



zukunft
1909 - 2010
denken

Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich

Präsentation der aktuellen Studien



lebensministerium.at

Druck mit freundlicher Unterstützung des Lebensministeriums.

Impressum:

© 2010 by Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.

Alle Rechte vorbehalten.

Printed in Austria 2010.

Satz und Layout: Mag. Fritz Randl, ÖWAV, Wien.

Druck: RSA, Wien.

ISBN 978-3-902084-79-8

Es wird darauf hingewiesen, dass alle Angaben in diesem Seminarband trotz sorgfältigster Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen.

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der strengen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verbands unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Eigenverlag des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Wien.

Vorwort

Der Klimawandel stellt vor allem die Wasserwirtschaft vor interessante Fragestellungen, wobei konkrete Auswirkungen noch schwer vorhersagbar sind. Die Auswirkungen auf Österreich sind dabei besonders fordernd, da Österreich an den Grenzen der Nord-Süd- und West-Ost-Szenarien liegt, was eine Plausibilisierung der Modelle für den einzelnen Standort zusätzlich erschwert.

Die Antworten auf offene Fragen können oft noch nicht eindeutig gegeben werden, da hier gesamthafte Prozesse verstanden werden müssen, um die Auswirkungen abschätzen zu können.

Das ÖWAV-Seminar „Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich – Präsentation aktueller Studien“ und die vorliegende Publikation wollen daher nicht den Klimawandel an sich diskutieren, sie wollen harte von weichen Fakten trennen. Dazu werden die Grundlagen des Klimawandels und der Klimamodelle präsentiert und die aktuellen österreichischen Studien zu den Themen Wasserwirtschaft, Hydrologie, Naturgefahren und Energiewirtschaft vorgestellt.

Für den Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband als *die* Plattform für alle Belange der Wasserwirtschaft in Österreich ist es von großer Bedeutung, die kommenden Herausforderungen für die Wasserwirtschaft, die sich durch den Klimawandel ergeben, auch für die Bereiche der Verwaltung, der Universitäten und der Anlagenbetreiber greifbar zu machen.

Maßnahmen im Bereich der Wasserwirtschaft sind stets auf viele Jahre oder Jahrzehnte ausgelegt. Der Klimawandel verursacht nun aber eine zusätzliche Planungsunsicherheit. Da in der Planung aber das Ziel besteht, dass ein Hochwasserschutzdamm auch noch in 50 Jahren richtig dimensioniert ist, eine Abwasseranlage die vorgeschriebenen Grenzwerte einhält, eine Gemeinde mit ausreichend Trinkwasser versorgt ist und noch immer genug Strom produziert werden kann, um ein Kraftwerk wirtschaftlich zu betreiben, ist den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft hohe Priorität zuzuordnen.

Dieses Seminar ist ein weiterer Schritt, um die Information der Fachwelt über den Klimawandel zu intensivieren und die kommenden Herausforderungen in einer fachlichen Diskussion zu erörtern. Das Seminar wird nicht alle Fragen beantworten können, es wird einen Beitrag dazu leisten, den Klimawandel mit seinen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft besser zu verstehen und diese besser abschätzen zu können. An dieser Stelle sei allen Mitwirkenden, den Vortragenden dieses Seminars und besonders dem Leiter, Professor Nachtnebel, dem BMLFUW, den Bundesländern und Universitäten ein besonderer Dank ausgesprochen. Wir hoffen, dass die vorliegende Broschüre des ÖWAV für die Fachwelt von praktischem Wert und Nutzen ist.

DI Roland Hohenauer
Präsident des ÖWAV

Wien, 24. Juni 2010

Inhalt

Vorwort	1
<i>Roland Hohenauer</i>	
HISTALP-Langzeitklimareihen – Österreich-Newsletter 2009	5
<i>Reinhard Böhm und Manfred Ganekind</i>	
Klimamodelle und Klimaszenarien für Österreich	11
<i>Andreas Gobiet</i>	
Prognostizierte Klimaveränderungen in Österreich: Unsicherheiten und Bias	25
<i>Herbert Formayer</i>	
Veränderungen in hydrologischen Zeitreihen	35
<i>Reinhold Godina</i>	
Klimawandel und Gletscherschwund	49
<i>Michael Kuhn</i>	
Hydrologische Veränderungen in hochalpinen Einzugsgebieten	61
<i>Hubert Holzmann und Gernot Koboltschnig</i>	
Hydrologische Veränderungen und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz ..	73
<i>Bruno Schädler</i>	
Klimawandel im Alpenraum – Ergebnisse von GLOWA-Danube	89
<i>Wolfram Mauser und Monika Prasch</i>	
Beobachtete Veränderungen in der Wasserbilanz Österreichs	101
<i>Josef Fürst, Harald Kling, Hans Peter Nachtnebel und Thomas Hörhan</i>	
Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und Extremwerte	115
<i>Hans Peter Nachtnebel und Philipp Stanzel</i>	
Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft	129
<i>Wolfgang Schöner, Ingeborg Auer, Reinhard Böhm, Klaus Haslinger, Günter Blöschl, Alfred Paul Blaschke, Ralf Merz, Helmut Kroiß, Norbert Kreuzinger und Gregori Stanzer</i>	
Fischfauna und Klimaänderung	135
<i>Andreas Melcher, Florian Pletterbauer und Stefan Schmutz</i>	
Ein neues Risikotransfersystem für Naturgefahren in Österreich? Zur Beurteilung des vom Versicherungsverband vorgeschlagenen NatKat-Modells	145
<i>Franz Prettenhaler</i>	
Meteorologische Extremwerte: historisch und zukünftig	159
<i>Reinhold Steinacker</i>	
Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten	169
<i>Sven Fuchs</i>	
Konsequenzen des Klimawandels für das Ertragspotenzial und den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion	181
<i>Josef Eitzinger, Gerhard Kubu und Sabina Thaler</i>	
Wasserkrafterzeugung bei Klimaveränderungen	191
<i>Philipp Stanzel und Hans Peter Nachtnebel</i>	

HISTALP-Langzeitklimareihen – Österreich-Newsletter 2009

Reinhard Böhm und Manfred Ganekind

Für Österreich liegen nun die aktualisierten HISTALP-Langzeitklimareihen aktualisiert bis Dezember 2009 vor. HISTALP ist eine internationale Klimadatensammlung der ZAMG für den Großraum Alpen, die aus einigen hundert Zeitreihen von mehreren Klimaelementen besteht, die 100 bis 250 Jahre in die Vergangenheit zurückreichen und besonderen Qualitätskriterien unterworfen sind. Sie sind „homogenisiert“, das heißt, die älteren, historischen Zeitabschnitte sind nach Standort, Instrumentierung und anderen Kriterien an den aktuellen Zustand der Messstationen angepasst.

Eine Zusammenstellung der Zeitreihen-Diagramme bez. Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer für alle Regionen Österreichs ist zu finden unter: www.zamg.ac.at/aktuell/?ts=1264677961 Link zu „Österreich-Klimareihen 1768-2009.pdf“

Mehr über HISTALP auf www.zamg.ac.at/histalp.

2000 bis 2009 war die wärmste Dekade seit Beginn der Messungen, Jahresmittel-Temperatur 2009 entsprechend dem gegenwärtigen Erwärmungstrend

Im Jahr 2009 lag die Jahrestemperatur österreichweit im Tiefland um 1,5 °C über dem langjährigen Mittel 1901–2000, in der Gipfelregion um 1,1 °C. Sowohl im Tiefland als auch in der Gipfelregion Österreichs war die Jahrestemperatur 2009 damit im Bereich des gegenwärtigen Erwärmungstrends. In der 242-jährigen gesamtösterreichischen relativen Temperaturzeitreihe für das Tiefland liegt 2009 mit seiner positiven Abweichung der Jahrestemperatur vom langjährigen Mittel an 6. Stelle. Für die Gipfelregion Österreichs liegt immerhin seit 1851 eine Temperaturzeitreihe vor (159 Jahre), das Jahr 2009 belegt hier mit seiner positiven Temperaturabweichung vom Mittel 1901–2000 den 14. Platz.

Im Tiefland ist 2009 das 13. Jahr in Folge mit positiven Abweichungen der Temperatur, bezogen sowohl auf das Jahrhundertmittel als auch auf die letzte Klimanormalperiode 1961–1990. Mit –0,3 °C im Tiefland und –0,04 °C in den Bergen war 1996 das letzte Jahr mit unterdurchschnittlicher Mitteltemperatur.

Infolge der großen Ähnlichkeit der geglätteten Klimaentwicklung in ganz Österreich kann die geglättete Entwicklung der längeren Tieflandkurve als für ganz Österreich (auch für die Berge) repräsentativ angesehen werden.

Die WMO (World Meteorological Organization) hat eine vorläufige weltweite Temperatur-Auswertung für Jänner bis Oktober des Jahres 2009 erstellt. Sie listet das Jahr 2009 mit einer positiven Temperatur-Abweichung von ca. 0,4 °C vom Mittel 1961 bis 1990 an der 5. Stelle der 160-jährigen globalen Temperaturzeitreihe, die allerdings um rund 80 Jahre kürzer als die österreichische ist.

Die aktuelle Dekade 2000 bis 2009 gibt die WMO als die weltweit wärmste in den letzten dreißig Jahren an. *Abb. 2* zeigt einen Vergleich der globalen mittleren Abweichungen je Dekade (Daten

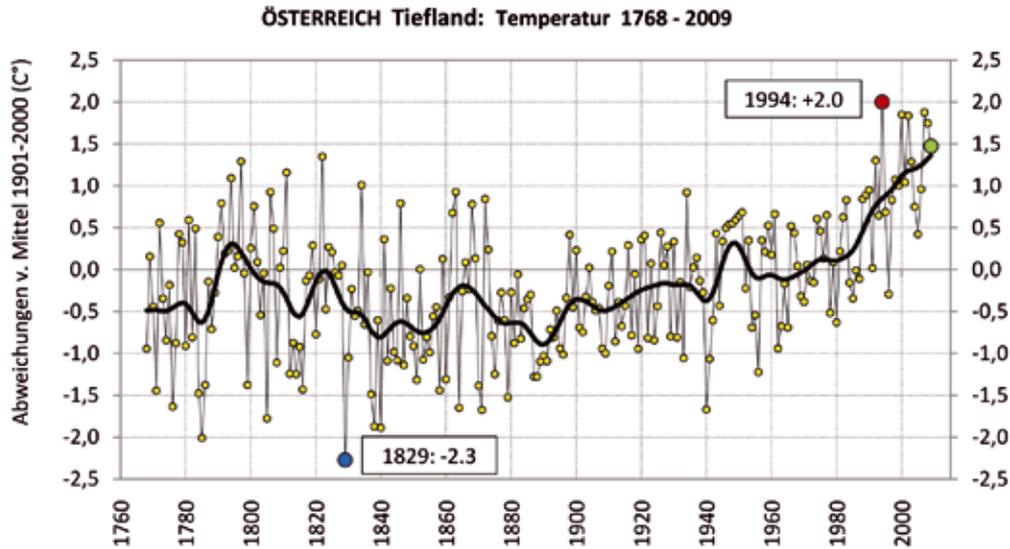


Abb. 1: Dünne Linie: Zeitserie der gesamtösterreichischen relativen Abweichung der Jahres-Temperaturmittel im Tiefland vom Mittel 1901–2000. Farbgebung der Punkte: grün – 2009, rot – 1994 (wärmstes Jahr), blau – 1829 (kältestes Jahr). Dicke schwarze Linie: 20-jährig geglätteter Trend.

der Climatic Research Unit der Universität Norwich, www.cru.uea.ac.uk) mit jenen für Österreich. In beiden Fällen lagen die aktuellen drei Dekadenmittel signifikant über dem langjährigen Durchschnitt. Die (längere) Österreichreihe zeigt nur noch eine weitere Dekade vor 200 Jahren, in der ebenfalls übernormale Temperaturen herrschten. Sowohl weltweit als in Österreich war die aktuelle Dekade die wärmste seit Beginn der Messungen.

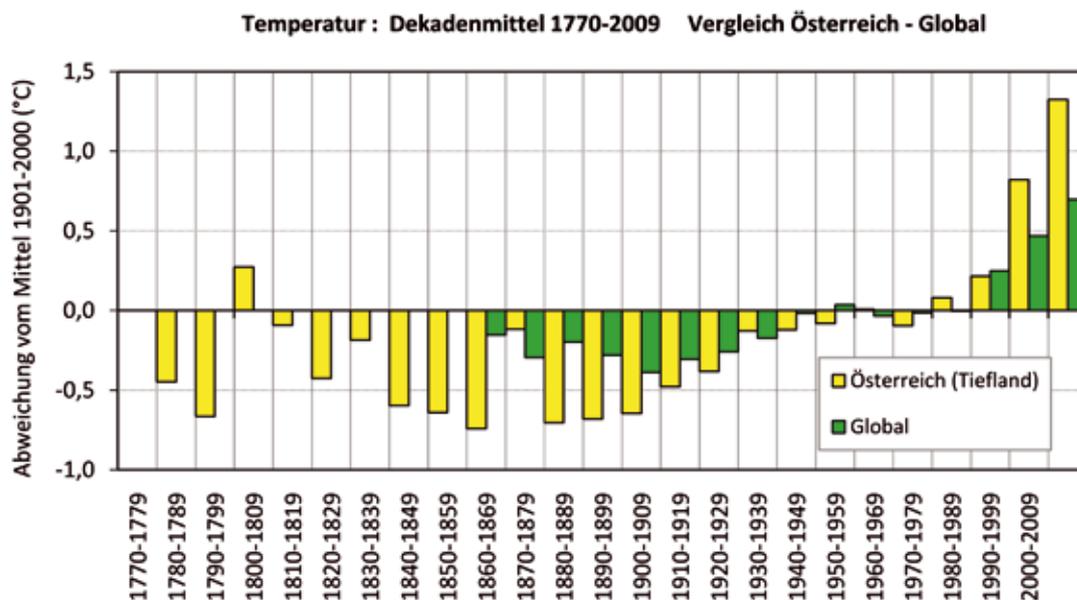


Abb. 2: Pro Dekade gemittelte Abweichungen der mittleren Jahrestemperaturen im österreichischen Tiefland und global, bezogen auf den Zeitraum 1901–2000. Datenquellen: Climatic Research Unit (global) und ZAMG (Österreich).

Trends innerhalb der Dekaden

Interessant ist, in Anlehnung an die kürzlich ausgebrochene Debatte um die aktuelle Stagnation der globalen Erwärmung, auch der Temperaturtrend innerhalb der jüngsten Dekade 2000 bis 2009: Während weltweit ein Temperaturanstieg von ca. 0,15 °C in dieser Dekade zu verzeichnen war, stieg die Mitteltemperatur im österreichischen Tiefland lediglich um weniger als 0,03 °C an. Die Auswertung zeigt, dass sich der Trend steigender Temperaturen in Österreich seit Ende der 1980er-Jahre und weltweit seit Ende der 1990er-Jahre tatsächlich abgeschwächt hat. Für die Jahre 2000 bis 2009 ist der globale Trend allerdings statistisch aussagekräftiger als jener für das österreichische Tiefland. Das einfache Maß der „trend-to-noise-ratio“ (TNR) setzt das Ausmaß des zehnjährigen Trends ins Verhältnis zur Schwankungsbreite der Temperaturen in den einzelnen Jahren, also zum „Lärm“ der Temperaturvariabilität von Jahr zu Jahr. Da die Streuung der jährlichen Mitteltemperaturen in Österreich den Trend des Temperaturanstiegs in dieser Dekade um ein Vielfaches übertroffen hat, fällt die TNR dermaßen gering aus, dass die aktuelle Verminderung des regionalen Temperaturtrends in Österreich noch zu kurz andauert, um vom Zufall unterscheidbar zu sein.

Niederschlag: Im Jahr 2009 sechsthöchste Niederschlagsmenge im Norden und Osten Österreichs seit Beginn der Messungen

Auch im Jahr 2009 traten die gewohnten regionalen Unterschiede bei den Niederschlagsmengen auf.

Im Norden und Osten Österreichs (grünes Diagramm in *Abb. 3*) reiht sich das Jahr 2009 mit 124 % der durchschnittlichen Niederschlagsmengen des langjährigen Mittels 1901–2000 an die 6. Stelle der dort 190-jährigen Zeitserie. Ursache dafür sind vor allem die ergiebigen Regenfälle während der Sommermonate.

Der im Norden und Osten Österreichs seit Anfang der 1980er Jahre wieder ansteigende Trend des regionalen Mittels der jährlichen Niederschlagsmengen setzt sich 2009 weiterhin fort. 2009 war die Menge des Jahresniederschlags in diesem Landesteil sogar deutlich höher als dieser langjährige Trend.

Im Südosten des Landes wiesen die letzten 3 Jahrzehnte überwiegend unterdurchschnittliche Niederschläge im Vergleich zum langjährigen Mittel auf. Das Jahr 2009 jedoch liegt hier mit 18 % – entgegen dem Trend – deutlich über dem Mittel 1901 bis 2000.

Im Westen Österreichs zeigten die Mengen des Jahresniederschlags in den letzten 4 Dekaden einen unklaren, oszillierenden Trend oberhalb des langjährigen Mittels mit leicht ansteigender Tendenz. Der Jahresniederschlag 2009 entspricht dem Niveau des langjährigen Mittels 1901–2000.

In den inneralpinen Tälern zeigt der Trend der Jahresniederschläge seit Anfang der 1970er-Jahre, ausgehend von einem im langfristigen Vergleich unterdurchschnittlichen Niveau, stetig leicht nach oben. 2009 übertrifft die Jahresmenge des Niederschlags diesen Trend und liegt um 9 % über dem langjährigen Mittel 1901 bis 2000.

