203-223. DOI 10.1007/s00382-007-0286-1

Kontakt:

Climate Service Center
Fischertwiete 1
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-424
Fax. 040-226 338-163

www.climate-service-center.de

ISSN 2192-4058

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung