

Andreas Marx, Markus Mast, Richard Knoche und Harald Kunstmann

Globaler Klimawandel und regionale Auswirkungen auf den Wasserhaushalt Fallstudie Chiemgau-Inn-Salzach-Berchtesgadener Land

Vorspann

Regionale Klimasimulationen zeigen eine mögliche Klimaänderung im Raum Chiemgau-Inn-Salzach-Berchtesgadener Land auf. Danach ist bis zum Ende des Jahrhunderts eine mittlere Temperaturerhöhung von 3 °C bei einem leicht erhöhten zukünftigen Jahresniederschlag zu erwarten. Höhere Niederschlagsintensitäten führen zu einer größeren Hochwassergefahr sowohl bei den großflächigen als auch bei lokal beschränkten Ereignissen. Im Sommer wird eine Niederschlagsabnahme bis zu 30 % prognostiziert. Das Dürreerisiko steigt, da Trockenperioden zukünftig länger und intensiver ausfallen.

Andreas Marx, Markus Mast, Richard Knoche and Harald Kunstmann

Global Climate Change and Regional Impact on the Water Balance - Case Study in the German Alpine Area

Abstract

A quantification and possible effects of climate change on the water cycle for a German alpine and pre-alpine region have been performed using regional climate simulations. It showed out that temperature rises around 3 °C until the end of this century with a maximum in the mountainous area. Mean precipitation only slightly increases. The intensities of hourly precipitation events increase dramatically which involve more intense small scale flash flood events. Daily precipitation sums also rise in future times which causes mainly large scale flooding events. For the summer months June to August, a 30% reduction of precipitation was simulated. In combination with increasing temperatures, the total amount of usable water is expected to reduce. The risk of droughts also increases due to longer lasting and more intense dry periods.

1 Einleitung

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert im Rahmen des Programmes "klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen" anwendungsorientierte Projekte, um die Handlungs- und Wettbewerbsfähigkeit unter den Bedingungen des Klimawandels zu stärken. Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des klimazwei-Projektes „Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und ihre

Erschließung - Fallstudie Chiemgau-Inn-Salzach-Berchtesgadener Land (CISBL)“ durchgeführt. Ziel ist es, die regionalen Akteure aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft im Hinblick auf die Ziele Klimaschutz und -anpassung zu mobilisieren. Die bedarfsgerechte Vermittlung von Wissen, u. a. zum Klimawandel und seinen möglichen Folgen, ist ein zentraler Bestandteil des Projektes. In dieser Studie werden die Ergebnisse einer Klimasimulation für die Region und ihre mögliche Auswirkungen vorgestellt.

2 Der beobachtete Klimawandel

Der globale Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) lässt in seinem vierten Sachstandsbericht (AR4) [1] keinen Zweifel daran, dass sich das Klima seit dem Beginn der weltweiten Aufzeichnung der Temperaturen um 1850 umfassend verändert hat und dieser Klimawandel mit erheblichen ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen verbunden ist. Aus den Jahren 1995 bis 2006 gehören elf zu den zwölf wärmsten Jahren seit der instrumentellen Temperaturmessung. Der 100-jährige lineare Trend der globalen Mitteltemperatur beträgt 0,74 °C. Berücksichtigt man, dass seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor ca. 12 000 Jahren die globale Temperatur nur um ca. 4,5 °C gestiegen ist, so wird das Ausmaß der aktuellen Erwärmung deutlich. Es sollte nicht vergessen werden, dass der Klimawandel sich ebenfalls in einer Erhöhung des globalen Meeresspiegels, im Rückgang von Gebirgsgletschern und Schneebedeckung auf der Nordhemisphäre, in veränderten Niederschlagssummen und -intensitäten sowie sich ändernden Extremereignissen ausdrückt.

Die globalen Veränderungen vollziehen sich räumlich nicht homogen. So wurden regional bereits große Abweichungen zum globalen Klimatrend beobachtet. Im süddeutschen Raum und insbesondere im deutschen Alpenanteil hat sich das Klima stärker als im globalen Mittel verändert. Dabei ist die Temperatur in den letzten 140 Jahren um bis zu 2 °C, also doppelt so stark wie im globalen Mittel, angestiegen. Bei der jährlichen Niederschlagsmenge konnte in Süddeutschland keine signifikante Veränderung beobachtet werden. Eine saisonale Betrachtung zeigt jedoch eine Umverteilung der Niederschläge. Im Sommer wird ein Rückgang des Niederschlags beobachtet, während im Winter eine Zunahme festzustellen ist. Gleichzeitig ist die Anzahl und Intensität von meteorologischen Extremereignissen angestiegen. Dazu zählen z. B. die Starkniederschlagsereignisse der Jahre 1999, 2002 und 2005, die in unterschiedlichen Nordalpenregionen zu Hochwasserereignissen mit 100-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten geführt haben, aber auch Trockenperioden, wie im Sommer 2003, mit ihren weit reichenden Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft, Infrastruktur, Energieversorgung und Gesundheit.