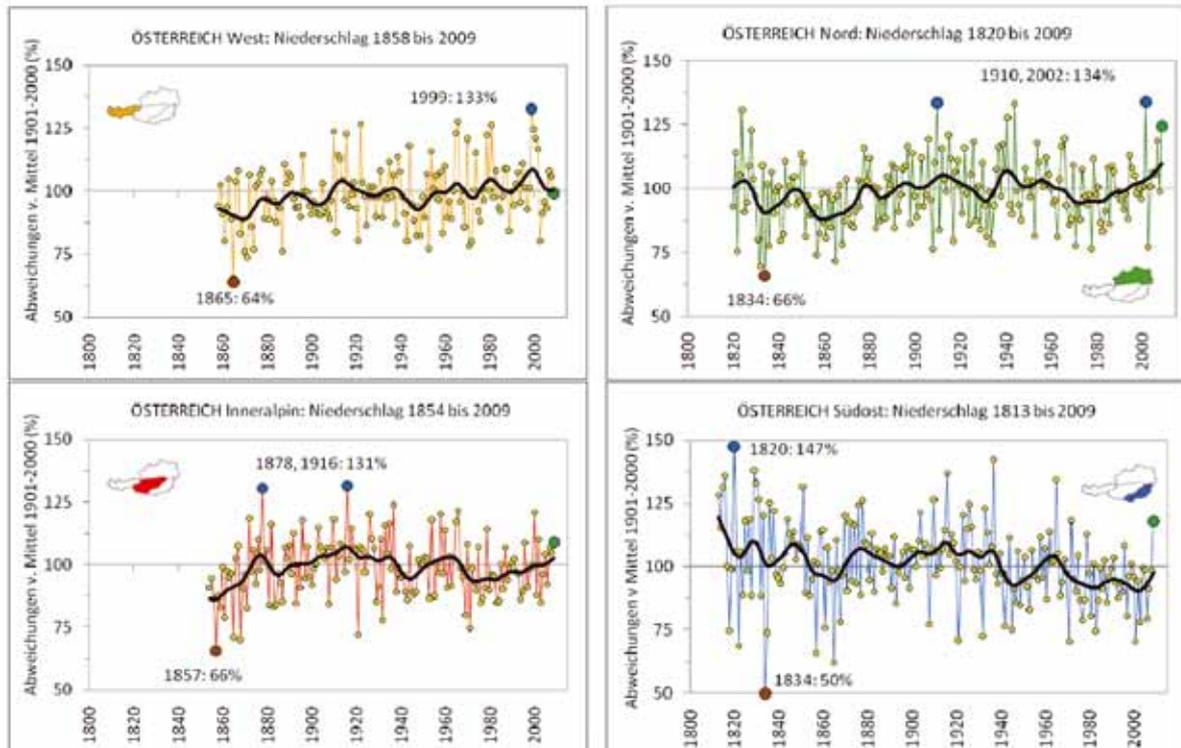


Abb. 3 Dünne Linie: Abweichung der jährlichen Niederschlagssummen für die vier Regionen des Bundesgebiets (West, Nord, Südost und Inneralpin) in Prozent vom Mittel 1901–2000. Farbgebung der Punkte: grün – 2009, rotbraun – trockenstes Jahr, blau – feuchtestes Jahr. Dicke schwarze Linie: 20-jährig geglätteter Trend.

Betrachtet man die Niederschlagsmengen für **einzelne Stationen**, erreichte das Jahr 2009 in einzelnen Fällen Spitzenplätze in den langjährigen Messreihen: Von den Langzeitstationen war die Station Graz-Universität besonders nahe an einem absoluten Rekord. Hier wurde mit 1205 Millimeter der zweithöchste Jahresniederschlag seit Beginn der Messungen im Jahr 1837 erreicht. An der Station Hohe Warte in Wien belegte das Jahr 2009 mit der Niederschlagssumme von 900 Millimetern immerhin noch den 4. Platz in der dort 169-jährigen Messreihe.

Sonnenschein: weiterhin viel Sonne in Österreich, aber kein neuer Rekord im Jahr 2009

In allen Regionen Österreichs lag die Sonnenscheindauer auch im Jahr 2009 deutlich über dem langjährigen Mittel 1901 bis 2000 und entsprach damit dem seit Anfang der 1980er-Jahre ansteigenden Trend.

Auch und besonders ausgeprägt ist der Trend zu mehr Sonnenschein (Schönwetter) in den österreichischen Bergen zu sehen (Abb. 4). 2009 verzeichnete – gemittelt über die sechs alpinen Gipfelobservatorien Österreichs – ein Plus von 9 % gegenüber dem langjährigen Mittel 1901–2000. Das aktuelle Jahr entspricht damit der Tendenz der geglätteten Trendkurve, ist aber weit entfernt von den Extremjahren 2003 (131 %) und 1910 (79 %).

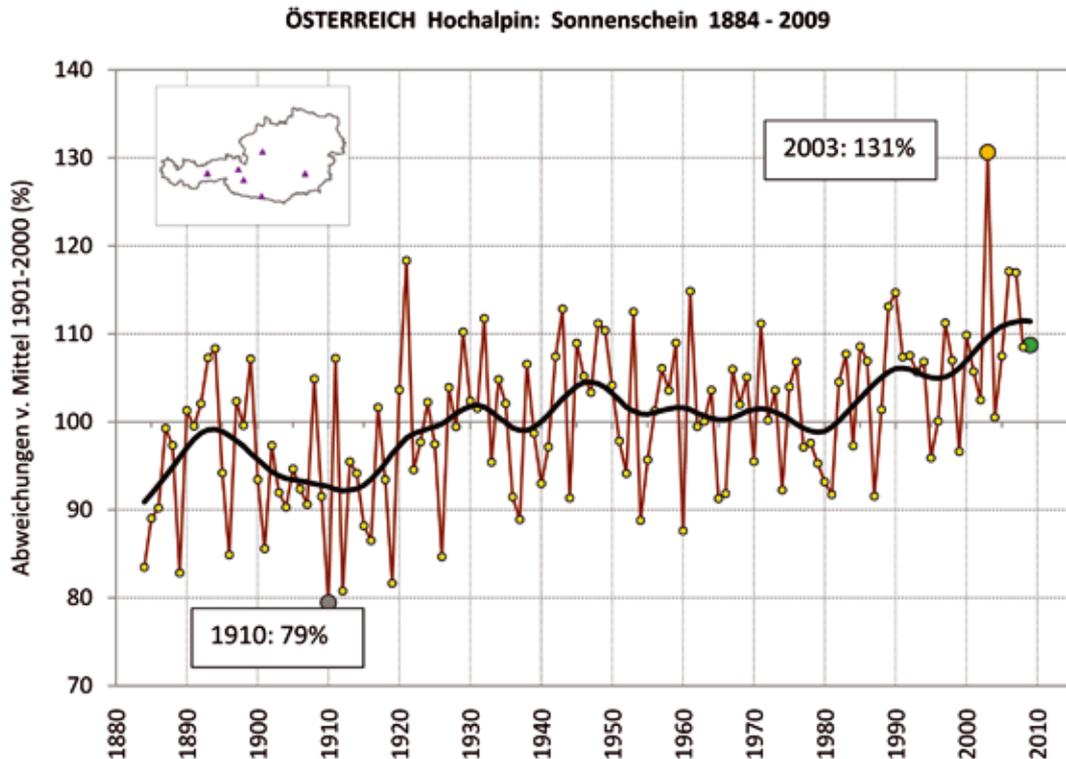


Abb. 4: Dünne Linie: Zeitserie der hochalpinen relativen Abweichung der Sommersonnenscheindauer vom Mittel 1901 bis 2000. Farbgebung der Punkte: grün – 2009, orange – 2003 (längste Sonnenscheindauer), grau – 1910 (kürzeste Sonnenscheindauer). Dicke schwarze Linie: 20-jährig geglätteter Trend.

Anschrift des Autors:

Dr. Reinhard Böhm
 DI Manfred Ganekind
 Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
 Abteilung für Klimaforschung
 Hohe Warte 38, 1190 Wien
 E-Mail: reinhard.boehm@zamg.ac.at

Klimamodelle und Klimaszenarien für Österreich

Andreas Gobiet

1 Einleitung

Das Klima der Erde ist ein komplexes System das durch Energieaufnahme aus dem Weltraum (Sonnenstrahlung, sichtbares Licht), Umverteilung der Energie durch alle Komponenten des Klimasystems (Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Pedosphäre) und Energieabgabe in den Weltraum (Wärmestrahlung der Erde, Infrarotstrahlung) charakterisiert ist. Der Mensch greift durch die Industrialisierung und die damit einhergehende Emission von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen in dieses Energiegleichgewicht ein, da Treibhausgase für die einfallende Sonnenstrahlung durchlässig sind, jedoch die von der Erde abgestrahlte Energie (Infrarotstrahlung) in der Erdatmosphäre zurückhalten. Seit etwa 250 Jahren ist die Änderung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten gesteuert und die CO₂ Konzentration nahm in diesem Zeitraum von etwa 280 auf 386 ppm im Jahr 2009 zu – eine dramatische Änderung die zumindest in den letzten 10.000 Jahren der Erdgeschichte beispiellos ist [Solomon *et al.*, 2007]. Die Auswirkungen des daraus resultierenden anthropogenen Treibhauseffekts sind mittlerweile gut dokumentiert: Die globale Durchschnittstemperatur ist in den letzten 100 Jahren um etwa 0.7 °C angestiegen wobei sich der Trend seit 1950 stark verstärkt (die letzten 25 Jahre trugen über 0.4 °C zum Trend der letzten 100 Jahre bei) und über den Kontinenten stärker ausgeprägt ist als über den Ozeanen (im Alpenraum hat die Temperatur im 20. Jahrhundert beispielsweise um 1.2 °C zugenommen [Auer *et al.*, 2007]). Auch in den Niederschlagsmustern und in der Häufigkeit und Intensität einiger extremer Wetterereignisse konnten Änderungen festgestellt werden [z. B., Alexander *et al.*, 2006; Schmidli und Frei, 2005], allerdings kann daraus nicht geschlossen werden, dass Extremereignisse generell und weltweit zunehmen.

Derartige Beobachtungen legen die Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Klimas der Erde und insbesondere nach den Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels auf die Gesellschaft nahe. Heutzutage werden die Grundlagen für derartige Untersuchungen (Klimaszenarien) mit komplexen Klimamodellen erarbeitet. Diese Modelle sind die in der Lage die wichtigsten physikalische Zusammenhänge des Klimasystems nachzubilden.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Methoden und Ergebnisse moderner Klimamodellierung wobei insbesondere auf Klimaszenarien für Europa, den Alpenraum und Österreich eingegangen wird. In *Abschnitt 2* wird auf die Funktionsweise von Klimamodellen und deren Regionalisierung eingegangen, in *Abschnitt 3* werden aktuelle Klimaszenarien für den Alpenraum vorgestellt und in *Abschnitt 4* wird nach einer kurzen Zusammenfassung ein Ausblick auf aktuelle Entwicklungen in der Klimamodellierung gegeben.

2 Globale Klimamodelle, Unsicherheiten und Regionalisierung

2.1 Globale Klimamodelle

Die Modellierung globaler Aspekte des Klimas mit „general circulation models“ (GCMs) hat ihre Anfänge in den 1970er-Jahren und gewinnt seit den 1990er-Jahren im zunehmenden Maß an

Aussagekraft, da mittlerweile nicht nur reine Modellergebnisse, sondern auch Bewertungen ihrer Qualität [z. B., *Reichler und Kim*, 2008] und ihrer Robustheit, bzw. Unsicherheit vorliegen [z. B. *Solomon et al.*, 2007].

Klimamodelle sind Computerprogramme welche die Atmosphäre, Ozeane und den Boden in Kästchen unterteilen (typischerweise beträgt die Seitenlänge dieser Kästchen etwa 100 km) und in jedem dieser Kästchen den physikalischen Zustand und den Massen- und Energieaustausch mit den benachbarten Kästchen anhand physikalischer Gleichungen berechnen (in der Atmosphäre eine vereinfachte Form der Navier-Stokes Gleichungen). Die dynamische Natur dieser Gleichungen ermöglicht es nicht nur den Zustand des Klimasystems zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern auch seine zeitliche Entwicklung zu berechnen. Zusätzlich werden Klimaprozesse welche nicht durch die genannten physikalischen Gleichungen beschrieben werden können, oder sich auf zu kleinen räumlichen Skalen abspielen, um durch das grobe Modellgitter darstellbar zu sein durch Parametrisierungen (semi-empirische vereinfachte Beschreibungen der Prozesse) in das Klimamodell integriert. Dazu gehören beispielsweise turbulente Prozesse in der atmosphärischen Grenzschicht, konvektive Niederschläge, Wolkenprozesse, und Strahlungstransfer. Weiters sind Klimamodelle heutzutage mit einer Vielzahl von Komponenten wie etwa Ozeanmodellen, Meer-Eismodellen oder Bodenmodellen gekoppelt, welcher der Tatsache Rechnung tragen, dass das Klimasystem nicht ausschließlich aus der Atmosphäre der Erde besteht, sondern durch eine komplexe Wechselwirkung zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre und Biosphäre charakterisiert wird.

Klimamodell vs. Wettermodell

Die Funktionsweise von Klimamodellen ist der von Wettermodellen sehr ähnlich. Im Unterschied zu Wettermodellen berechnen Klimamodelle aber den Zustand des Klimasystems über viele Jahrzehnte hinweg, was zu wichtigen Einschränkungen bei der Interpretation ihrer Ergebnisse führt. Es ist bekannt, dass Wettermodelle das Wetter nur für einige Tage in die Zukunft sinnvoll vorher-sagen können, nach dieser Zeitspanne aber großteils Zufallsprodukte liefern. Mit anderen Worten ausgedrückt: Ein Wettermodell hat nach ein paar simulierten Tagen nur mehr sehr wenig mit dem „echten“ Wetter zu tun. Die Ursache dieses Verhaltens liegt in chaotischen Komponenten des Wetter- und Klimasystems begründet, welche nach relativ kurzer Zeit über die deterministischen Anteile überwiegen. Für die Ergebnisse von Klimamodellen folgt daraus, dass das modellierte Wetter an einem bestimmten Tag weit in der Zukunft keineswegs das tatsächliche Wetter dieses Tages beschreibt. Wetterprognosen für das Ende des 21. Jahrhunderts können selbst die besten Klimamodelle nicht erstellen. Allerdings ist das Klimasystem – und damit auch die Ergebnisse eines Klimamodells – nicht vollständig chaotisch. Im Gegenteil, viele langfristige Antriebskräfte des Klimasystems sind stark deterministisch oder zumindest über Jahrzehnte hinweg abschätzbar. Etwa ist die Bahn der Erde um die Sonne, welche bestimmt wie viel Sonnenenergie das Klimasystem zu welcher Jahreszeit zur Verfügung hat, sehr genau bekannt. Ebenfalls, wenn auch viel weniger genau, lässt sich die die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, welche direkten Einfluss auf die mittlere Oberflächentemperatur der Erde haben abschätzen.

Derartige Antriebskräfte bewirken, dass sich das an und für sich chaotische Wetter in gewissen Bandbreiten um einen mittleren Zustand abspielt – und genau dieser mittlere Zustand und die ihn einschließenden Bandbreiten von Klimasimulationen können interpretiert werden. Üblicherweise

werden hierzu Mittelwerte und Varianzen über lange Perioden (etwa 30 Jahre) berechnet oder langfristige Trends (wie etwa in der bodennahen Temperatur) analysiert.

Unsicherheiten

Die oben beschriebene „Bandbreite des Wetters“ wird oft auch die „interne Variabilität“ des Klimasystems genannt. Sie quantifiziert den Bereich der prinzipiellen Unvorhersagbarkeit des Klimasystems. Zusätzlich zu dieser fundamentalen Unschärfe, gibt es in Klimaszenarien noch weitere Unsicherheiten, die mit den Klimamodellen selbst oder mit Annahmen über die Antriebskräfte (etwa Treibhausgasemissionen) zusammenhängen. Die Erforschung und Quantifizierung dieser Unsicherheiten (*siehe dazu auch Abschnitt 3*) ist heute ein intensiv bearbeitetes Forschungsthema und ermöglicht es einzuschätzen wie viel Vertrauen wir zu Klimaszenarien haben sollen – ein wichtiges Thema, insbesondere wenn es um Entscheidungen über kostspielige Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels oder zur Anpassung an den Klimawandel geht.

2.2 Regionalisierung

Die Ergebnisse unterschiedlicher globaler Klimamodelle stimmen im globalen Mittel relativ gut überein, zeigen aber regional betrachtet oft große Unterschiede [Solomon, 2007]. Da regionale Klimacharakteristika stark von (aus der Sicht von GCMs) sub-skaligen Einflüssen wie komplexem Gelände, Landnutzung, Wasser-Land-Verteilung oder Schneebedeckung abhängen, sind GCMs, die typischerweise mit horizontalen Gitterpunktabständen von 100–300 km arbeiten, nur teilweise in der Lage, regionale und lokale Klimaänderungen zu beschreiben. Für weite Bereiche der Klimafolgenforschung (insbesondere in der Hydrologie) sind aber gerade die regionalen und lokalen Klimacharakteristika ausschlaggebend. Um diesem Defizit zu begegnen, wurden seit Beginn der 1990er-Jahre große Anstrengungen unternommen, globale Klimaszenarien mithilfe von dynamischen und/oder empirisch-statistischen Methoden zu verfeinern.

