

Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war, Niederschlagssimulationen des COSMO-CLM für bestimmte Gebiete in Hessen zu validieren und eine Projektion bis zum Jahr 2050 auszuwerten. Um bewerten zu können, wie belastbar die Projektionen des CCLM sind, ist es wichtig zu wissen, inwiefern das Modell in der Lage ist, bestimmte Kennwerte des gegenwärtigen Klimas in Form des Kontrollzeitraums von 1971 bis 2000 zu simulieren.

Die in der Einleitung gestellten Fragen lassen sich nun nach der Auswertung von Kontroll- und Projektionszeitraum folgendermaßen beantworten:

- **Wie gut ist das COSMO-CLM in der Lage das Klima (hier bezogen auf die Niederschlagswerte) des Referenzzeitraums (1971 – 2000) zu simulieren? Inwiefern werden bestimmte Niederschlagsparameter wie Niederschlagssummen über bestimmte Zeiträume oder die Dauer von Trockenperioden richtig simuliert?**

Die Antwort fällt unterschiedlich davon aus, je nachdem welche Kennwerte und welchen Aspekt der Verteilungen man jeweils betrachtet. Der durchschnittliche Gesamtniederschlag beispielsweise weicht im Modell nur um maximal 5% ab, wird also sehr gut wiedergegeben. Auch für die meisten der maximalen und minimalen Niederschlagssummen wird der Durchschnitt in vielen Fällen um weniger als 10% verfehlt. Etwas schlechter simuliert das Modell die maximalen Längen von Nass- und Trockenperioden. Diese beiden Kennwerte werden aus zwei Eingangsgrößen gebildet, nämlich zum einen, ob ein bestimmter Tag die Definition eines nassen oder trocknen Tags erfüllt, was unmittelbar von der Niederschlagshöhe abhängt; zum andern, wie die entsprechenden Tage innerhalb des Jahres verteilt sind. Von diesen beiden Größen wird nur die erste durch die Biaskorrektur angepasst, die zeitliche Variabilität bleibt unangetastet.

Probleme zeigen sich vor allem bei der Betrachtung von Extremwerten und der Streuung. Die Interquartilsabstände der simulierten Kennwerte weichen

im Vergleich mit Beobachtungsdaten teils bis um den Faktor Zwei in beide Richtungen ab. Dadurch, dass die Streuung oft nicht korrekt simuliert wird, ergeben sich teilweise auch große Abweichungen bei den Extremwerten der jeweiligen Kennwertverteilungen. Diese können dann um 20 bis 40 % von den beobachteten Werten abweichen, in Einzelfällen sogar um über 100 % (s. Abbildung 4.19, Seite 50). Daher sollten genaue Aussagen des Modells über die Streuung beziehungsweise über die Änderung von Streuungen von bestimmten Kennwerten und in Folge dessen auch Extremwerte dieser Kennwerte mit großer Vorsicht betrachtet werden.

Oder, mit den Worten von [Blöschl und Montanari \(2010\)](#):

„The further we move away from mean values to extremes the thinner the ice gets.“*

Die Fehler bei der Simulation von Extremwerten sind jedoch systematisch – sie werden in der überwiegenden Mehrheit der Kennwerte nicht extrem genug simuliert. Das bedeutet, dass bei einem simulierten Ansteigen der Extreme in der Projektion zusammen mit der Information, dass das Modell in der Referenzperiode Extreme unterschätzt durchaus davon ausgegangen werden kann, dass auch in der Realität in Zukunft die extremen Niederschlagsereignisse stärker werden und die vom Modell projizierten Kennwerte nicht zu pessimistisch sind.

- **Welches Verfahren ist für die Biaskorrektur in den untersuchten Gebieten am besten geeignet?**

Diese Frage lässt sich nach der Auswertung der vorliegenden Daten nicht abschließend beantworten. Die Verfahren[†] (Quantile Mapping und Linear Scaling der Tagessummen) unterscheiden sich sowohl in ihrer Komplexität als auch in ihrem Grad der Anpassung deutlich voneinander, liefern in diesem Fall beide aber sehr ähnliche Ergebnisse. Man kann aus den vorliegenden Daten also keinesfalls zu dem Schluss kommen, eines der beiden Verfahren sei *deutlich* besser geeignet.