3 Regionale Klimasimulationen

Es besteht kein Zweifel daran, dass sich das globale Klima auch in Zukunft weiter verändern wird. Das Ausmaß ist unter anderem von der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen abhängig. Je nach verwendetem Emissionsszenario erwärmt sich die untere Atmosphäre bis zum Ende dieses Jahrhunderts zwischen ca. 1,7 °C und mehr als 6 °C. Diese Daten sind mit globalen Klimamodellen simuliert worden. Sie liefern bei räumlichen Auflösungen in der Größenordnung von 10² km belastbare Aussagen über die großskaligen Prozesse in der Atmosphäre (z. B. Entwicklung von Druckgebilden). Lokale Effekte und regionale Besonderheiten, die beispielsweise durch die Höhenlage oder infolge von Luv- und Leeeffekten von Gebirgen auftreten, können mit dem relativ groben Modellgitter der globalen Modelle nicht dargestellt werden. Daher setzt man statistische oder dynamische Verfahren zur Erhöhung der räumlichen Auflösung ein, um die entsprechenden regionalen Muster erfassen zu können.

In der hier vorgestellten Studie wurden regionale Klimasimulationen basierend auf dem explizit-dynamischen Downscaling verwendet. Dabei simuliert das regionale Modell nur für einen Teilbereich der Erdoberfläche (z. B. Europa) den Ablauf des Wetters. An den seitlichen Rändern werden Informationen aus einem globalen Klimamodell übergeben. Innerhalb des Nests werden physikalisch basiert die Wettervorgänge berechnet. Am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen, wird ein solches mesoskaliges Modell der 5. Generation (MM5) [2] für Klimasimulationen in verschiedenen Gebieten der Welt, u. a. das Voltabecken in Westafrika [3] und im Nahen Osten mit den Jordan-Einzugsgebiet, eingesetzt. Im Deutschen Klimaforschungsprogramm (DEKLIM) wurde es angewendet, um regionale Klimasimulationen für Mitteleuropa zu erstellen. Das globale Klimamodell ECHAM4/T106 stellte über einen Zwischenschritt mit dem REMO-Modell die Antriebsdaten. Dabei wurde der anthropogene Einfluss durch das IPCC-Emissionsszenario B2 berücksichtigt, bei dem von einer kontinuierlich wachsenden Weltbevölkerung ausgegangen wird, die wiederum wirtschaftlichem Wachstum mit nachhaltigen, lokalen Lösungsansätzen entgegentritt. Das verwendete Szenario gehört zu den optimistischen Szenarien, die nur durch Anpassungs- und Vermeidungsanstrengungen erreicht werden können. Die regionalen MM5-Klimaszenarien in einer Auflösung von ungefähr 19 km lassen Rückschlüsse auf kleinräumige Auswirkungen der Klimaänderung zu. Bisher wurden Klimasimulationen wegen des hohen Rechen- und Speicheraufwandes für Zeitscheiben durchgeführt. Für Deutschland liegen eine Vergangenheitszeitscheibe 1960 bis 1989 und eine Zukunftszeitscheibe 2070 bis 2099 vor. Durch die Mittelung über 30 Jahre soll sichergestellt werden, dass die Varianz innerhalb der Vergleichszeiträume kleiner ist als das Änderungssignal.

Der Vergleich von Simulationen des Wetterablaufes der Vergangenheit mit Beobachtungsdaten ermöglicht die Abschätzung der Qualität der regionalen Klimasimulationen. Im Projekt QUIRCS (Quantifizierung von Ungenauigkeiten regionaler Klima- und Klimaänderungssimulationen) wurden

vier Klimamodelle, einschließlich des hier verwendeten MM5, mit Messdaten über den 15-jährigen Zeitraum 1979 bis 1993 verglichen [4]. Dieser Zeitraum eignet sich in besonderer Weise, da für Deutschland drei unterschiedliche flächenhafte Referenzdatensätze zur 2m-Temperatur und zum Niederschlag vorliegen. Im Vergleich zeigen die MM5-Simulationen hinsichtlich Temperatur- und Niederschlagsklimatologie eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten.