Regionale Klimamodelle

Dynamische Regionalisierungsmethoden basieren auf regionalen Klimamodellen („regional climate models“, RCMs), die in GCMs eingebettet werden. RCMs erstrecken sich über eine begrenzte Region (z. B. Europa) wodurch Rechenressourcen eingespart und in ein verfeinertes Modellgitter investiert werden können (typischerweise 50–10 km Gitterpunktabstand). RCMs werden an den Rändern mit Ergebnissen aus GCMs angetrieben und berechnen im Inneren des Modellgebiets den Zustand der Atmosphäre auf regionaler Skala neu. Sie sind also eigenständige dynamische Klimamodelle, die wie GCMs auf den Navier-Stokes-Gleichungen und physikalischen Parametrisierungen beruhen. Aufgrund ihrer feineren Auflösung können viele Prozesse, die in GCMs parametrisiert sind, in RCMs aber explizit berechnet werden. Historisch gesehen fand die Methode der Einbettung eines regionalen Modells in ein größeres globales Modell („Nesting“) schon seit einiger Zeit in der numerischen Wettervorhersage Anwendung, wurde aber ausschließlich für kurzfristige Wettervorhersagen angewendet. Ende der 1980er-Jahre wurden dann die ersten RCMs entwickelt. Pionierarbeit auf diesem Gebiet leisteten *Dickinson et al.* [1989] und *Giorgi* [1990], als die U.S.-Regierung in der Sierra Nevada einen geeigneten und über lange Zeiträume niederschlagsarmen Ort für die Endlagerung nuklearer Abfälle suchte. Es zeigte sich, dass regionale Effekte wie der Abschattungseffekt von Gebirgszügen, der für die Niederschlagshäufigkeit mitverantwortlich ist, in

globalen Modellen nicht auflösbar waren, aber durch das erste RCM (RegCM, 60 km horizontaler Gitterpunktabstand) gut beschrieben werden konnte. Heutzutage finden RCMs in verschiedensten Gebieten der Klimaforschung Anwendung, angefangen von der Erforschung des Paläoklimas, über saisonale Vorhersagen bis hin zur Analyse anthropogener Klimaänderung [Giorgi and Mearns, 1999; Wang et al., 2004; Rummukainen, 2010]. Besonders wichtig sind RCMs für Studien über die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Häufigkeit von Extremereignissen und auf sozioökonomisch relevante Sektoren wie Landwirtschaft, Wasserressourcenmanagement, Energieerzeugung und Tourismus. In ihrer räumlichen Auflösung sind die meisten RCMs auf horizontale Gitterpunktabstände von 10 km oder größer limitiert. Klimamodellierungen mit noch feinerer räumlicher Auflösung sind zwar möglich, benötigen aber derzeit noch zu große Computerressourcen und sind in ihrer Qualität noch nicht gut untersucht. Diesbezüglich ist eine weitere Entwicklung der Modelle nötig und im Gange.

Der große Vorteil von RCMs ist, dass regionale Klimaprozesse physikalisch konsistent beschrieben werden und somit auch tiefer gehend verstanden werden können. Weiters können RCMs direkt mit anderen prozessorientierten Modellen (etwa hydrologischen Modellen) gekoppelt werden. Allerdings ist die Methode sehr rechenintensiv, ein Problem, das aber durch die rasanten technischen Entwicklungen im Computerbereich etwas abgemildert wird.

Empirisch-statistische Regionalisierung

Die Methoden der empirisch-statistischen Regionalisierung beruhen auf der Annahme, dass regionale und lokale Klimateffekte vom großskaligen Zustand der Atmosphäre bestimmt sind. Mit Hilfe verschiedenster statistischer Modelle werden großskalige atmosphärische Felder („Prädiktoren“) aus historischen Simulationen mit GCMs mit lokalen Klimaparametern aus Messungen („Prädiktanden“) in Verbindung gebracht. Aufgrund der so statistisch etablierten Zusammenhänge kann in Folge aus mit GCMs erzeugten großskaligen Zukunftsszenarien der Prädiktand, d. h. eine simulierte zukünftige lokale Messung, abgeleitet werden. Statistische Regionalisierung wurde schon in der Anfangszeit der numerischen Wettervorhersage eingesetzt, um lokale Informationen aus den damals noch sehr groben Wettervorhersagemodellen zu gewinnen. Seit den 1990er-Jahren findet diese Methode auch in der Klimaforschung breite Anwendung. Es existieren zahlreiche geeignete Methoden wie kanonische Korrelationsanalyse, neuronale Netze, multiple lineare Regression, Verteilungsanpassungen, oder Skalierungsmethoden auf die hier nicht im Detail eingegangen wird. Übersichtsartikel zu diesem Thema wurden z. B. von Wilby und Wigley [1997], Zorita und von Storch [1997] und Murphy [2000] verfasst. Sehr detailliert beschreiben auch von Storch und Zwiers [2003] viele der statistischen Modelle. Ein wesentlicher Vorteil der empirisch-statistischen Regionalisierung liegt darin, dass sie in Bezug auf die benötigte Rechenleistung unaufwendig ist. Statistische Methoden sind sehr flexibel und können auf verschiedenste Klimaparameter, Regionen und Zeiträume angewendet werden. Weiters werden Szenarien erzeugt die für Nutzer aus der Klimafolgenforschung meist direkt anwendbar sind. Die prinzipielle theoretische Limitierung der Methode ist die implizite und nicht verifizierbare Annahme, dass statistische Zusammenhänge zwischen Prädiktor und Prädiktand unter geänderten Klimabedingungen unverändert bleiben. Eine zusätzliche Erschwernis ist die Notwendigkeit der Existenz langer Datenreihen, was in vielen Gebieten der Erde nicht gewährleistet ist.

Heutzutage werden die empirisch-statistischen Methoden vermehrt dazu eingesetzt, um Ergebnisse regionaler Klimamodelle nachzubehandeln [z. B., *Thiemeßl et al.*, 2010]. In diesem Fall ist das Erreichen einer feineren räumlichen Auflösung sekundär und die Korrektur systematischer Modellfehler steht im Vordergrund.

2.3 Aktuelle Entwicklungen regionaler Klimamodellierung

Seit einigen Jahren hat sich der Schwerpunkt der Forschung im Bereich der regionalen Klimamodellierung von Amerika nach Europa verlagert. Mitverantwortlich dafür sind die EU-Projekte PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects, prudence.dmi.dk) und ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org), die sich zum Ziel gesetzt haben, Ensembles hoch aufgelöster Klimaszenarien für Europa zu erzeugen, ihre Zuverlässigkeit zu analysieren und ihre Anwendbarkeit in der Klimafolgenforschung zu demonstrieren. In den USA wird derzeit ein ähnliches Projekt durchgeführt (NARCCAP, www.narccap.ucar.edu), welches sich stark an PRUDENCE orientiert. Weiters laufen in Europa einige Projekte, die aufbauend auf PRUDENCE und ENSEMBLES spezifische Regionen detaillierter untersuchen und einen starken Schwerpunkt in der Anwendung der regionalen Klimaszenarien in der Klimafolgenforschung haben. Die Projekte CLAVIER (www.clavier-eu.org) und CECILIA (www.cecilia-eu.org) haben beispielsweise das Ziel, regionale Klimaszenarien für Zentral- und Osteuropa zu verbessern und die Auswirkungen des Klimawandels in diesen Regionen zu untersuchen. Das Projekt CIRCE (www.circeproject.eu) widmet sich ähnlichen Aufgaben in der Mittelmeerregion, und im Projekt ACQWA (www.acqwa.ch) werden Klimaszenarien für den Alpenraum verbessert und ihre Auswirkungen auf die Qualität und Quantität von Wasser untersucht.

In Österreich wurden die Möglichkeiten der regionalen Klimamodellierung und ihrer Anwendbarkeit auf den Alpenraum seit Mitte 2003 in den Projekten reclip:more und reclip:century untersucht und hochaufgelöste Klimaszenarien für den Alpenraum erstellt (foresight.ait.ac.at/reclip). Hier wird die regionale Klimamodellierung, induziert durch das komplexe Untersuchungsgebiet, an die Grenzen der lokalen Skala vorangetrieben (in PRUDENCE und ENSEMBLES wird mit 50 km bzw. 25 km Gitterpunktabstand gearbeitet, in reclip:century werden die Modelle mit 10 km Gitterpunktabstand betrieben), was vor allem für die Untersuchung der hydrologischen Gegebenheiten kleiner Gebiete wesentlich ist. Die Ergebnisse des Projektes reclip:more sind mittlerweile verfügbar und werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Anfang 2011 werden voraussichtlich die Ergebnisse von reclip:century verfügbar sein, womit dann durchgängige Klimaszenarien von 1961 bis 2050 (später bis 2100 erweitert) in hoher räumlicher Auflösung zur Verfügung stehen werden und fundierte Abschätzungen der Verlässlichkeit der Szenarien möglich werden. Diese Szenarien werden eine solide Grundlage für die Klimafolgenforschung der nächsten Generation in Österreich liefern.

3 Aktuelle Klimaszenarien für Österreich und deren Unsicherheit

3.1 PRUDENCE

Eine erste Einschätzung der bis zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100 verglichen mit 1961–1990) zu erwartenden Klimaänderungen im Alpenraum kann aus den Ergebnissen des Projekts PRUDENCE abgeleitet werden [*Christensen and Christensen*, 2007].

Temperatur

In Europa wird ein genereller Temperaturanstieg erwartet, welcher im Winter einen West-Ost-Gradienten (geringere Erwärmung im vom Atlantik beeinflussten Westen Europas) und im Sommer Nord-Süd-Gradienten aufweist (verstärkte Erwärmung im Mittelmeerraum). Im Alpenraum ist die Erwärmung im Winter (+3.5 °C, 0.32 °C pro Jahrzehnt) und im Frühling (+3.3 °C, 0.3 °C pro Jahrzehnt) schwächer ausgeprägt als im Sommer (+5.0 °C, 0.45 °C pro Jahrzehnt) und Herbst (+4.2 °C, 0.38 °C pro Jahrzehnt). Diese Ergebnisse sind aus einem Ensemble von 16 Klimasimulationen abgeleitet, wodurch eine grobe Abschätzung der Unsicherheiten möglich ist. Nimmt man an, dass das Modellensemble den Unsicherheitsbereich abdeckt, ergibt sich ein 99%-Konfidenzintervall von etwa ± 1 °C (im Winter weniger) [Déqué et al., 2007]. Die Ergebnisse für die zu erwartende Temperaturänderung im Alpenraum von 3.3 °C bis 5.0 °C sind also als hoch signifikant anzusehen.

Niederschlag

Das Muster der simulierten Niederschlagsänderung über Europa ist weit inhomogener als das Temperaturänderungsmuster. Es zeigt sich ein starker Nord-Süd-Gradient mit abnehmenden Niederschlägen im Süden und zunehmenden Niederschlägen im Norden. Die Null-Linie wandert saisonal von der nördlichen Mittelmeerküste bzw. dem Alpenraum im Winter nach Nordeuropa im Sommer. Im Alpenraum werden Änderungen von +20 % im Winter, 0 % im Frühling, -26 % im Sommer und -7 % im Herbst erwartet. Die dazugehörigen 99%-Konfidenzintervalle reichen von 0.01 mm/Tag bis 0.69 mm/Tag im Winter und von -0.27 mm/Tag bis -1.21 mm/Tag im Sommer. Obwohl die Unsicherheiten der Niederschlagszenarien wesentlich größer als die der Temperaturszenarien sind, ist also zumindest das Vorzeichen der Niederschlagsänderung im Alpenraum signifikant, wobei die Signifikanz der Niederschlagsabnahme im Sommer deutlicher ausgeprägt ist als die Zunahme im Winter.

3.2 ENSEMBLES

Im Vergleich zum Projekt PRUDENCE haben die kürzlich veröffentlichten Ergebnisse von ENSEMBLES den Vorteil, dass sie durchgehende Szenarien von 1950 bis 2050 beinhalten, dass sie bereits in höherer räumlicher Auflösung gerechnet wurden (25 km statt 50 km Gitterweite) und dass ein besser strukturiertes Ensemble von Simulationen zur Verfügung steht. Der letzte Punkt ist vor allem in Hinblick auf die Abschätzung von Unsicherheiten wichtig. Derzeit liegen noch keine detaillierten Unsicherheitsanalysen für Österreich vor, allerdings ermöglicht das große Ensemble an Simulationen durch die Bildung von Mittelwerten ein robusteres Ergebnis als es bei der Analyse von Einzelsimulationen zu erwarten ist.

Abb. 1 und 2 zeigen die mittleren Temperatur- und Niederschlagsänderungen zwischen 1961–1990 und 2021–2050 aller (17) ENSEMBLES-Simulationen. Alle Simulationen beruhen auf dem Emissionsszenario A1B. Diese Einschränkung ist von relativ geringer Bedeutung, da sich Unterschiede in den Treibhausgaskonzentrationen erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark auswirken.

Je nach Saison ist eine Temperaturänderung von 1.2 °C bis 1.7 °C (0.2 °C bis 0.28 °C pro Jahrzehnt) zu erwarten. In der Niederschlagsänderung ist ein bi-polares Nord-Süd-Muster zu erkennen, mit zunehmenden Niederschlägen im Norden (vornehmlich im Winter) und abnehmenden

Niederschlägen im Süden (vornehmlich im Sommer und Herbst). Regional betragen die Änderungen etwa $\pm 10\%$.

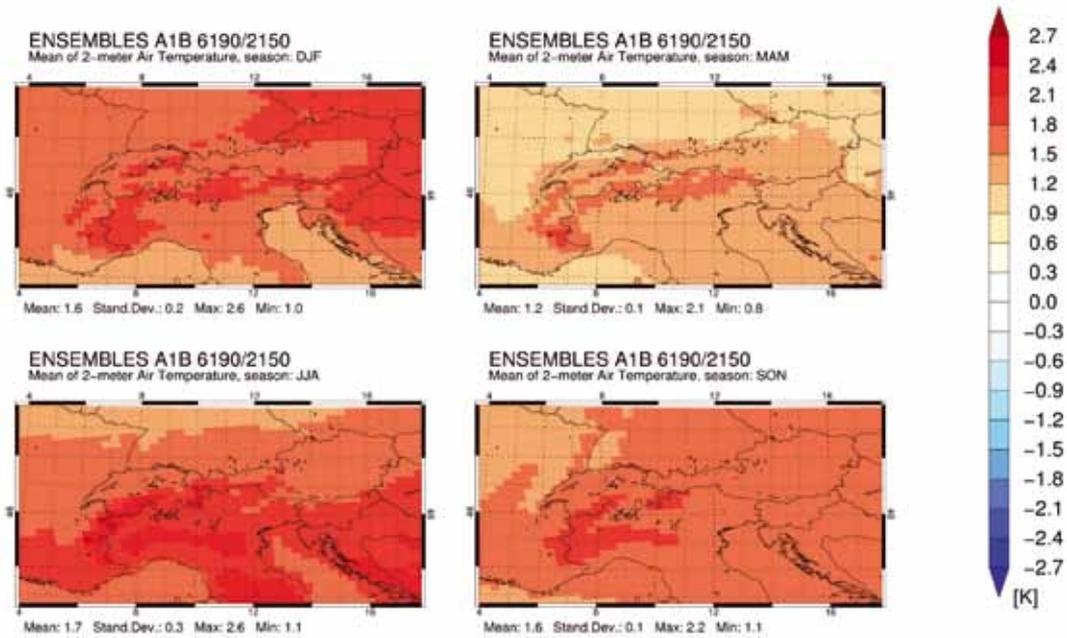


Abb. 1: Mittleres Temperaturszenario für 2021–2050 (Vergleichsperiode 1961–1990) aus dem ENSEMBLES-Projekt. Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November).

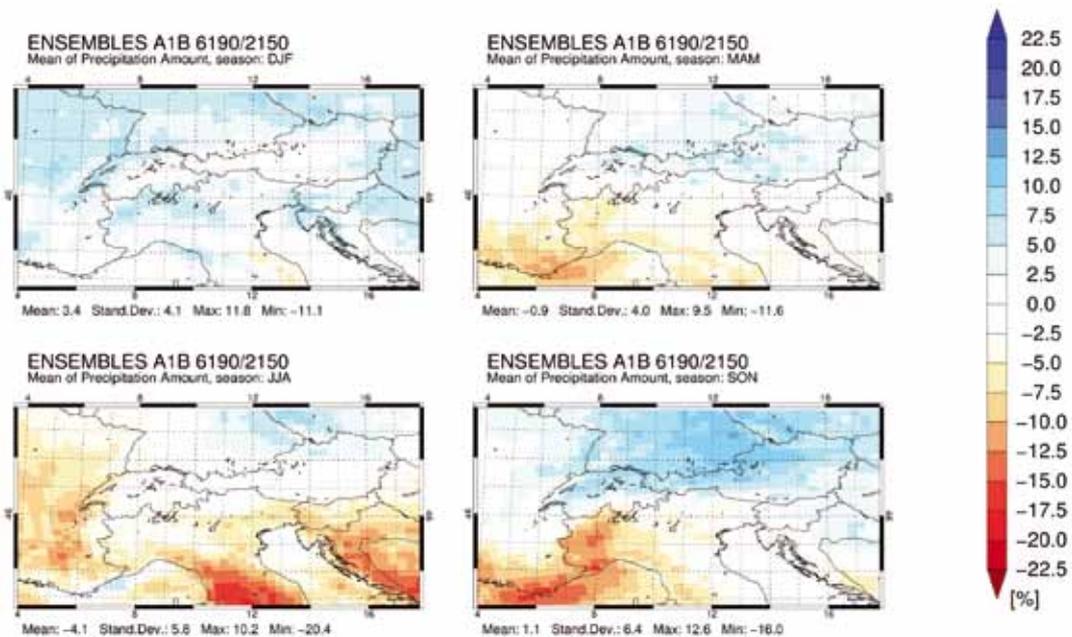


Abb. 2: Mittleres Niederschlagszenario für 2021–2050 (Vergleichsperiode 1961–1990) aus dem ENSEMBLES-Projekt. Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November).

Es ist anzumerken, dass diese Ergebnisse Aufgrund der Mittelwertbildung räumlich geglättet sind. Einzelne Simulationen weisen vor allem im Niederschlag stärkere räumliche Strukturen auf (*siehe auch Abschnitt 3.3*). Allerdings ist die Aussagekraft kleiner räumlicher Strukturen die in unterschiedliche Modellen inkonsistent sind gering.