Beachtet werden muss dabei aber auch, dass die unkorrigierten COSMO-CLM-Rohdaten – mit Ausnahme des *permanent drizzles*, also der Über-

*„Je mehr wir uns von Mittelwerten weg hin zu Extremen bewegen, desto dünner wird das Eis“

[†]durchgeführt jeweils vom Karlsruher Institut für Technologie

schätzung von Tagen mit geringem Niederschlag (und in Folge dessen eine Unterschätzung an Tagen ohne Niederschlag) und einer generellen leichten Überschätzung der Tagesniederschläge um wenige Millimeter – bereits eine relativ gute Übereinstimmung mit den beobachteten Tagessummen vorweisen. Der QQ-Plot aus modellierten und beobachteten Tagesniederschlagssummen (Abschnitt 4.3) zeigt eine hohe Korrelation der unkorrigierten Werte, die durch die Korrektur nicht mehr wesentlich verbessert wird. Sollten Daten korrigiert werden, die eine geringere Korrelation aufweisen, also beispielsweise niedrige Niederschlagshöhen überschätzt und hohe unterschätzt werden, dürften die Unterschiede zwischen den beiden Korrekturverfahren durchaus größer sein. In diesem Fall würde ein einfaches Skalieren sämtlicher Werte mit einem einzelnen Faktor (was einem Verschieben der Kurve im QQ-Plot gleichkommt) wohl schlechtere Ergebnisse bringen als die Anwendung einer Transferfunktion, die einzelne Bereiche abhängig von ihrer jeweiligen Abweichung korrigiert.

- **Was sagt die Projektion für künftige Zeiträume in Bezug auf Niederschlagsereignisse?**

Die projizierten Änderungen bezüglich der in dieser Arbeit untersuchten Niederschlagskennwerte lassen sich im wesentlichen durch die folgende Tabelle zusammenfassen:

Gesamtniederschlag (PRCPTOT)	
<i>Sommerhalbjahr</i>	— Der Gesamtniederschlag im Sommerhalbjahr bleibt relativ konstant mit einem Änderungssignal von maximal -7% .
<i>Winterhalbjahr</i>	— In allen Gebieten ist ein Anstieg um bis zu 15% zu erkennen. Der durchschnittliche Gesamtniederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr steigt in allen Gebieten von der Referenzperiode zur ersten beziehungsweise zweiten Projektionsperiode stetig an.

 maximale Niederschlagssummen (R_{xnd})

Sommerhalbjahr — Die maximalen Niederschlagssummen sinken tendenziell im Sommerhalbjahr ab. Die Spannweite des Änderungssignals liegt bei +3 % bis -15 %. Auch die Streuung im Sommerhalbjahr nimmt in drei der vier Gebiete ab.

Winterhalbjahr — Es ist ein Anstieg sowohl bei den mittleren Kennwerten als auch bei der Streuung festzustellen. Die Kennwerte steigen um 2 % bis 38 % im Vergleich zur Referenzperiode; die Streuung der Werte steigt mit Ausnahme des Fulda gebiets an.

 minimale Niederschlagssummen (R_{mnd})

Sommerhalbjahr — Im hydrologischen Sommerhalbjahr sinken diese um bis zu 36 %. Die Streuung der Werte bleibt etwa konstant.

Winterhalbjahr — Im Winterhalbjahr steigen die minimalen Niederschlagssummen um 4 % bis 38 % an. Die Streuung der Werte steigt etwas.

 Trocken- und Nassperioden (CDD, CWD)

Sommerhalbjahr — Sowohl die Länge der Trockenperioden als auch die der Nassperioden steigt im hydrologischen Sommerhalbjahr an; die Länge der Trockenperioden steigt um 19 % bis 36 %, die der Nassperioden um bis zu 28 %. Stabilere Wetterlagen führen offenbar zu längeren gleichbleibenden Trocken-/Nassperioden

Winterhalbjahr — Im WHJ zeigt sich ein leichtes Absinken der Trockenperiodenlänge um bis zu 16 %, während sich die Länge der Nassperioden nur wenig ändert ($\pm 8\%$). Bei der Streuung ist keine klare Tendenz zu erkennen.