4 Regionale Klimaänderung im CISBL-Raum

4.1 Änderung der Temperatur und Einfluss auf die Vegetation

Der Vergleich von regionalen Klimasimulationsergebnissen der beiden Bezugszeiträume 1960-89 und 2070-99 ergibt für den gesamten Untersuchungsraum eine zukünftige Temperaturzunahme. Die mittlere Jahrestemperatur steigt um ungefähr 3 °C (**Bild 1**). Die maximale Erwärmung beträgt im Alpenbereich bis zu 3,4 °C, während sich der nördliche Teil des Untersuchungsraumes mit 2,8 °C weniger stark erwärmt. Damit setzt sich der beobachtete Trend der stärkeren Erwärmung im Alpenbereich fort. Bei einer jahreszeitlichen Differenzierung der Temperaturänderung ist eine zunehmende Erwärmung in allen Jahreszeiten feststellbar, wobei die maximale Erwärmung in allen Jahreszeiten im Alpenraum lokalisiert ist. Sie erreicht bis zu 4 °C im Frühling und bis zu 3,7 °C im Sommer.

Für die Bestimmung der Häufigkeitsverteilung der stündlichen Temperatur wurden Klassen mit einer Breite von 3 °C gebildet. Die Häufigkeitsverteilung gibt an, wie oft innerhalb der Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe Datenwerte in den gebildeten Klassen auftreten. Für Traunstein als repräsentativen Standort im Voralpenland zeigt sich eine Verschiebung des Mittelwertes hin zu höheren Werten (**Bild 2**). Frosttage mit einer Minimumtemperatur < 0 °C nehmen ab, während sich eine deutliche Zunahme der Sommertage mit Maximaltemperaturen $T_{\max} > 25$ °C erfolgt. Die Entwicklung der Sommertage ist neben agrarwirtschaftlicher auch von touristischer Bedeutung. Die Anzahl der Tropentage ($T_{\max} > 30$ °C) vergrößert sich in der Zukunftszeitscheibe und erreicht neue Hitzerekorde. Die maximale Zunahme der Tropentage beträgt 8 Tage/Jahr. Im hochalpinen Bereich der Kitzbüheler Alpen (**Bild 3**) fällt vor allem die starke Abnahme der Frostsituationen auf. Absolut nehmen die Frosttage um ca. 26 Tage in Waldkraiburg und bis zu 50 Tage im alpinen Bereich ab. Daneben zeigt sich eine bimodale Häufigkeitsverteilung der Stundentemperatur, die sich auch in den Tagestemperaturwerten für den Gitterpunkt findet. Zurückgeführt werden kann dies auf unterschiedliche Wetterlagenkonstellationen. Auch die Form der Häufigkeitsverteilung und das absolute Maximum verschieben sich in der Zukunft, was auf sich ändernde Wetterlagenhäufigkeiten hindeuten könnte.

Die thermische Vegetationsperiode wird als der Zeitraum, indem die Tagesmitteltemperatur höher als 5 °C liegt, definiert. Dabei werden pflanzenspezifische Anforderungen vernachlässigt. Vielmehr sind für die überwiegende Anzahl der Pflanzen in diesem Zeitraum Wachstum und damit land- und forstwirtschaftliche Erträge möglich. Veränderungen der Vegetationsperiode können

Veränderungen der Bewirtschaftung nach sich ziehen. Für die Jahre 1960 bis 1989 und 2070 bis 2099 wurde jeweils für alle Gitterpunkte der Beginn und die Länge der Vegetationsperiode bestimmt. Verbunden mit der gezeigten zukünftigen, ganzjährigen Temperaturzunahme verlängert sich die Vegetationsperiode um 25 Tage im Voralpenland und bis zu 50 Tagen im alpinen Bereich. Dabei verschiebt sich der Beginn der Vegetationsperiode im Norden im Mittel um 13 und im Süden um 27 Tage zum Winter hin. Grundsätzlich ist mit einer Verschiebung der Vegetationszonen hin zu höheren Standorten zu rechnen.