3.3 reclip:more und reclip:century

Da die Alpen eine Klimascheide darstellen, welche unterschiedliche klimatische Bedingungen in nahe gelegenen Regionen verursacht, kann erwartet werden, dass auch der Klimawandel in dieser Region räumlich sehr inhomogen verläuft und sich in kleineren Unterregionen des Alpenraums anders verhält als der mittlere Klimawandel im gesamten Alpenraum. Regionale Niederschlags-szenarien welche in der Lage sind kleine Subregionen des Alpenraums zu differenzieren, bedürfen einer feineren räumliche Auflösung als die PRUDENCE- und ENSEMBLES-Simulationen (Gitterpunkt-Abstand 50 km, bzw. 25 km, das entspricht einer effektiven Auflösung von mindestens 200 km bzw. 100 km). Ein erster Schritt in diese Richtung wurde im österreichischen Projekt reclip:more getan (*siehe auch Abschnitt 2.3*). Anders als in PRUDENCE zielt reclip:more auf die Mitte des 21. Jahrhunderts (2041–2050, Vergleichszeitraum 1981–1990) und beschäftigt sich nur mit dem Europäischen Alpenraum, allerdings in größerem Detail (Gitterpunkt-Abstand 10 km). Die zusammengefassten Ergebnisse des Projekts reclip:more können im Bericht von *Loibl et al.* [2007] und einige detailliertere Ergebnisse in *Gobiet et al.* [2006] nachgelesen werden. Die folgenden Ergebnisse sind dem Bericht von *Gobiet et al.* [2006] entnommen.

Temperatur

Für die Temperaturänderung im Alpenraum bis in die 2040er-Jahre (verglichen mit den 1980er-Jahren) (*siehe Abb. 3*) ergibt sich +1.9 °C (+0.32 °C pro Jahrzehnt) im Winter, +2.2 °C (+0.37 °C pro Jahrzehnt) im Frühling, +2.3 °C (+0.38 °C pro Jahrzehnt) im Sommer und +2.7 °C (+0.45 °C pro Jahrzehnt) im Herbst.

Die räumlichen Muster der Temperaturänderung sind nicht sehr stark ausgeprägt, zeigen aber einen größeren Temperaturtrend mit zunehmender Seehöhe, was auf Rückkopplungsprozesse zwischen Schneebedeckung und bodennaher Temperatur zurückzuführen sein dürfte. Da im Projekt reclip:more nur drei regionale Simulationen durchgeführt wurden die alle auf derselben globalen Simulation beruhen, ist die Abschätzung der Unsicherheiten nur sehr grob möglich. Der Vergleich der drei regionalen Simulationen zeigt eine Spannweite des Temperaturänderungssignals von etwa ± 0.25 °C (je nach Saison etwas unterschiedlich). *Déqué et al.* [2007] hat abgeschätzt, dass die Unsicherheit regionaler Simulationen im Alpenraum etwa 20–25 % der Gesamtunsicherheit beträgt. Interpretiert man die oben angegebene Spannweite als Maß für die Unsicherheit der regionalen Simulation ergibt sich also eine Gesamtunsicherheit der reclip:more Szenarien von etwa ± 1.25 °C ($\pm 0,21$ °C pro Jahrzehnt). Der positive Temperaturtrend ist also als signifikant einzuschätzen.

Die reclip:more Ergebnisse stimmen qualitativ und quantitativ gut mit den größeren PRUDENCE-Ergebnissen überein, sind allerdings um etwa 0.14 °C pro Jahrzehnt höher als die Mittelwerte aus dem ENSEMBLES-Projekt. Im Rahmen der soeben diskutierten Abschätzung der Unsicherheiten stimmen die Temperatur-Ergebnisse aller drei hier beschriebenen Projekte überein.

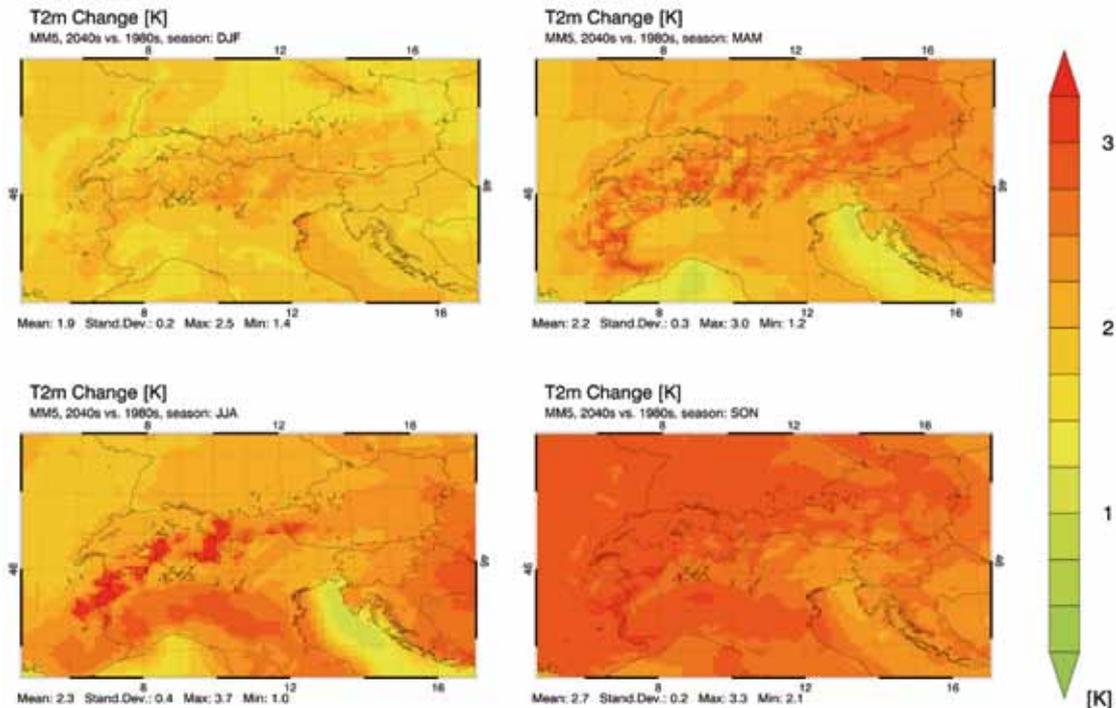


Abb. 3: Temperaturszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November).

Niederschlag

Die zu erwartenden Niederschlagsänderungen im Alpenraum (siehe Abb. 4) betragen im Winter +8.5 % (+0.2 mm/Tag), im Frühling +1.4 % (0.0 mm/Tag), im Sommer –12.2 % (–0.3 mm/Tag) und im Herbst –13.8 % (–0.5 mm/Tag).

Die Spannweite der drei reclip:more Simulationen beträgt je nach Saison maximal ± 5 %. Laut Déqué et al. [2007] trägt das regionale Klimamodell im Alpenraum 30–50 % zur Gesamtunsicherheit bei woraus sich eine Gesamtunsicherheit von ± 10 % bis ± 15 % ergibt. Diese Abschätzung zeigt, dass die Klimaänderungssignale des Niederschlags im Alpenraum nur teilweise als signifikant zu betrachten sind. Weiters ist zu betonen, dass die hier durchgeführte Abschätzung der Unsicherheiten einen sehr vorläufigen Charakter hat und ihre Bestätigung abzuwerten bleibt.

Da sich die reclip:more Werte auf die Mitte des 21. Jahrhunderts beziehen sind sie nicht direkt mit den PRUDENCE-Ergebnissen vergleichbar, weisen aber ähnliche Grundcharakteristiken auf: Zunehmende Niederschläge im Winter und abnehmende Niederschläge im Sommer südlich der Alpen. Auch die Ergebnisse des Projekts ENSEMBLES weisen qualitativ vergleichbare Charakteristika auf und sind in Hinblick auf die diskutierten Unsicherheiten als konsistent zu bezeichnen.

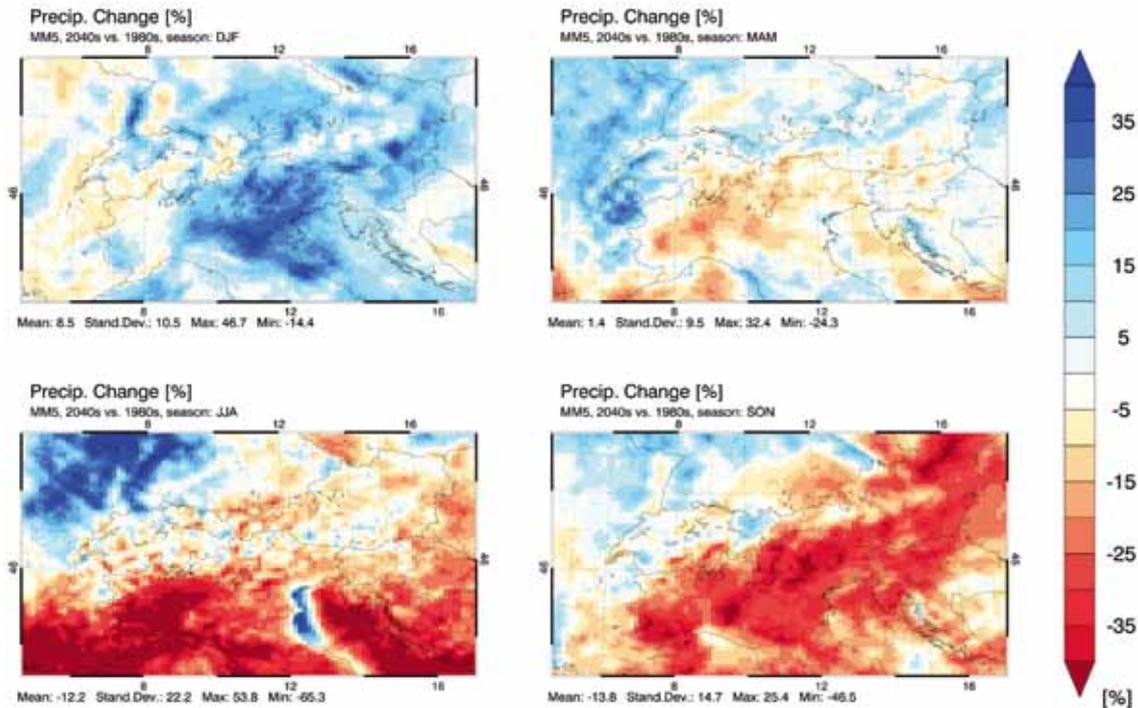


Abb. 4: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November).

Gerade die Niederschlagsänderung zeigt auch innerhalb des Alpenraums starke regionale Unterschiede: In allen Saisonen, außer im Winter, ist der Alpenhauptkamm als deutliche Trennlinie zwischen zunehmenden Niederschlägen im Norden und abnehmenden Niederschlägen im Süden zu erkennen, was die Aussagekraft der mittleren Niederschlagsänderungen des gesamten Alpenraums stark einschränkt (positive und negative Änderungen heben sich auf). Der Vorteil der reclip:more Szenarien besteht darin, dass erstmals auch Subregionen rund um den Alpenhauptkamm analysiert werden können. Abb. 5 zeigt die Niederschlagsänderungen in klimatologisch motivierten Subregionen. Je nach Saison und Subregion ergeben sich Änderungen von bis zu 30 %.

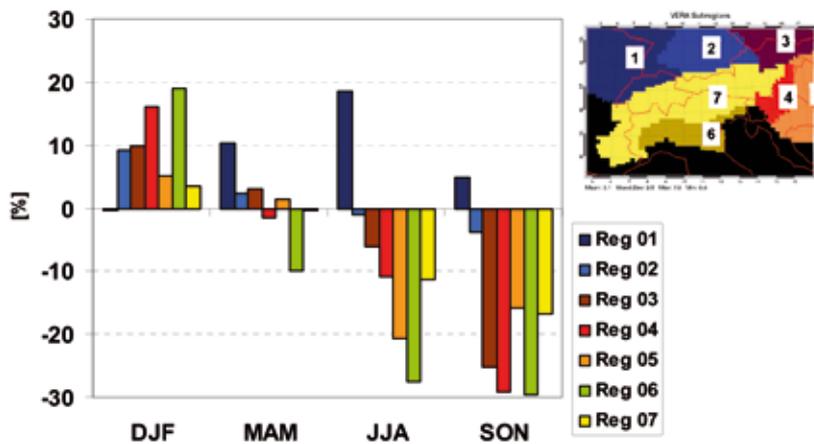


Abb. 5: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990) in Subregionen des Alpenraums. Die Ergebnisse sind in % angegeben.

Die Unsicherheit derart kleinregionaler Klimaänderungssignale ist derzeit noch schwer einzuschätzen und unterschiedliche Simulationen zeigen gerade in Hinblick auf kleinregionale Niederschlagsänderungen manchmal große Unterschiede. Allerdings konnte demonstriert werden, dass Fehler regionale Klimamodelle bei Verfeinerung der Skala nur mäßig zunehmen [Suklitsch *et al.*, 2010]. Geht man davon aus, dass sie sich diese Ergebnisse auf Unsicherheiten in Klimaänderungssignalen umlegen lassen, sind einige der hier dargestellten subregionalen Niederschlagsänderungen als signifikant einzuschätzen. Insbesondere der Vergleich mit den mittleren Ergebnissen aus dem ENSEMBLES-Projekt (*Abschnitt 3.2*) lässt erste Rückschlüsse zu, dass die Muster der Niederschlagsänderung der reclip:more Szenarien, wenn auch nicht in aller Detailliertheit, so zumindest in den Grundzügen realistisch sind.

Derzeit wird im Rahmen des Projekts reclip:century intensiv an der Analyse der Robustheit und Unsicherheiten in Klimaszenarien für Kleinregionen in Österreich gearbeitet. Erste Ergebnisse sind Anfang 2011 zu erwarten.

3.3 Extremereignisse

Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürreperioden, intensive Niederschläge oder Windstürme besitzen ein hohes Schadenspotenzial und haben daher weit stärkere Auswirkungen auf die Gesellschaft als das mittlere Klima. Bei der Analyse der Änderung von Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse ist die regionale Betrachtung besonders wichtig. Ähnlich wie bei Niederschlagsänderungen kann auch bei Extremereignissen von globalen oder auch gesamteuropäischen Ergebnissen nicht direkt auf kleinräumig regionale Verhältnisse geschlossen werden. Insbesondere gilt das für ein orografisch so komplexes Gebiet wie den Alpenraum. Gerade in der kleinräumigen Analyse der Auswirkungen des globalen Klimawandels auf Extremereignisse und in der Untersuchung ihrer Unsicherheiten steckt die Klimaforschung derzeit noch in ihren Kinderschuhen, aber erste Ergebnisse sind vorhanden und einige grobe Trends können hier dargestellt werden. *Beniston et al.* [2007] fasst die diesbezüglichen Ergebnisse des PRUDENCE-Projektes zusammen:

Hitzewellen

Erwartungsgemäß zeigen die Klimasimulationen für das Ende des 21. Jahrhunderts parallel zur allgemeinen Temperaturzunahme einen deutlichen Anstieg der Zahl der Hitzetage (Maximaltemperatur über 30 °C) in Europa. Weniger selbstverständlich ist, dass auch eine Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Hitzewellen erwartet wird und dass aufgrund höherer Temperaturvariabilität in kontinental geprägten Gebieten extreme Temperaturen stärker ansteigen als gemäßigte Temperaturen. Regional treten die deutlichsten Signale im Mittelmeerraum, insbesondere über Südfrankreich und Spanien auf.

Extreme Niederschläge

Hand in Hand mit den Änderungen in den Niederschlagssummen wird erwartet, dass die Intensität der 5-jährigen Niederschlagsereignisse im Norden Europas zunimmt und im Süden abnimmt. Eine interessante Ausnahme stellt Mitteleuropa dar, wo im Sommer trotz abnehmender Niederschlagssummen erhöhte Intensitäten, insbesondere in den maximalen Tages-Niederschlagssummen, erwartet werden [siehe auch *Frei et al.*, 2006].

Dürreperioden

Im Mittelmeerraum und insbesondere über Südspanien, der östlichen Adriaküste und Südgriechenland wird deutlich höheres Risiko von Dürreperioden erwartet.

Windstürme

Über der Nordsee und Westeuropa wird eine leichte Zunahme der winterlichen Sturmaktivität (gemessen an der 90%-Perzentile der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit) erwartet. Südlich der Alpen wird mit einer Abnahme der winterlichen Windstürme gerechnet.