 Starkniederschläge (R10mm)

- Winterhalbjahr* — Im Winterhalbjahr zeigt sich in allen Untersuchungsgebieten ein Anstieg um etwa ein Viertel.
- Sommerhalbjahr* — Im Sommerhalbjahr bleibt R10mm etwa konstant bzw. sinkt leicht ab.
- In den meisten Frühlings- und Sommermonaten zeigt sich eine Tendenz zu weniger Tagen mit $RR \geq 10$ mm, während diese im Herbst und im Winter eher zunehmen. Über das ganze Jahr betrachtet nehmen diese in allen vier Gebieten in der Größenordnung von 10 % zu.
-

Aufgrund der hohen Variabilität von Niederschlägen ist es sehr kompliziert, genaue Aussagen über die Belastbarkeit der Projektionen zu treffen. Als Beispiel soll hier die maximale Nassperiodenlänge im hydrologischem Winterhalbjahr (CWD, Abbildung 5.8, rechts) herangezogen werden. Im Lahnggebiet beträgt die Länge im Kontrollzeitraum etwa 32 Tage, sinkt dann in der Periode von 2011 bis 2040 minimal ab und steigt in der zweiten Projektionsperiode von 2021 bis 2050 um etwas über zwei Tage an. Ähnliches gilt für den gleichen Kennwert im Diemelgebiet, bei dem dieser in der ersten Projektionsperiode deutlich absinkt und in der zweiten wieder auf das gleiche Niveau ansteigt. Obwohl sich beide Projektionsperioden mit 20 Jahren überschneiden, ist der Unterschied bei einigen Kennwerten durchaus recht hoch. Würde man nur die erste Projektionsperiode betrachten, stellte man für das Diemelgebiet eine Verkürzung der durchschnittlichen maximalen Nassperiodenlänge fest und für das Lahnggebiet eine etwa gleichbleibende Länge. Ausschließlich die zweite Projektionsperiode betrachtend käme man dagegen zu dem Schluss, dass CWD im Diemelgebiet konstant bleibt und im Lahnggebiet steigt. Treten also über den relativ kurzen Zeitraum von einem Jahrzehnt solch starke Änderungen auf, zeigt dies in erster Linie, dass Änderungen im Klima nicht linear verlaufen und wie groß die dekadische Variabilität ist.

Beachtet werden muss auch, dass Modelle *immer* Vereinfachungen der Realität sind, und damit per Definition nicht perfekt sein können. Jeder Schritt in der Modellkette ist unweigerlich mit Fehlern behaftet, die weitere Unsicherheiten in die Aussage bringen. Zum einen ist ungewiss, inwiefern die SRES-Szenarien, auf deren Grundlage die Konzentrationen der Treibhausgase berechnet werden, die die Klimamodelle als Input benötigen, realistisch sind. Abbildung 6.1 zeigt aber, dass

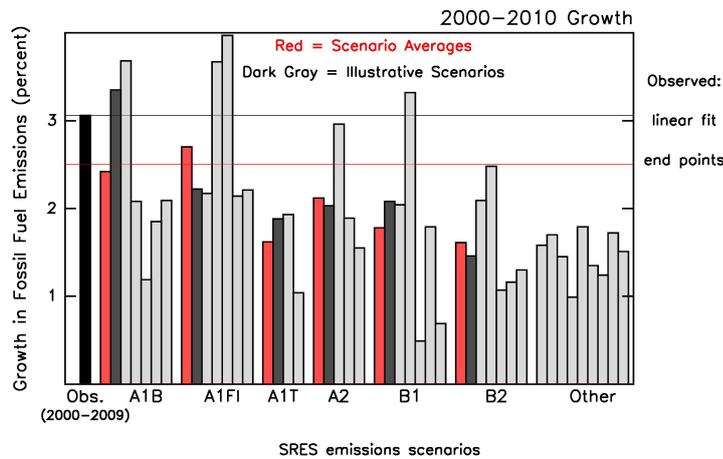


Abbildung 6.1: Wachstum der Kohlenstoffdioxidemissionen pro Jahr über den Zeitraum von 2000 bis 2010 (LINKS) im Vergleich mit den SRES-Szenarien durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern. Graue Balken stellen Mittelwerte der jeweiligen Szenarienfamilien dar (A1B, A1FI, etc.), rote Balken das jeweilige von Klimamodellen verwendete Beispielszenario. Aus [Le Quéré et al. \(2009\)](#).