4.2 Änderung von Niederschlag und Trockenperioden

Höhere Temperaturen führen zu veränderten Wasserdampfkonzentrationen in der Atmosphäre. Wärmere Luft kann nach dem Clausius-Clapeyron-Gesetz mehr Wasserdampf halten und transportieren. Dies muss letztlich zu veränderten Niederschlagsmustern und -intensitäten auch in der CISBL-Region führen. Die prozentuale zukünftige Änderung des Jahresniederschlages ist in **Bild 4** dargestellt. Danach ist im gesamten Untersuchungsraum mit einer leichten Zunahme des Jahresniederschlages zu rechnen. Die Sommermonate Juni, Juli und August zeigen entgegen dem Jahresniederschlagstrend eine starke Niederschlagsabnahme im gesamten Untersuchungsgebiet, die sich in den Alpenraum hinein verstärkt (**Bild 5**).

Die Untersuchung der Niederschlagsintensitäten ist wichtig für die Abschätzung von Hochwasserrisiken. Dazu wurden aus den Klimasimulationen für die Zeiträume 1960 bis 1989 sowie 2070 bis 2099 Tages- und Stundenniederschläge aggregiert und anschließend in Häufigkeitsklassen eingeteilt. Alle Stundenniederschläge mit Intensitäten >2 mm nehmen zu. Außerdem zeigen sich neue, maximal 60 % höhere Niederschlagsintensitäten (**Bild 6**). Dies wird sich auch auf den Sedimenthaushalt im alpinen Geosystem auswirken. Insgesamt kann eine erhöhte Gefahr von kleinräumigen, durch Gewitterniederschläge ausgelösten Hochwasserereignissen abgeleitet werden. Die maximalen Intensitäten von 37 mm/h für die Vergangenheit erscheinen gering. Die meteorologischen Simulationen liefern jedoch auch bei der feinen Auflösung über eine Fläche von ungefähr 370 km^2 einen Stundenmittelwert. Daher sind kleinräumig (subgridskalig) höhere und extremere Niederschlagsintensitäten möglich. Bei den Tagesniederschlagsintensitäten (**Bild 7**) nehmen die Ereignisse aller Intensitätsklassen >12 mm/d zu, es treten jedoch keine neuen Maxima auf. Hieraus lässt sich ein erhöhtes großflächiges Hochwasserrisiko ableiten.

Der Effektive Trockenheitsindex (EDI) [5] ist ein Maß für den Trockenstress bei Pflanzen. Dabei werden Bodenfeuchte, Evapotranspiration sowie die zeitliche Entwicklung des Trockenstresses berücksichtigt. Dieser Index kann über beliebig lange Aggregationszeiträume gerechnet werden. Für Mitteleuropa wurde der sechswöchige EDI_{42} gewählt. Bei den Trockenereignissen ($\text{EDI} < 0$) ist zukünftig kein häufigeres Auftreten feststellbar, die Intensität der Ereignisse verstärkt sich jedoch. Sichtbar wird dies durch das Auftreten der Ereignisse mit sehr niedrigen EDI-Werten $< 2,5$ in der Zukunftszeitscheibe, die in der Vergangenheit nicht aufgetreten sind.

5 Auswirkungen der Klimaänderung und Ausblick

Die Veränderung von Temperatur und Niederschlag hat weit reichende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Die sommerliche Niederschlagsabnahme in Verbindung mit der Temperaturzunahme führt zu höheren Verdunstungsraten und damit zu weniger nutzbarem Wasser. Für Einzugsgebiete in tieferen Lagen bedingt die winterliche Erwärmung eine Schneeniederschlagsabnahme. Durch die fehlende Schneespeicherung und damit erhöhten direkten Oberflächenabfluss werden so winterliche Hochwasserereignisse möglich. Umgekehrt reduziert sich der Abfluss aus dem Schneespeicher im Frühjahr. Dies wird die Wasserverfügbarkeit trotz des leicht steigenden Jahresniederschlags bis in den Sommer hinein einschränken. Dem vermehrten Auftreten von Trocken- und Niedrigwasserperioden könnte in der Land- und Forstwirtschaft mit nachhaltigen Landnutzungsstrategien entgegengetreten werden, die eine vermehrte lokale Wasserspeicherung ermöglichen. Hier könnte gleichzeitig die zunehmende Gefahr von Hochwasserereignissen, die aus höheren Tages- und Stundenniederschlagsintensitäten bis zum Ende dieses Jahrhunderts abgeleitet werden kann, eingedämmt werden. Ein weiteres, wasserwirtschaftliches Anpassungsinstrument für den Hoch- und Niedrigwasserfall stellt der Bau von Talsperren und Rückhaltebecken dar. Dadurch wären bei der Energieerzeugung und im Infrastrukturbereich, etwa bei der Schiffbarkeit von Flüssen, weitere Synergieeffekte zu erwarten.