Anhand der regional detaillierteren Ergebnisse des Projekts reclip:more können Analysen über die Änderung von Extremereignissen nur sehr begrenzt durchgeführt werden, weil die Simulationsperioden (zwei mal 10 Jahre) sehr kurz sind. Beschränkt man sich jedoch auf die Parameter Niederschlagsintensität und Niederschlagshäufigkeit, zeigt sich, dass vielfach Gebiete mit abnehmender Niederschlagshäufigkeit zunehmende Niederschlagsintensitäten aufweisen [Gobiet *et al.*, 2006], was als Hinweis auf extremere Niederschlagsverhältnisse auch im Alpenraum interpretiert werden kann. Weit aussagekräftigere Ergebnisse für den Alpenraum können vom derzeit laufenden Projekt reclip:century erwartet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Ergebnisse der wichtigsten Projekte über den zukünftigen regionalen Klimawandel in Europa und im Alpenraum wurden die Grundcharakteristika des zu erwartenden Klimawandels im 21. Jahrhundert erarbeitet. In den nächsten Jahrzehnten ist im Alpenraum mit einer Temperaturzunahme von 0.2 bis 0.45 °C pro Jahrzehnt zu rechnen. Bezüglich der Niederschlagsänderung wird ein starker Nord-Süd-Gradient mit deutlich zunehmenden Niederschlägen im Norden Europas (insbesondere im Winter) und stark abnehmenden Niederschlägen im Süden Europas (insbesondere im Sommer) erwartet. Der Alpenraum stellt eine Trennlinie des Klimawandels dar, was in diesem Gebiet regional detaillierte Untersuchungen nötig macht. In Subregionen rund um die Alpen werden Niederschlagsänderungen von bis zu +20 % im Winter (vornehmlich, aber nicht ausschließlich im Norden der Alpen) und –30 % im Sommer (vornehmlich im Süden der Alpen) erwartet. Weiters gibt es Anzeichen für vermehrtes Auftreten von Hitzwellen und starken Niederschlägen wobei aber die Verlässlichkeit dieser Aussagen und ihre kleinregionalen Charakteristika noch nicht gut untersucht sind und mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Derzeit stehen zur Analyse des zukünftigen Klimawandels in Europa hauptsächlich die Ergebnisse des EU-Projektes ENSEMBLES zur Verfügung. Räumlich feiner aufgelöste Ergebnisse für den Alpenraum wurden im Österreichischen Projekt reclip:more erarbeitet, wobei die Abschätzung der Unsicherheiten und die Analyse der Änderung der Extremereignisse in diesem Fall noch rudimentär sind. Das im Herbst 2009 gestartete Folgeprojekt reclip:century führt die in reclip:century begonnene Arbeit derzeit weiter. Neben durchgehenden Klimaszenarien des Alpenraums in hoher räumlicher Auflösung von 1961–2050, sind von reclip:century vor allem wesentlich verbesserte Unsicherheitsabschätzungen zu erwarten. Weiters werden sich die reclip:century Simulationen für Analysen über Änderungen in Extremereignissen eignen und versprechen eine wertvolle Basis für die Klimafolgenforschung in Österreich werden.

Danksagung

Große Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des K-wiss-Projekts reclip:more und des ACRP-Projekts reclip:century erstellt (foresight.ait.ac.at/reclip). Die Klimaszenarien in *Abschnitt 3.2* wurden vom EU-Projekt ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) zur Verfügung gestellt.

Literatur

- Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. Vazquez-Aguirre, 2006, *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, E. Nieplova, 2007, HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, *Int. J. Climatol.*, 27, 17–46.
- Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, K. Woth, 2007, Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9226-z.
- Christensen, J.H., O.B. Christensen, 2007, A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9210-7
- Déqué, M., D. P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, B. van den Hurk, 2007, An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections, *Clim. Change*, 81, DOI 10.1007/s10584-006-9228-x
- Dickinson R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, G.T. Bates, 1989, A regional climate model for western United States, *Clim. Change*, 15, 383–422.
- Frei, C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli, P.L. Vidale, Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models, *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Giorgi, F., 1990, Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941–963.
- Giorgi, F., L.O. Mearns, 1991, Approaches to the simulation of regional climate change: a review, *Rev. Geophys.*, 29, 191–216.
- Gobiet, A., H. Truhetz, A. Riegler, 2006, A climate scenario for the Alpine region, reclip:more project year 3 - WegCenter progress report, Wegener Center, Univ. of Graz, Austria. (<http://www.wegcenter.at/reloclim/publikationen/>)
- Gobiet, A., A. Dalla-Via, F. Prettenhaler & H. Truhetz, 2008, Grundwasserverträgliche ackerbauliche Bewirtschaftungsformen über seichtliegenden gering mächtigen Grundwasserleitern/5.6. A Climate Change Scenario for Southern and Eastern Styria and Potential Impacts on Water Availability - In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring - Modellierung - Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.- Beiträge z. Hydrogeologie, 56 (2007/08), Graz, in press.
- Loibl, W., A. Beck, M. Dorninger, H. Formayer, A. Gobiet, W. Schöner (Hrsg.), 2007, Kwiss-Programm reclip:more: research for climate protection:model run evaluation. Final Report, ARC-sys-0123, Austrian Research Centers - systems research, Wien, Österreich. (<http://systemsresearch.arcs.ac.at/SE/projects/reclip/>)

- Murphy, J. M., 2000, Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques, *Int. J. Climatology*, 20, 489-501.
- Reichler, T., J. Kim, 2008, How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 3, 303-311.
- Rummukainen, M., 2010, State-of-the-art with regional climate models, *WIREs Climate Change*, 1, 82-96.
- Suklitsch, M., A. Gobiet, H. Truhetz, N.K. Awan, H., Göttel, D. Jacob, 2010, Error characteristics of high resolution regional climate models over the Alpine area, *Clim. Dyn.*, accepted.
- Schmidli, J., C. Frei, 2005, Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *Int. J. Climatol.* 25, 753–771.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007, Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Thiemeßl, M., A. Gobiet, A. Leuprecht, 2010, Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models, *Int. J. Climatol.*, accepted.
- Von Storch, H., F. W. Zwiers, 2003, *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding, F. Kimura, 2004, Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects, *J. Met. Soc. Japan*, 82, 6, 1599-1628.
- Wilby, R. L., T. M. L. Wigley, 1997, Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, *Prog. Phys. Geography*, 21, 530–548.
- Zorita, E., H. von Storch, 1997, A survey of statistical downscaling techniques, GKSS report 97/E/20, Geesthacht, Germany.

Anschrift des Autors:

Dr. Andreas Gobiet

Universität Graz

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel und Institutsbereich für Geophysik,

Astrophysik und Meteorologie

Leechgasse 25, 8010 Graz

E-Mail: andreas.gobiet@uni-graz.at

Prognostizierte Klimaveränderungen in Österreich: Unsicherheiten und Bias

Herbert Formayer

Einleitung

Seit einiger Zeit wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel nicht mehr nur über die notwendigen Vermeidungsmaßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen diskutiert, es rückt der Bedarf an Anpassung an den Klimawandel immer stärker in den Vordergrund. Viele Länder, darunter auch Österreich (www.klimawandelanpassung.at), beschäftigen sich mit der Erarbeitung von Anpassungsstrategien, um in diesem Bereich eine möglichst effiziente und nachhaltige Entwicklung einzuleiten.

Dabei übersehen viele Entscheidungsträger, dass zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien wesentlich höhere Anforderungen an die Klimaszenarien gestellt werden als etwa zur Ableitung von Vermeidungsmaßnahmen. Dies liegt daran, dass es sich bei dem Treibhauseffekt und dessen Verstärkung um ein globales Phänomen handelt und die damit verbundenen physikalischen Prozesse in den Klimamodellen sehr gut abgebildet werden können. Zwar gibt es gewisse Unterschiede in der Sensitivität von Globalen Klimamodellen (GCM) hinsichtlich der Wirkung des Treibhausgasanstieges, aber die generelle Richtung ist eindeutig.

Bei der Erarbeitung von Anpassungsstrategien benötigt man hingegen lokale und sektorspezifische Szenarien. Für viele Fragestellungen wird neben der Temperatur auch Information über den Niederschlag benötigt und zudem spielen Extremereignisse eine herausragende Rolle. Bevor Klimaszenarien für derart anspruchsvolle Applikationen verwendet werden, sollte man sich über die Unsicherheiten und Limitierungen derzeitiger Klimaszenarien Gedanken machen.

Unsicherheiten

Bei der Erstellung von Klimaänderungsszenarien wirken eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren mit. Diese werden in einer Kaskade von einer Prozessebene an die Nächste weitergegeben. In *Abb. 1* ist eine derartige Unsicherheitskaskade dargestellt. Die Unsicherheiten reichen von den Beobachtungsdaten angefangen, über die Problematiken der globalen Klimamodellierung, den verschiedenen Regionalisierungs- und Lokalisierungsmethoden bis hin zu den Modellen der Klimafolgenforschung.

Bei dieser Weitergabe kommt das Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Anwendung. Leider lassen sich aber nicht alle Unsicherheitsfaktoren vollständig quantitativ festlegen, wodurch eine Fehlerfortpflanzungsrechnung niemals den gesamten Unsicherheitsbereich angeben kann.

Für die Klimamodellierung spielen Beobachtungsdaten besonders für die Verbesserung von parametrisierten Prozessen (z. B. Wolken- und Niederschlagsbildung) und für die Evaluierung der Modellergebnisse eine wesentliche Rolle. Durch die Assimilation von Fernerkundungsdaten bei der Modellentwicklung konnten in den letzten Jahrzehnten in den atmosphärischen Teilen der Klimamodelle und jenen Teilen, die mit der Land- oder Meeresoberfläche zu tun haben, große Fortschritte erzielt werden. Problematisch ist die Datenlage von den Ozeanen unterhalb der

Meeresoberfläche. Hier hat man erst in den letzten Jahren begonnen, kontinuierliche Messnetze aufzubauen (Cunningham et al., 2007). Aber auch die klassischen meteorologischen Kenngrößen beinhalten Unsicherheiten. Hierzu zählen Messungenauigkeiten, die etwa beim Niederschlag im Winter im Gebirge stark ausgeprägt sind. Besonders hoch sind die Ansprüche an die Qualität der Beobachtungsdaten, wenn damit Trendanalysen durchgeführt werden sollen. Selbst verhältnismäßig einfach messbare Kenngrößen wie die Temperatur müssen aufwendig qualitätsgeprüft und homogenisiert werden, um hierfür geeignet zu sein, wie das Projekt HISTALP (Auer et al., 2007) anschaulich gezeigt hat.

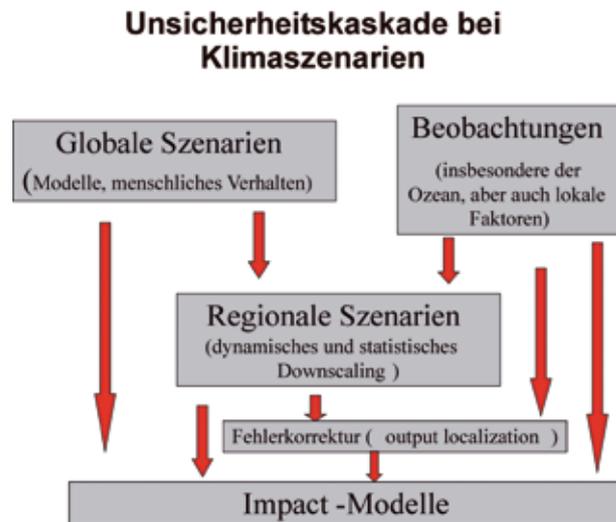


Abb. 1: Unsicherheitskaskade bei Klimaszenarien. Neben den Unsicherheiten aus den physikalischen/statistischen Modellen, sind das mangelnde Wissen über den Istzustand (Beobachtungen) und das zukünftige Verhalten der Menschen (Emissionsszenarien) die Hauptquellen der Unsicherheit.

Bei der Erstellung von Klimaszenarien für die Zukunft, muss man für den gesamten Szenarienzeitraum Annahmen über die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen und damit über den menschlichen Ausstoß an Treibhausgasen treffen. Diese Annahmen sind natürlich mit sehr großen Unsicherheiten verbunden, da hierfür Schätzungen für das Bevölkerungswachstum, die technische Entwicklung aber auch sozio-ökonomische und politische Entwicklungen eine Rolle spielen. Um diese Unsicherheiten einzugrenzen, verwendet man nicht nur ein einzelnes Szenario, sondern ein Ensemble an möglichen Entwicklungen.

In Abb. 2 sind die Emissionsszenarien und deren Wirkung auf die globale Mitteltemperatur, wie sie im letzten IPCC Bericht verwendet wurden (Solomon et al., 2007) dargestellt. Die Emissionsszenarien reichen hierbei von Entwicklungspfaden, in denen es bereits heute gelingt, den Anstieg der Treibhausgase gering zu halten bzw. ab der Mitte des Jahrhunderts sogar schon zu reduzieren (B1), bis hin zu Szenarien, in denen sich der Treibhausgasausstoß bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verdreifacht (A2). Diese Unsicherheit bei den zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen ist für etwa die Hälfte der Unsicherheit bei den globalen Szenarien verantwortlich.

Bei den globalen Klimamodellen selbst ergeben sich die größten Unterschiede bei der Behandlung von Prozessen die nicht explizit berechnet, sondern parametrisiert werden. Ein besonders wichti-

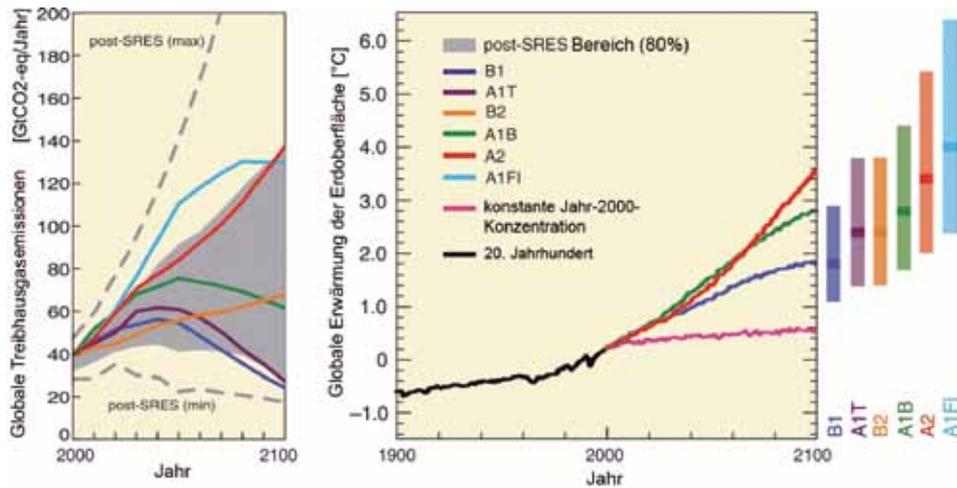


Abb. 2: Mögliche Entwicklung der von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert (links) und daraus resultierende globale Erwärmung (rechts) (Eitzinger et al., 2009).

ger Prozess ist hierbei die Wolkenbildung. Physikalische Prozesse welche die Wolkenbildung beeinflussen, haben eine Größenordnung von einigen μm (Tröpfchenphysik), über einigen hundert Metern (turbulente Durchmischung) bis hin zu einigen 100 km bei großräumigen Hebungsvorgängen in Fronten oder an Gebirgen. Nur letzteres kann von GCMs explizit modelliert werden, alle anderen Prozesse können nur indirekt abgeleitet werden. Da sich die Wolkenbildung aber sowohl auf die Niederschlagsbildung, als auch auf den Strahlungshaushalt auswirkt, kann eine unterschiedliche Parametrisierung dieser Vorgänge in GCMs zu deutlichen Unterschieden führen.

Da gekoppelte globale Klimamodelle, die alle Komponenten des Klimasystems modellieren, noch immer eine räumliche Auflösung von einigen 100 km besitzen, können mit diesen regionale Effekte wie der Einfluss von Gebirge nur ansatzweise abgebildet werden. Da das Klimasystem jedoch nur für die gesamte Erde ein abgeschlossenes System ist, kann die vollständige Abbildung des Klimas mit all seinen Prozessen, Wechselwirkungen und Rückkopplungen nur durch ein globales Modell erfolgen. Jedes regionale oder lokale Klimaszenario basiert daher auf Informationen aus GCMs.

Mithilfe von Regionalisierungsmethoden versucht man regionale Information in die globalen Szenarien einzubringen. Bei statistischen Methoden geschieht dies durch die Verknüpfung von großräumigen meteorologischen Feldern mit lokalen Beobachtungen. Bei der dynamischen Methode wird ein regionales Klimamodell (RCM) für die Atmosphäre (einschließlich Boden) nur für einen Teil der Erde verwendet. An den Rändern und von den Meeresflächen werden die Daten vom GCM übernommen. Die gewonnene Rechenzeit kann man für eine bessere räumliche Auflösung nutzen. Im europäischen Forschungsprojekt ENSEMBLES (Hewitt et al., 2004) wurden mehrere RCM mit einer räumlichen Auflösung von rund 25 km für ganz Europa betrieben.

Derartige RCMs lösen relevante Strukturen in Europa, wie die Gebirge oder die Meeresbecken (Adria, Ostsee, ...) wesentlich realistischer auf als GCMs. Dennoch reicht die Qualität der Modelle noch nicht aus, um die Ergebnisse direkt für nachgeschaltete Modelle (z. B. Niederschlags-Abfluss-Modelle) zu verwenden. Im Gebirge ergeben sich speziell Probleme bei der Temperatur, da die alpinen Täler noch nicht und die alpinen Becken nur grob aufgelöst werden. Dadurch können

die starken Temperaturgänge (sowohl Tages- als auch Jahresgänge) von den Modellen nicht reproduziert werden.

Noch problematischer erweist sich der Niederschlag. In Abb. 3 ist der mittlere Fehler des Sommerniederschlages (April bis September) von drei RCMs aus dem ENSEMBLES Projekt dargestellt. Als Referenz wurde der E-OBS Beobachtungsdatensatz (Haylock et al., 2008) verwendet, der ebenfalls innerhalb des Projektes ENSEMBLES erarbeitet wurde. Alle drei RCMs wurden mit unterschiedlichen GCMs betrieben, daher müssen diese Fehler als die Fehler des kombinierten Systems GCM/RCM betrachtet werden.

Die Fehlermuster der verschiedenen RCMs schauen recht unterschiedlich aus. Auffallend ist, dass häufig in der Nähe von Gebirgen eng aneinander positive und negative Abweichungen auftreten. Generell scheinen die Modelle die Niederschläge an Gebirgen zu überschätzen. Hier muss man aber darauf hinweisen, dass auch die Beobachtungsdaten oft Schwierigkeiten haben, den Niederschlag im Gebirge richtig darzustellen. Der E-OBS Datensatz verwendet im Alpenraum verhältnismäßig wenige Stationen (aus Österreich nur 17 Stationen für den Niederschlag) und eine Seehöhenabhängigkeit, wodurch der Niederschlag bevorzugt an den Alpenhauptkamm verlagert wird. Die Ergebnisse in Abb. 3 sind daher das Ergebnis der Fehler der gekoppelten Systeme GCM/RCM kombiniert mit der teilweisen Unzulänglichkeit von gerasterten Beobachtungsdatensätzen.