zumindest aus der gegenwärtigen Sichtweise das oftmals gewählte A1B-Szenario nicht zu pessimistisch ist. Mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum an Emissionen durch fossile Energieträger von etwas über drei Prozent liegen die beobachteten Werte von 2000 bis 2009 über dem Szenariodurchschnitt von A1B und während in der Zeit der Finanzkrise in den Jahren 2008 und 2009 die Emissionen etwas sanken, steigen diese nun wieder deutlich an ([Peters et al., 2012](#)). Während die Klimaänderungen der nahen Zukunft wegen des träge reagierenden Klimasystems bereits nicht mehr zu ändern sind, werden durch die gegenwärtigen Emissionen vor allem die Änderungen der mittleren Zukunft verursacht (Tabelle 6.1) – hier können also durchaus noch Maßnahmen getroffen werden, um die Effekte abzuschwächen.

In der Modellkette folgt der Szenarioannahme das globale Klimamodell (GCM), das die aus den SRES-Szenarien berechneten Treibhausgaskonzentrationen als Grundlage verwendet. Im nächsten Schritt folgt das regionale Klimamodell, das an den Modellgrenzen die vom GCM berechneten Werte übernimmt. Durch diese vom GCM definierten Randwerte hängen viele Kennwerte auch stark vom globalen Klimamodell ab. Simuliert das GCM in der entsprechenden Gitterbox beispielsweise eine wasserarme Periode, wird es dem regionalen Klimamodell nicht gelingen, viel Niederschlag zu produzieren.

Tabelle 6.1: Charakteristische Zeitskalen von ausgewählten Prozessen des Klimasystems. Nach Abbildung 5-1 aus IPCC (2001). Zeitskala ist definiert als der Zeitraum, ab dem mindestens die Hälfte der endgültigen Effekte eingetreten sind.

Prozess	Zeitskala in Jahren
Lufttemperaturänderung als Folge des CO ₂ -Anstiegs	120 – 150
Wärme- und CO ₂ -Transport in die Tiefsee	100 – 200
Meeresspiegeländerung als Folge des Temperaturanstiegs	bis zu 10 000
Eisschichtänderung als Folge des Temperaturanstiegs	bis zu 10 000

Der nächste Schritt ist die Biaskorrektur, die systematische Fehler, die in einer *Kontrollperiode* beobachtet wurden, ausgleichen soll. Im Falle der Biaskorrektur ist es essentiell, dass der Skalierungsfaktor (beim Linear Scaling) beziehungsweise die Transferfunktion (beim Quantile Mapping) über lange Zeiträume konstant bleibt, da die Korrektur sonst schlechter funktioniert oder sogar kontraproduktiv wird. Inwiefern dies zutrifft, lässt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit nicht beantworten; vielmehr könnte man weitere Perioden in der Vergangenheit simulieren und überprüfen, ob die Korrekturfaktoren beziehungsweise -funktionen die Niederschlagsverteilung für diese Perioden noch hinreichend gut zu korrigieren vermögen. Endgültige Sicherheit, dass dies dann auch für die Zukunft zutrifft, kann es allerdings nicht geben.

Mit der Biaskorrektur ist zudem ein weiteres Problem verbunden: der Datensatz (in diesem Fall HYRAS), mit dem die modellierten Tagessummen korrigiert wurden, besteht aus Punktmessdaten von einzelnen Klima- und Niederschlagsstationen, die über ein Interpolationsverfahren in Rasterdaten umgerechnet wurden. Auch dabei ergeben sich zum einen Fehler bei der Interpolation, zum anderen sind Messdaten immer mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet. So wird beispielsweise durch Überwehung der Stationen der Niederschlag vor allem in höheren Lagen systematisch unterschätzt (Panitz et al., 2011). Diesen Fehler kann man durch die sogenannte Richterkorrektur (nach Richter (1995)) minimieren, bei der für jede Station ein Faktor berechnet wird, der angibt, in welchem Maße die Niederschlagshöhe durch Überwehung vermindert wird. Bei einem Vergleich des REGNIE-Datensatzes, der für die vier Untersuchungsgebiete sowohl in unkorrigierter als auch in Richter-korrigierter Form vorlag, zeigten sich Abweichungen des durchschnittlichen Jahresgesamtniederschlags von bis zu etwa 9%. Da der

HYRAS-Datensatz nur in unkorrigierter Form vorliegt, konnte das Maß der Unterschätzung durch Nichtberücksichtigung einer Niederschlagskorrektur nicht berechnet werden.