Um die Auswirkung der globalen Klimaänderung auf den Wasserhaushalt regionaler Einzugsgebiete genauer zu prognostizieren, können gekoppelte regionale Klima-Hydrologie Simulationen durchgeführt werden. Dies wurde bereits mit Klimadaten und dem flächendifferenzierten Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM [6] für das alpine Ammereinzugsgebiet in Südbayern durchgeführt [7]. Dabei hat sich gezeigt, dass sowohl häufigere Niedrigwasser- als auch häufigere Hochwassersituationen zu erwarten sind.

Trotzdem bleibt die Einschätzung des Einflusses der Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Einzugsgebieten eine große Herausforderung. Vor allem die Veränderung der Landoberfläche mit ihrem Einfluss auf die Abflussbildung und ihrer Retentionswirkung bedingen den Einsatz von Landnutzungsszenarien. Der Ansatz der gekoppelten Klima-Hydrologie-Simulation wird in den laufenden Arbeiten auf das Einzugsgebiet der Alz zwischen Kitzbühel im Süden und Burgkirchen im Norden übertragen. Durch die hoch aufgelösten Simulationen mit 500 m Kantenlänge im hydrologischen Modell sollen belastbare Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt in der CISBL-Region ermöglicht werden, auf deren Basis auch entsprechende Strategien für die Region entwickelt werden können.

Autoren

Dr. Andreas Marx
Dipl.-Ing. (FH) Markus Mast
Dr. Richard Knoche
Dr. Harald Kunstmann
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)
Kreuzeckbahnstr. 19
82467 Garmisch-Partenkirchen
andreas.marx@imk.fzk.de
markus.mast@imk.fzk.de
richard.Knoche@imk.fzk.de
harald.kunstmann@imk.fzk.de

Literatur

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (HRSG.): Climate Change 2007: The Scientific Basis. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Grell, G.; Dudhia, J.; Stauffer, D.: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994.
- [3] Jung, G.; Kunstmann, H.: High-Resolution Regional Climate Modelling for the Volta Basin of West Africa. In: Journal of Geophysical Research (2007), 112.
- [4] Kotlarski, S.; Block, A.; Böhm, U.; Jacob, D.; Keuler, K.; Knoche, R.; Rechid, D.; Walter, A.: Regional climate model simulations as input for hydrological applications: evaluation of uncertainties. In: Advances in Geosciences 5 (2005), S. 119-125.
- [5] Byun, H. R.; Wilhite, D. A.: Objective Quantification of Drought Severity and Duration. In: Journal of Climate 9 (1999), Nr. 12, S. 2747-2756.
- [6] Schulla, J.; Jasper, K.: Model Description WaSiM-ETH. Technischer Report, 2007.
- [7] Kunstmann, H.; Schneider, K.; Forkel, R.; Knoche, R.: Impact Analysis of Climate Change for an Alpine Catchment Using High Resolution Dynamic Downscaling of ECHAM 4 Time Slices. In: Hydrology and Earth System Sciences 6 (2004), Nr. 8, S. 1030-1044.

Verzeichnis der Bildunterschriften

Bild 1: Änderung der mittleren Temperatur zwischen den Bezugszeiträumen 1960 bis 1989 und 2070 bis 2099 in der CISBL-Region

- Bild 2: Häufigkeiten der stündlichen Temperatur in der Zukunfts- und Vergangenheitszeitscheibe am Gitterpunkt Traunstein im Alpenvorland
- Bild 3: Häufigkeiten der stündlichen Temperatur in der Zukunfts- und Vergangenheitszeitscheibe im hochalpinen Bereich der Kitzbüheler Alpen
- Bild 4: Prozentuale Zunahme des Jahresniederschlages für die Bezugszeiträume 1960 bis 1989 und 2070 bis 2099
- Bild 5: Prozentuale Abnahme des Sommerniederschlages (Juni bis August) für die Bezugszeiträume 1960 bis 1989 und 2070 bis 2099
- Bild 6: Änderung der Stundenniederschlagshäufigkeiten für das gesamte CISBL-Untersuchungsgebiet, Niederschlagsklassen >15 mm/h sind nicht äquidistant
- Bild 7: Änderung der Tagesniederschlagshäufigkeiten für das gesamte CISBL-Untersuchungsgebiet