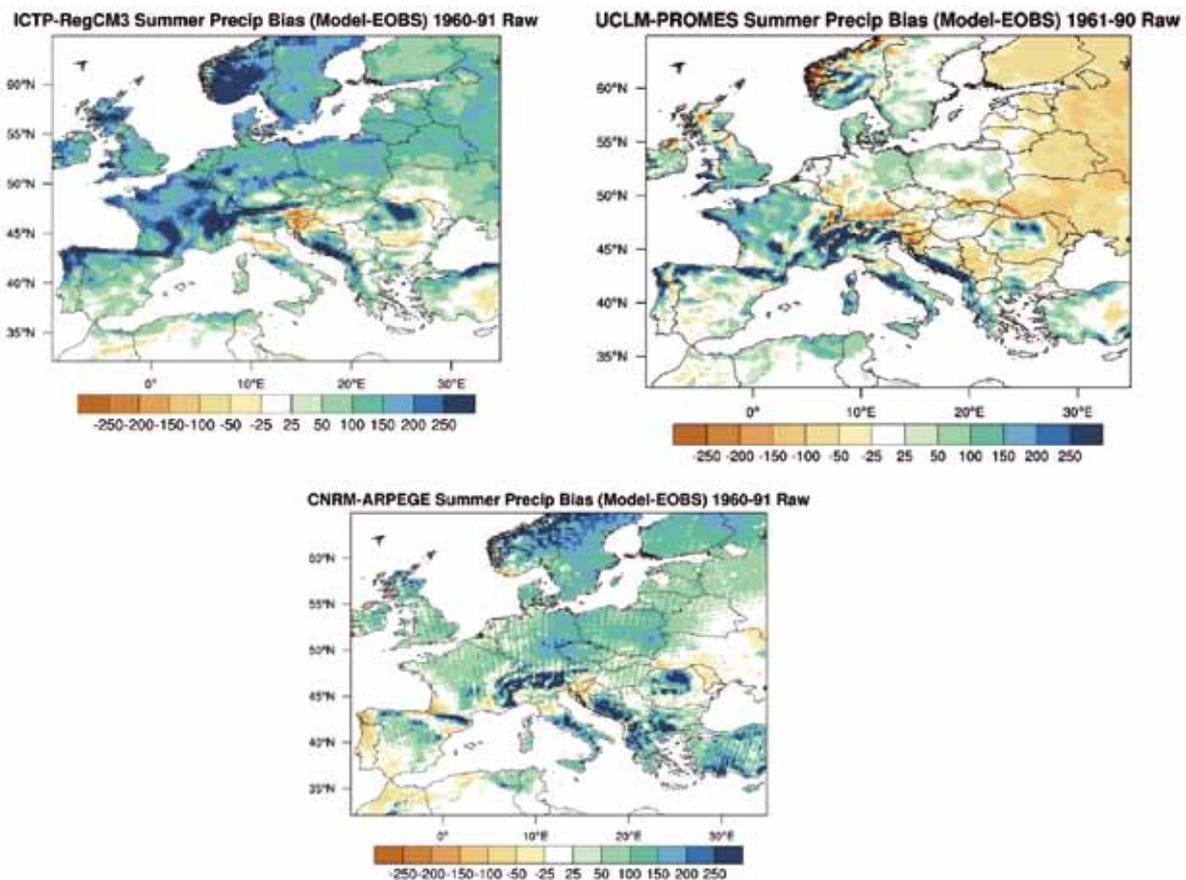


Abb. 3: Mittlerer Fehler des Sommerniederschlages (April–September) von drei regionalen Klimamodellen des ENSEMBLE-Projektes mit 0.25° räumlicher Auflösung. Speziell in Gebirgsregionen ist die direkte Verwendung der Niederschlagsresultate dieser Modelle nicht zulässig.

Vergleicht man RCMs mit noch höher aufgelösten Beobachtungsdaten, zeigen sich noch weitere Phänomene. In *Abb. 4* ist der Niederschlagsfehler des Modells REMO-UBA (Jacob et al., 2008) für den Winter dargestellt. Sowohl das Modell als auch die Beobachtungsdaten haben eine räumliche Auflösung von 10 km. Bei diesem Modell zeigen sich deutliche Verschiebungen bei den Stauregionen, was durch die Abfolge von zu feuchten und zu trockenen Gebieten erkenntlich ist. So ist etwa das Rheintal viel zu feucht, aber die Westseite des Arlbergs und das Außerfern viel zu trocken. An mehreren Gebirgszügen kann dieses Phänomen beobachtet werden. Grund dürfte hierfür die Wechselwirkung der Niederschlagsparametrisierung mit der im Modell verwendeten Topografie sein, andererseits können auch Effekte wie die Windverfrachtung der Regentropfen eine Rolle spielen.

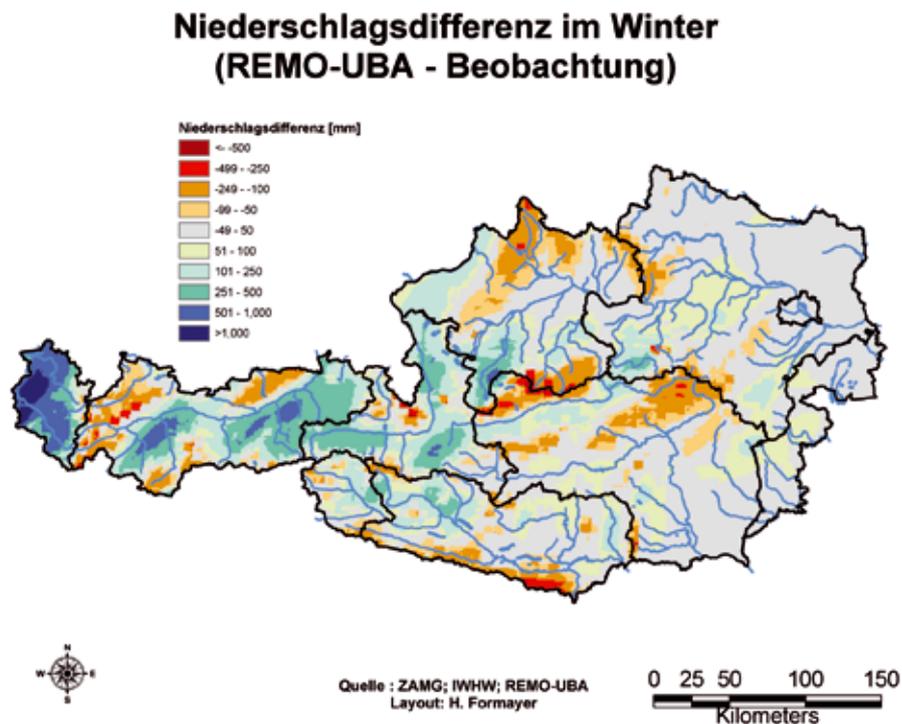


Abb. 4: Mittlerer Fehler des Winterniederschlages des Modells REMO_UBA in Österreich. Neben generellen Über- bzw. Unterschätzungen im Niederschlag, kann es im Gebirge durch die Glättung der Topografie in den Modellen zu einer Verschiebung von Luw/Lee Effekten kommen.

Neben diesen durch Modelllimitierungen entstehenden Fehler, ergibt sich bei den Klimaszenarien auch eine Unsicherheit aufgrund der zeitlichen Zuordnung. Die einzige zeitliche Zuordnung bei GCMs erfolgt durch die Treibhausgaskonzentration. Die heutigen GCMs sind aber schon so komplex, dass sie in der Lage sind natürliche Schwankungen, wie sie etwa durch ENSO oder NAO ausgelöst werden, zu reproduzieren und dadurch Schwankungen auf dekadischer Zeitskala produzieren. Diese Schwankungen sind jedoch zeitlich nicht synchron mit den realen Schwankungen auf der Erde, sondern rein zufällig.

Um diese modellinternen Schwankungen vom Klimatrend unterscheiden zu können, wurden für den letzten IPCC Bericht für ausgesuchte Emissionsszenarien nicht nur eine Realisierung gerechnet, sondern jeweils drei. Diese drei Berechnungen sind vollkommen gleichwertig. In *Abb. 5* sind

die Ergebnisse für den Niederschlag über Österreich vom GCM ECHAM 5 (Röckner et al., 2006) und das Emissionsszenario A1B für den Zeitraum 1860 bis 2100 in geglätteter Form (30-jähriger Gaußfilter) dargestellt.

Sowohl bei den Niederschlägen im Sommer und Winterhalbjahr, als auch bei den Jahressummen erkennt man Schwankungen mit einer Länge von einer bis mehreren Dekaden. Durch diese Schwankungen kann der Unterschied zwischen den drei Realisierungen bei den Halbjahresniederschlägen bis zu 20 Prozent betragen, bei den Jahressummen ungefähr 10 Prozent. Sowohl beim Sommerniederschlag als auch beim Winterniederschlag zeigt sich erst ab der Mitte des 21. Jahrhunderts eine Entwicklung, die über die davor beobachtete Schwankung hinaus geht. Beim Jahresniederschlag zeigt sich bei diesem Modell kein Trend.

Diese modellinternen Schwankungen, die durchaus Ähnlichkeit mit den in der Natur vorkommenden Schwankungen haben, erzeugen aber zusätzlich Unsicherheit, wenn man etwa Zeitscheibenvergleiche macht. Oft ist es üblich, eine Szenarienperiode (etwa 2036 bis 2065) mit der Klimanormalperiode (1961–1990) zu vergleichen. Ein eventuell vorhandener Trend ist hierbei immer von dieser zufälligen Modellschwankung überlagert. Diese kann den Trend sowohl verstärken, als auch abschwächen, bzw. ins Gegenteil kehren. Um dies zu kontrollieren, sollten wenn möglich immer mehrere Realisierungen verwendet werden und immer die gesamte Zeitreihe untersucht werden, bevor man mit Zeitscheiben arbeitet.

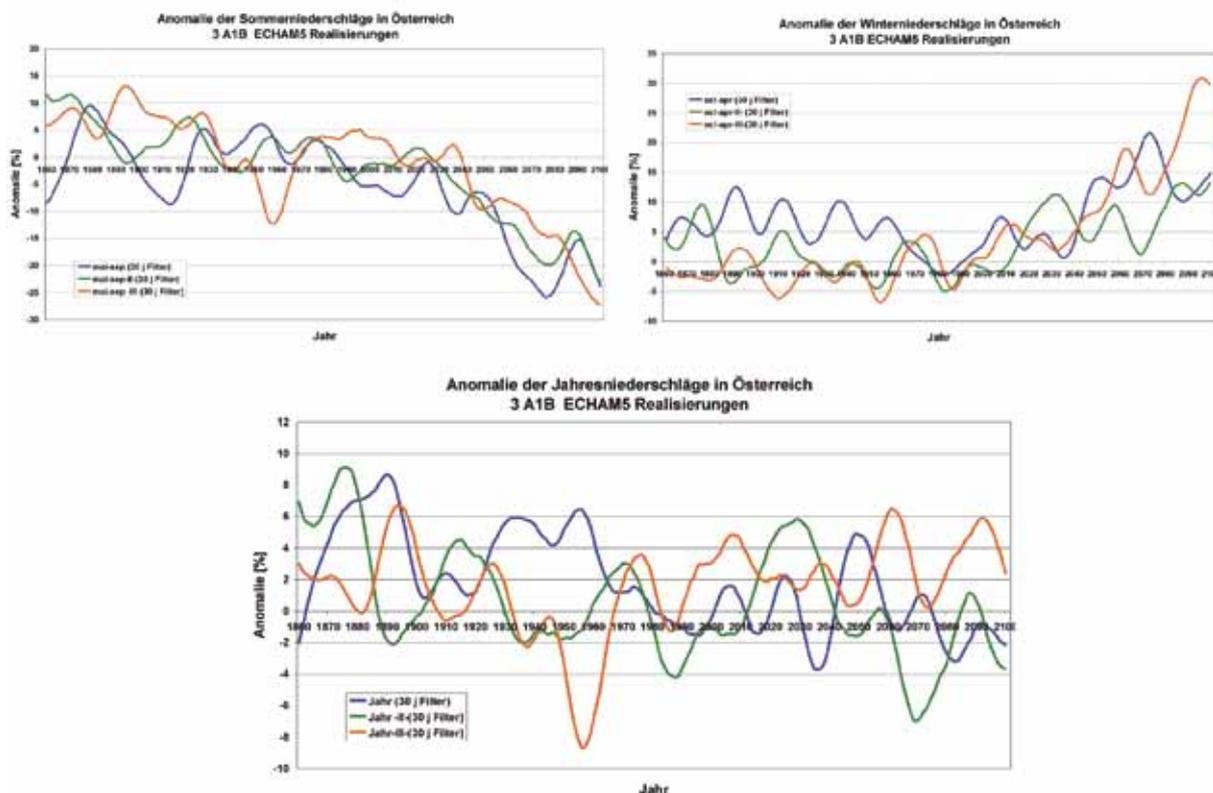


Abb. 5: Niederschlagsentwicklung in Österreich nach 3 A1B-Realisierungen des GCMs ECHAM 5 von 1860 bis 2100. Erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zeigt sich eine signifikante Entwicklung im Sommer- bzw. im Winterhalbjahr. Für die Jahressumme zeigt sich kein Trend.

Kippeffekte

Neben den bisher betrachteten Unsicherheiten gibt es noch andere Entwicklungsmöglichkeiten, die durch Prozesse verursacht werden, die derzeit in Klimamodellen noch nicht inkludiert sind, oder von nichtlinearen Verstärkungsmechanismen, die eventuell von den GCMs nicht oder nicht richtig erfasst werden. Derartige Prozesse, die sich besonders stark auf das Klimasystem auswirken könnten, werden Kippunkte (englisch tipping points) genannt.

Eine Forschergruppe vom Potsdam Institut für Klimaforschung (Lenton et al., 2008) hat sich ausführlich mit diesen Phänomenen beschäftigt. In der *Abb. 6* sind die wichtigsten Kippunkte und die Regionen in denen sie vorkommen zusammengefasst.

Am bekanntesten hiervon ist der als „Ausbildung von atlantischen Tiefenwassers“ bezeichnete Prozess südlich von Grönland. Dieser ist in der breiten Öffentlichkeit besser als „Zusammenbruch des Golfstroms“ bekannt. Alle Klimamodelle zeigen, dass aufgrund der Klimawandels die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik abnehmen und dadurch der Wärmetransport vom Golf von Mexiko in Richtung Europa abnehmen wird. Dies führt auch zu der geringen Erwärmung in der Region südlich von Grönland. Ein Zusammenbruch der Tiefenwasserbildung ist nach heutigem Verständnis sehr unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Auf jeden Fall ist dieses Ereignis vor rund 12000 Jahren bereits eingetreten und löste eine Kälteperiode auf der Nordhemisphäre aus, welche als Jüngere Dryas bekannt ist.

Ein anderer möglicher Effekt könnte durch die Umwandlung des Amazonas Regenwaldes in Savanne darstellen. Die meisten Klimamodelle zeigen im Amazonasbecken einen Rückgang der Niederschläge aufgrund der großräumig geänderten Druckverhältnisse. Erste Experimente mit Klimamodellen, in denen auch die Biosphäre mit berechnet wird zeigen, dass diese Niederschlagsabnahme durch die Reaktion der Biosphäre verstärkt werden könnte, sodass in einigen Modellen das gesamte Amazonasbecken in Savanne umgewandelt wurde. Durch diese Umwandlung würden aber riesige Mengen an CO₂ freigesetzt, die den Treibhauseffekt verstärken würden. Die CO₂-Mengen könnten die selbe Größenordnung haben wie die bisher von Menschen durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen freigesetzte Menge.

Weitere Effekte könnten durch das großflächige Absterben der nördlichen Wälder (Taiga) durch Borkenkäfer und Waldbrände ausgelöst werden, oder der Reaktion der polaren Eisschilde in Grönland und der Westantarktis. Eine größere Veränderung des asiatischen und afrikanischen Monsuns ist denkbar und dies könnte in Afrika zu einer Wiederbegrünung der Sahara führen. Das Auftauen des Permafrostes in der Arktis könnte größere Mengen an Methan und CO₂ freisetzen und somit auch den Treibhauseffekt verstärken.

All diesen Prozessen ist gemeinsam, dass ihre Wirkungsweise zwar bekannt ist, es aber unklar ist wie groß die Auswirkungen letztlich aber wirklich sind und vor allem ab wann sie in Gang gesetzt werden. Es ist nur klar, dass je stärker der Klimawandel ausfällt und je rascher dieser erfolgt, umso wahrscheinlicher der eine oder andere Prozess ins Laufen kommt.

Potenziell verstärkende Rückkoppelungseffekte



Abb. 6: Mögliche Rückkopplungsprozesse, welche den Klimawandel beschleunigen, oder die Auswirkungen stark verändern können. Je stärker und rascher die globale Erwärmung erfolgt, umso wahrscheinlicher wird das Eintreten dieser Ereignisse (Quelle Eitzinger et al., 2009).

Bei einem Prozess, der in der Abb. 6 als „Verlust des arktischen Meereis“ bezeichnet wird, ist es jedoch anders. Dieser Prozess ist bereits voll im Gange. Seit dem Jahre 2007 sind die Flächen der minimalen Eisausdehnung am Nordpol so stark zurück gegangen, dass sie nur mehr knapp 60 % der mittleren Ausdehnung am Ende des 20. Jahrhunderts erreichen. Ein derartig starker Eisrückgang wird von den Klimamodellen erst um die Jahrhundertmitte erwartet. Der starke Eisrückgang im Sommer und Herbst führt zu einer positiven Verstärkung, da Meereis bis zu 90 % der Sonneneinstrahlung reflektiert, Meerwasser hingegen mehr als 90 % absorbiert. Damit wird dem Klimasystem in dieser Region wesentlich mehr Energie zur Verfügung gestellt. Die größten Auswirkungen dieses Prozesses sollten im Herbst und Frühwinter zu beobachten sein. Wie sich dieser Prozess auf die großräumige Luftdruckverteilung auswirken wird ist unklar.