Aufgrund dieser genannten Einschränkungen bei der Klimamodellierung spricht man bei Berechnungen für zukünftige Zeiträume nicht von Vorhersagen, sondern von Projektionen, um deutlich zu machen, dass es sich um eine von vielen *möglichen* Zukünften handelt; schließlich kann es zu einem bestimmten Klimazustand auch mehrere Realisierungen geben, die alle gleich wahrscheinlich sind.

Zuletzt folgt das – hier nicht untersuchte – Wasserhaushaltsmodell, das aus den simulierten oder projizierten Niederschlägen und weiteren Klimakenngrößen Abflüsse berechnet und so Aussagen zu Hoch- und Niedrigwasserrisiken treffen kann.



Unter Berücksichtigung der Schwächen der Simulation der Kontrollperiode scheinen folgende Aussagen zu bestimmten Kennwerten in den Projektionszeiträumen trotz der hohen Variabilität des Niederschlags relativ wahrscheinlich:

- **Gesamtniederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr**

Während im Sommerhalbjahr die Gesamtniederschläge teilweise sinken und wieder ansteigen oder über alle drei Perioden konstant sind, zeigt sich im Winterhalbjahr ein durchgängiger Anstieg in allen Gebieten über beide Projektionsperioden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der Kontrollperiode die mittleren Gesamtniederschläge gut getroffen wurden (wohl dadurch, dass der Niederschlag über einen langen Zeitraum eines Halbjahres und über die gesamte Niederschlagsverteilung berechnet wird, so dass sich Fehler herausmitteln können) produziert das COSMO-CLM einen Trend hin zu höheren Niederschlagssummen im hydrologischen Winterhalbjahr in der Zukunft in der Größenordnung um etwa 10 %.

- **Trockenperiodenlänge im hydrologischen Sommerhalbjahr**

Die projizierten Anstiege der maximalen Trockenperiodenlänge sind in allen vier Gebieten und beiden Projektionsperioden zweistellig positiv – von 19 bis 36 %, so dass auch hier klar ein Trend zu erkennen ist.

- **Maximale Niederschlagssummen im hydr. Winterhalbjahr**

Die maximalen Niederschlagssummen im hydrologischen Winterhalbjahr

steigen durchgehend in allen Gebieten an, hier finden sich auch die meisten signifikanten Änderungen im Vergleich zu den anderen Kennwerten.

- **Minimale Niederschlagssummen**

auch für die minimalen Niederschlagssummen (sowohl im hydrologischen Winter- als auch im Sommerhalbjahr) sind die Änderungen nicht signifikant. Im Winterhalbjahr zeigen sich jedoch durchgängig ohne Ausnahme Anstiege, die größtenteils im zweistelligen Prozentbereich liegen. Im Sommerhalbjahr treten durchgängig Rückgänge auf, betragsmäßig etwas geringer als die Anstiege im Winterhalbjahr. Man muss also im Sommerhalbjahr mit trockeneren Zeiträumen als in der Referenzperiode rechnen, während das Winterhalbjahr tendenziell feuchter wird.

Obwohl also bei einigen Kennwerten klare Trends oder Tendenzen zu erkennen sind, unterscheiden sich diese zwischen Kontroll- und Projektionszeitraum nur selten signifikant voneinander. Dies ist zu einem großen Teil auf die bereits angesprochene hohe Variabilität von Niederschlägen in Kombination mit dem relativ kurzen Zeitraum der Projektionsperiode von 40 Jahren zurückzuführen. Das Änderungssignal geht für die nahe Zukunft noch in den natürlichen Schwankungen des Niederschlags unter (geringes Signal-Rausch-Verhältnis). Es steht aber zu vermuten, dass bei einem längeren betrachteten Zeitraum das Änderungssignal für spätere Perioden stärker wird und mehr Kennwerte signifikant von denen in der Kontrollperiode abweichen.