Schlussfolgerungen

Die steigende Nachfrage nach Strategien und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel erhöht den Bedarf an Klimafolgenforschung. Die disziplinär entwickelten Impaktmodelle inkludieren immer mehr Faktoren und werden sowohl räumlich als auch zeitlich immer höher aufgelöst und sind auch häufig schon in der Lage Extremereignisse abzubilden. Derartige Modelle stellen sehr hohe Anforderungen an die Qualität und die räumlich/zeitliche Verfügbarkeit der meteorologischen Eingangsgrößen. Diese Anforderungen können selbst von den Beobachtungsdaten nur schwer erfüllt werden. Bei Anwendung derartiger Modelle für die Klimafolgenforschung müssten aber auch die Klimaszenarien diesen hohen Kriterien gerecht werden.

Natürlich können Klimaszenarien diese Qualitätsstandards noch nicht erfüllen. Eine Reihe von Unsicherheiten, die auf den verschiedensten Prozessebenen bei der Produktion von lokalen Kli-

maszenarien entstehen, greifen ineinander. Teilweise können systematische Fehler mittels statistischer Fehlerkorrekturmethode reduziert werden, dennoch sind derzeit Aussagen speziell zu kleinräumigen Extremereignissen und hier insbesondere beim Niederschlag begrenzt, da die relevanten physikalischen Prozesse in den derzeitigen RCMs noch nicht hinreichend aufgelöst sind.

Dennoch liegen die größten Unsicherheiten und damit auch der größte Forschungsbedarf bei den globalen Klimamodellen. Eine bessere Abbildung der Ozeane, eine Integration der Biosphäre, die Weiterentwicklung der Wolken/Niederschlagsbildung sowie der Kopplung der verschiedenen Sphären sollte robustere Ergebnisse liefern und auch mehr Klarheit über die Wirkung der verschiedenen Kippeffekte bringen.

Neben der Weiterentwicklung der Modelle ist es aber unerlässlich, die Beobachtungsgrundlage zu verbessern. Zeitlich /räumlich gut aufgelöste, qualitativ hochwertige, kontinuierliche Beobachtungen sind die Basis für die weitere Reduktion der Unsicherheiten bei den Klimaszenarien. Dies gilt sowohl für In-situ-Messungen als auch für die Fernerkundung.

Diese Limitierung, speziell bei lokalen Klimaszenarien, erfordern eine besondere interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Klimafolgenforschern und den Produzenten der Klimaszenarien. Nur eine gemeinsame Erarbeitung der Vorgehensweise ermöglicht die optimale Wahl der zu verwendenden Modelle und die Einarbeitung von „soft knowledge“. Dies ist aber für eine ausgewogene Interpretation der Ergebnisse unerlässlich.

Eine vollständige Eliminierung der Unsicherheiten bei den Klimaszenarien wird aber niemals möglich sein, da der Mensch und sein Verhalten höchst klimagestaltend wirkt, aber dieses nur schwer vorhersagbar ist.

Literatur

- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, (2007). HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46
- Cunningham, S. A., Kanzow, T., Rayner, D., Baringer, M. O., Johns, W. E., Marotzke, J., Longworth, H. R., Grant, E. M., Hirschi, J. J.-M., Beal, L. M., Meinen, C. S., and Bryden, H. (2007): Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5° N, *Science*, 317, 935–938.
- Eitzinger, J., Kersebaum, K. C., Formayer, H. (2009): *Landwirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa* <http://de.agrimedia.com>, 320, Agrimedia, D-29459 Clenze, Deutschland; ISBN: 978-3-86037-378-1
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New 2008: A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Hewitt, C. D. and D. J. Griggs, 2004: Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. *Eos*, 85, p566.

- Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz Ph, Sieck K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Abschlussbericht zum UFOPLAN Vorhaben 204 41 13.
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008: Inaugural Article: Tipping elements in the Earth's climate system PNAS; 105: 1786 - 1793.
- Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, L. Kornblueh, E. Manzini, U. Schlese, and U. Schulzweida (2006): Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model, J. Climate, 19, 3771-3791.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Herbert Formayer
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Meteorologie
Peter-Jordan-Straße 82, 190 Wien,
E-Mail: herbert.formayer@boku.ac.at

Veränderungen in hydrologischen Zeitreihen

Reinhold Godina

Seit 1893 erhebt der Hydrographische Dienst in Österreich die quantitativen Komponenten des Wasserkreislaufes in ihrer räumlichen und zeitlichen Abfolge. Dazu gehören der Niederschlag, die Verdunstung, die Luft- und Wassertemperatur, der Wasserstand und der Abfluss, sowie Parameter zur Bestimmung der Grundwasserverhältnisse und der Quellschüttungen. Die zentrale Aufgabe der Hydrographie ist es, diese Daten zu erheben, zu prüfen und für wasserwirtschaftliche Fragestellungen zur Verfügung zu stellen. Neben der Diskussion der Ergebnisse globaler Entwicklungsszenarien infolge der zukünftig erwarteten Erhöhung der Lufttemperatur, hat die Frage nach dem Ausmaß der bis jetzt schon merkbaren Veränderungen auf den Wasserkreislauf an Bedeutung gewonnen. Zahlreiche Forschungsarbeiten mit Analysen hydrologischer Zeitreihen beschäftigen sich daher damit, signifikante, zeitliche Veränderungen hydrologischer Kenngrößen zu identifizieren und diese in einen ursächlichen Zusammenhang mit der seit den 1970er-Jahren festgestellten raschen Zunahme der Lufttemperatur zu setzen.

Hydrologisch und wasserwirtschaftlich von Interesse ist es, frühzeitig zu erkennen ob und wie sich die Komponenten der Wasserbilanz – Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und die unterirdischen Grundwasserspeicher – verändert haben. Dabei ist sowohl die zeitliche Veränderung als auch das räumlich Muster zu beachten. Auf der Grundlage von Monatsdaten der Niederschläge und des Abflusses an den Messstellen des Hydrographischen Dienstes wurden Trendanalysen für den Zeitraum 1951 bis 2000 durchgeführt und für eine Darstellung im Hydrologischen Atlas Österreichs aufbereitet (HAÖ, BMLFUW, 2007). Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in einem eigenen Beitrag dieses Seminars vorgestellt.

Eine Voraussetzung für rückblickende Betrachtungen sind homogene und ausreichend lange hydrographische Zeitreihen. Da die Hydrographie in Österreich ein umfangreiches Messnetz betreibt, ist sie ein erster Ansprechpartner bei der Suche nach diesen Informationen. Ein Kapitel dieses Artikels behandelt daher eine Beschreibung der beobachteten gewässerkundlichen Parameter und deren zeitliche und räumliche Verfügbarkeit.

Um für Veränderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel aussagekräftige Trendanalysen durchführen zu können, sind Messwertreihen von mindestens 50, besser noch bis zu 100 Jahren wünschenswert. Dem gegenüber steht, dass nur für wenige Messstellen vieljährige Daten mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung – mindestens Tageswerte – digital verfügbar sind. Auf Schwierigkeiten bei der Verlängerung von Messstellendaten in die Vergangenheit und diese für Trendanalysen aufzubereiten, wird in einem weiteren Kapitel eingegangen. Für zwei Messstellen an der österreichischen Donau lagen Tagesmittelwerte des Abflusses seit 1897 vor, die digital erfasst und in ihrer Plausibilität geprüft wurden. Die Ergebnisse hinsichtlich der Veränderungen des Abflussregimes, der Hochwasserereignisse und der Niederwasserperioden werden dargestellt und im Zusammenhang mit dem Klimawandel diskutiert.

Verfügbarkeit hydrographischer Informationen und Daten

Eine moderne Wasserwirtschaft mit der Vielfalt und den Auswirkungen der Wassernutzung braucht mehr denn je hydrographische Grundlagen. Die aus dem gewässerkundlichen Beobachtungsnetz der Hydrographie gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für viele wasserwirtschaftlichen Entscheidungen. Die Daten des Wasserkreislaufes in Österreich werden von den hydrographischen Organisationseinheiten der Landesregierungen erfasst und aufbereitet, von der Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt im BMLFUW zusammenfassend bearbeitet und in einer Datenbank gespeichert. Die digitale Erfassung hydrographischer Daten startete in Österreich mit den Daten des hydrographischen Jahrbuches 1976. Ab dieser Zeit begann die Digitalisierung der analogen Aufzeichnungen in einem der Ganglinie entsprechenden zeitlichen Raster (z. B. 15 min). Die Daten vor 1976 wurden nachträglich – als Mittelwerte mit unterschiedlichen Intervallen – digital erfasst. Ein dezentrales Hydrographisches Datenmanagement-System (HyDaMS) ersetzte 1997 die für eine Großrechenanlage entwickelte erste Erfassungs- und Auswertesoftware. Das gesamte Archiv wurde in diese neue Messstellen- und Zeitreihendatenbank integriert. Mit dem Ziel, möglichst lange Zeitreihen zu erhalten sowie die Kennwerte des hydrographischen Jahrbuchs ohne große Abweichungen reproduzieren zu können, mussten bei der Migration der Archivdaten in das neue System Kompromisse eingegangen werden.

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der wesentlichsten Beobachtungsgrößen mit der Angabe der Messstellenanzahl und einem Hinweis ab welchem Jahr Daten digital verfügbar sind. Am Beispiel der Kenngröße des Abflusses ist ersichtlich, dass dieser an ca. 550 Messstellen in Österreich beobachtet wird. Für die Zeit von 1951 bis 1976 sind nur Tagesmittelwerte verfügbar. Ab 1976 wurden die digitalisierten äquidistanten Rasterdaten importiert. Um sich die aufwendige Digitalisierung der analogen Schreibstreifen zu ersparen, sind die analogen Schreibgeräte zur Erfassung des Wasserstandes, ab den 1990er-Jahren immer häufiger durch Datensammler ersetzt worden. Die Speicherung aller Ursprungszeitreihen erfolgt im HyDaMS inäquidistant – also ereignisabhängig. Die *Abb. 1* zeigt die zeitliche Entwicklung der Anzahl gewässerkundlicher Einrichtungen an den Gewässern Österreichs. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde der Wasserstand mehrheitlich durch die tägliche Ablesung des Lattenpegels bestimmt. Ab den 1950er-Jahren setzte sich immer mehr die kontinuierliche Aufzeichnung durch. Ausschließlich mit dem Lattenpegel wird nur mehr an wenigen Seen gemessen (*siehe Abb. 1*).

Die Umstellung auf die digitale Erfassung betrifft nicht nur die Kenngrößen der Beobachtungen an Fließgewässern, sondern auch die Sachgebiete Niederschlag und Grundwasser.

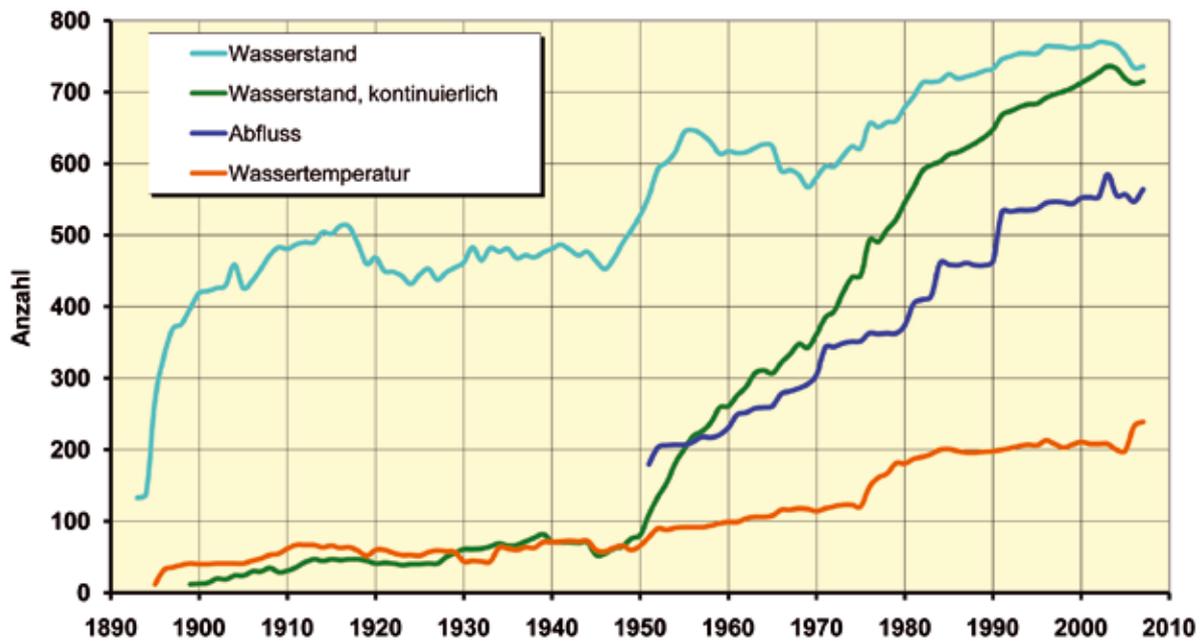


Abb. 1: Entwicklung der veröffentlichten gewässerkundlichen Einrichtungen an Oberflächengewässern.

Tabelle 1: Messstellennetz und Kenngrößen des österreichischen Beobachtungsnetzes zur Erhebung des Wasserkreislaufs.

Beobachtungskenngröße	Messstellenanzahl	Digital verfügbar frühestens ab
Niederschlag	1300	Tagessumme: 1971 Monatssumme: 1900
Schneehöhe	990	Tageswert: 1971 Maximum pro Jahr: 1900
Lufttemperatur	830	Terminwerte: 1998 Monatsmittel: 1901
Wasserstand	760	1976
Abfluss	550	Tagesmittel: 1951 Kontinuierlich: 1976
Wassertemperatur	210	kontinuierlich: 1976
Grundwasserstand	3050	Wöchentlich: 1966 Jahresmittel, Extrema: 1930
Grundwassertemperatur	340	Wöchentlich: 1966
Quellmessstellen	70	Kontinuierlich: 1995

Die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro) veröffentlicht die Ergebnisse der Erhebungen des Wasserkreislaufes in den Hydrographischen Jahrbüchern von Österreich. Da diese Daten Informationen im Sinne des Umweltinformationsgesetzes sind, werden sie auch in dem zeitlichen Intervall des Jahrbuchs zum Download im Internet zur Verfügung gestellt (<http://gis.lebensministerium.at/eHYD>). Gesetzlich geregelt ist die Erfassung des Wasserhaushalts im § 59c Abs. 3 des Wasserrechtsgesetzes (BGBl. Nr. 215/1959 i. d. g. F.).

Niederschlagsdaten

Der Niederschlag wird in Österreich im Wesentlichen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und vom hydrographischen Dienst beobachtet. Der Hydrographische Dienst betreibt mit über 1000 Messstellen das räumlich dichteste Messnetz. Das primäre Ziel der hydrographischen Beobachtung ist es, Daten für die Bestimmung des Gebietsniederschlags der Gewässergebiete zu generieren und für weitere Untersuchungen, wie z. B. zur Festlegung des Bemessungsniederschlags zu nutzen. Auch können mit diesen Daten natürliche Veränderungen der Wasserbilanzkenngröße Niederschlag identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass nur Zeitreihen verwendet werden, die sowohl in der Messmethode als auch in der räumlichen und zeitlichen Skala homogen sind. Die Abb. 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der gewässerkundlichen Einrichtungen im Sachgebiet Niederschlag und Lufttemperatur. Wie aus dieser Darstellung ersichtlich ist, wurden in den letzten 25 Jahren immer mehr Messstellen auf die automatische, digitale Erfassung umgestellt. Trotz dieser Umstellung auf eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung, ist die tägliche Kontrolle der Niederschlagssummen durch einen Beobachter unumgänglich.

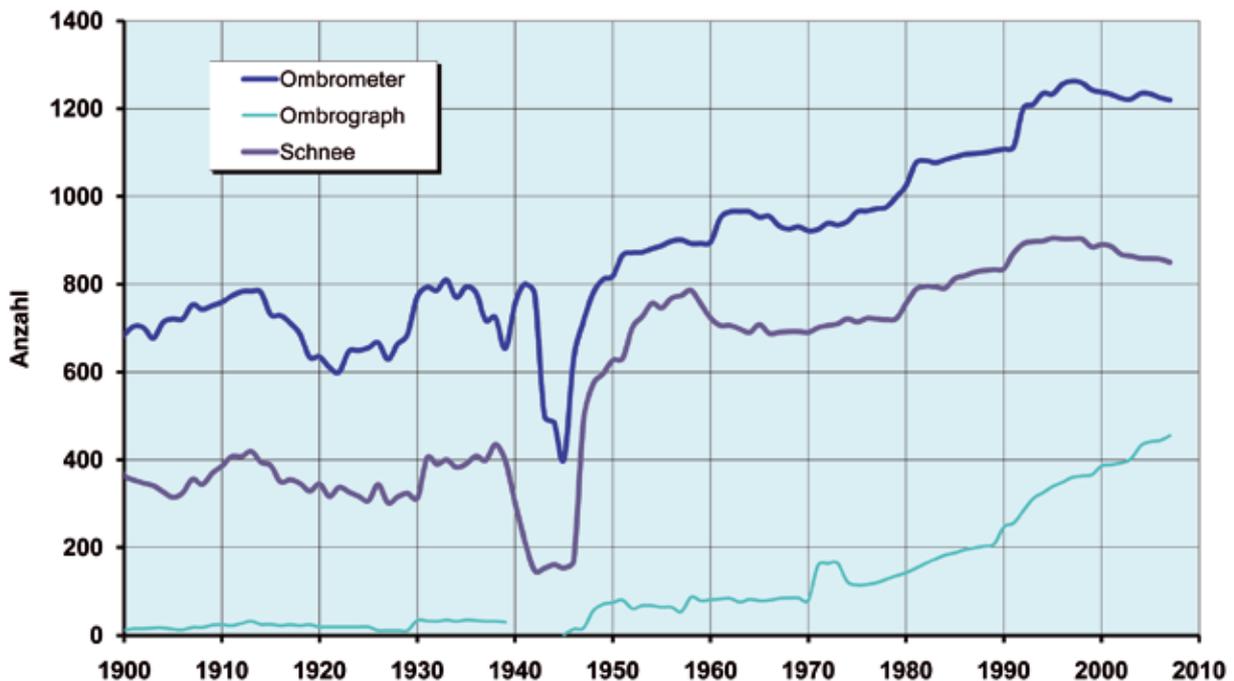


Abb. 2: Entwicklung der veröffentlichten gewässerkundlichen Einrichtungen – Niederschlag und Lufttemperatur.

Wassertemperaturdaten

Vor allem die Diskussion um den Klimawandel und dessen Auswirkung auf aquatische Ökosysteme verstärkte die Nachfrage nach Daten der Wassertemperatur an Österreichs Gewässern. Im Jahrbuch wird die Wassertemperatur in Form von Monatsmittelwerten mit der Angabe der Minima und Maxima dargestellt. Aufgrund der Nachfrage nach zeitlich höher aufgelösten Informationen wurde mit den Daten des Jahrbuches 2007 das Internetangebot auf Tagesmittelwerte umgestellt. Werden nun diese Daten als Basis für die Analyse von Veränderungen im Zusammenhang mit dem Anstieg der Lufttemperatur verwendet, ist auf jedem Fall die unterschiedliche Art

der Entstehung der Daten zu berücksichtigen. Generell wird die Wassertemperatur auf folgende drei Arten beobachtet:

- Mit dem Schöpfthermometer zu einem – im optimalen Fall – immer gleichen Zeitpunkt (ZP).
- Als analoge Aufzeichnung mit einem Schreibgerät. Da diese Schreibstreifen ursprünglich erst mit der Einführung von HyDaMS digitalisiert werden konnten, wurden die Daten als Tagesmittelwerte gespeichert.
- Digital mit einem Datensammler gespeichert, als zeitlich hochaufgelöste Zeitreihe.

Sowohl der Ablesezeitpunkt als auch die Entstehungsart hat sich im Verlauf der Messstellen-geschichte verändern. Im Hydrographischen Jahrbuch ist die Beobachtungsart mit einem für das jeweilige Jahr gültigen Hinweis – Angabe der Beobachtungszeit bzw. Ablesezeitpunkt und Tagesmittelwert TM bei Schreibgeräten – angegeben. Ändert sich die Erfassungsart an einer Messstelle, so ist dies nur durch den Vergleich in den entsprechenden Jahrbüchern festzustellen. Die digital zum Download erhältlichen Zeitreihen enthalten noch keinen Hinweis auf die Messstellenhistorie. Ab Mitte der 1990er-Jahre wurden viele Messstellen von der Uhrzeit-Ablesung (ZP) auf die kontinuierliche Erfassung mit Datensammler umgestellt (*siehe Abb. 3*). Wenn nun ein Beobachter seine Messung am frühen Vormittag (z. B. 08:00 Uhr) durchgeführt hat und die Messstelle auf Datensammlerbetrieb umgestellt wurde, so sind für eine Trendanalyse die aus dem Internet erhältlichen Eingangsdaten zu korrigieren. Der Vergleich der Trendergebnisse mit unkorrigierten bzw. korrigierten Daten hat ergeben, dass der Anstieg der meisten Wassertemperaturzeitreihen auch mit korrigierten Daten signifikant ist, sich jedoch um ca. 1/3 von 0,03 auf 0,02 °C/Jahr reduziert.

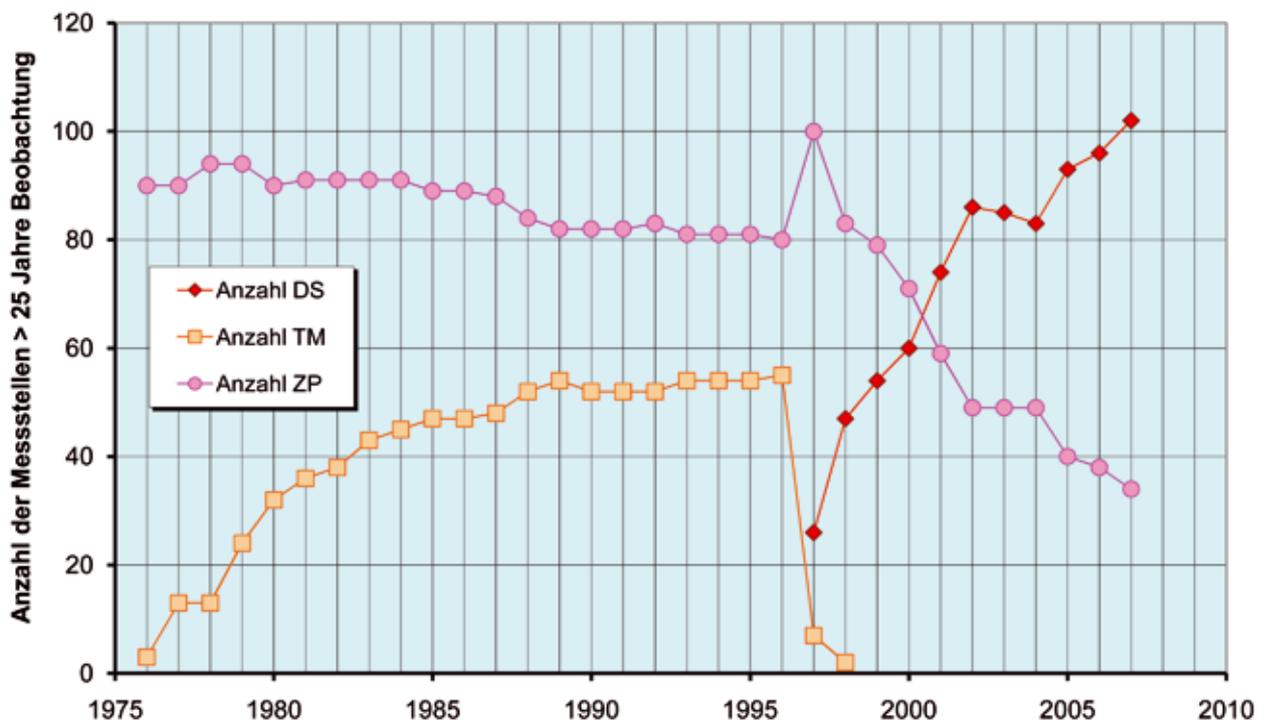


Abb. 3: Erfassung der Wassertemperatur – Unterschiede in der Messmethodik.

Veränderungen des Niederschlags in den vergangenen 50 Jahren

Der Alpenbogen scheint aufgrund seiner stark unterschiedlichen Topografie und der damit in Verbindung stehenden hohen räumlichen Varianz klimatischer Ausprägungen, eine Art Klimascheide zu sein. Die globalen Klimamodelle verwenden zur Berechnung des Klimas bis zum Ende des Jahrhunderts ein grobmaschiges Raster, dessen Größe über tausend Quadratkilometer beträgt. Auf dieser Skala lassen sich Aussagen für den Alpenraum nicht unmittelbar ableiten. Für lokale Anwendungen von Klimamodellen sind höher aufgelöste Simulationen notwendig. Das „dynamische Downscaling“ ist Thema der meteorologischen Modellierung. Vor allem was die Aussagen über Extremereignisse betrifft sind die bisher vorliegenden Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet und daher noch nicht als Entscheidungsgrundlage für zukünftige Maßnahmen brauchbar. Speziell die Frage, wie sich zukünftig kleinräumig, lokale Starkregen entwickeln werden, ist im Zusammenhang mit dem Naturgefahrenmanagement noch nicht beantwortet. Da die zeitlich, hochaufgelöste Erfassung des Niederschlages durch Datensammler erst seit 10–15 Jahren verstärkt eingesetzt wird, ist der Datenpool zur Trendanalyse begrenzt. Die Hydrographie in Österreich hat darauf reagiert und begonnen analoge Aufzeichnungen von Schreibgeräten als Grundlage für weitere Analysen zu digitalisieren.

Eine vom Hydrographischen Dienst in Kärnten durchgeführte Trendanalyse der Niederschlagsjahressummen von ca. 40 Messstellen mit durchwegs hundertjähriger Beobachtung hat ergeben, dass es in Kärnten im letzten Jahrhundert einen Trend zu weniger Niederschlag gegeben hat. Dies betrifft vor allem den Süden Kärntens (Drau-, Gail-, Klagenfurter Becken und südliches Lavanttal) wo Abnahmen bei den Niederschlagsmengen von 15 bis 25 Prozent gemessen wurden. Diese Erscheinung gilt nur für Kärnten, nicht für ganz Österreich. Nördlich des Alpenhauptkammes ist der Trend im letzten Jahrhundert eher steigend. Eine Ursache kann im Verhalten der Mittelmeertiefs gesehen werden. Ihre Wirkung auf Niederschläge in Kärnten ist anscheinend schwächer geworden (Moser, 2007).

Die Jahressummen des Gebietsniederschlages für Österreich zeigen im Zeitraum 1961 bis 2007 eine ausgeprägte Varianz um ein gleichbleibendes Mittel von ca. 1100 mm. Veränderungen im Ausmaß eines signifikanten Trends wurden im österreichischen Donauebiet bis zur Marchmündung mit einer Zunahme und im Raab- und Rabnitzgebiet mit einer Abnahme festgestellt (*siehe Abb. 4*).

Die Tagesmittelwerte des Abflusses an der Donau seit 1900

Zur Identifizierung von Entwicklungen und Veränderungen im Wasserkreislauf ist neben den Extremsituationen auch das hydrologische Gesamtverhalten von Fließgewässerabflüssen zu berücksichtigen. Um saisonale Veränderungen im Abflussregime ausmachen zu können ist der innerjährliche Abfluss mit den charakteristischen Schwankungen des Mittelwertes, gemeinsam mit den extremen Hoch- und Niederwasserkennwerten zu betrachten. Die Signifikanz der Aussage in Bezug auf durch den Klimawandel verursachte Veränderungen kann durch die Verwendung vieljähriger Zeitreihen der Tagesmittelwerte verbessert werden. Auch wenn der hydrographische Dienst in Österreich seit über 100 Jahren beobachtet, sind Zeitreihen der Tagesmittelwerte im Wesentlichen erst seit 1951 digital verfügbar. Um nun die Entwicklung des Abflussregimes der österreichischen Donau in den vergangenen 100 Jahren dokumentieren zu können, wurden die für die Pegel Wien-Nußdorf und Stein-Krems (*Abb. 5*) seit 1897 in den Archiven der Hydrographie vorhandenen analogen Aufzeichnungen digital erfasst und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen.

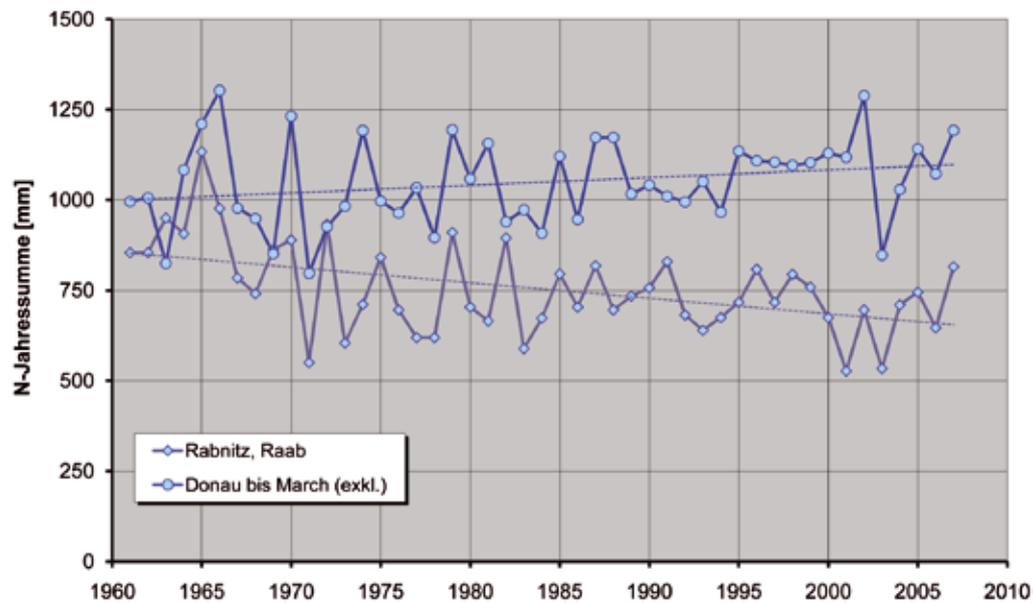


Abb. 4: Jahresniederschlagssummen im österreichischen Donauegebiet bis zu March und im Raab- und Rabnitzgebiet.

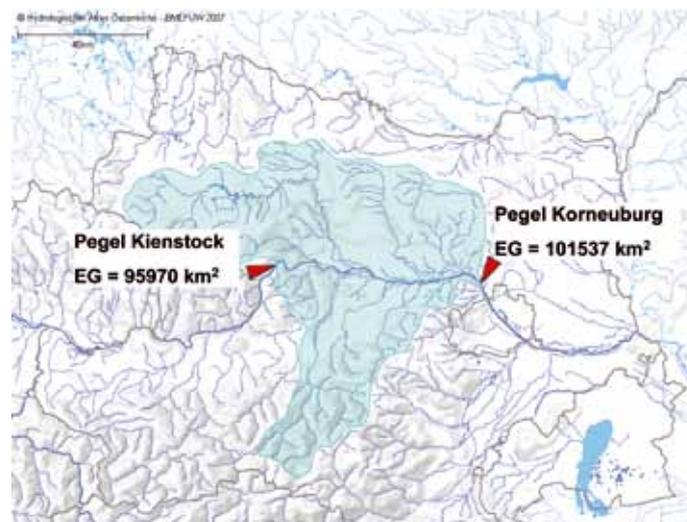


Abb. 5: Karte der Messstellen Wien/Korneuburg bzw. Kienstock an der Donau.

Sowohl die energiewirtschaftliche Nutzung als auch die Schutzwasserwirtschaft hat den Verlauf der Donau im 20. Jahrhundert und damit auch den einen oder anderen Pegelstandorte verändert. Bei der Zusammenführung von Zeitreihen unterschiedlicher Pegelstandorte sind neben der Pegelgeschichte auch Änderungen in der Messmethode zu berücksichtigen.

Die aus dem Archiv rekonstruierten Daten der Messstellen Wien-Nußdorf und Stein-Krems wurden mit den jüngeren Zeitreihen der Messstellen Wien-Korneuburg und Kienstock bis 2007 verlängert und auf Homogenität geprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die Differenzen der Jahresmittelwerte zwischen Krems und Wien einen auffälligen und vorerst nicht erklärbaren Sprung um das Jahr 1950 aufweisen. Der Mittelwert der Differenz der Jahresmittelwerte betrug bis 1950 $110 \text{ m}^3/\text{s}$ und von 1950 bis 2007 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 6).

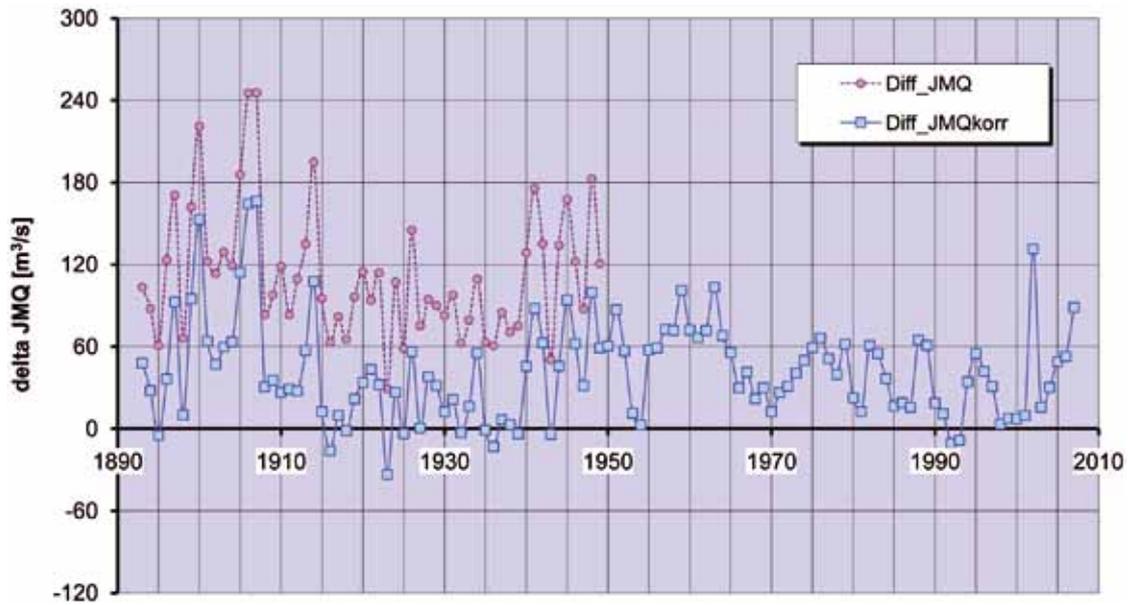


Abb. 6: Differenzen der Jahresmittelwerte des Abflusses an der Donau zwischen den Pegeln Wien und Krems.

Die Prüfung der jährlichen Differenzzeitreihe auf ein sprunghaftes Verhalten weist eine signifikante Änderung im Jahr 1949 auf. In einer ersten Analyse war zu klären, welches Differenzniveau durch die beobachteten Zuflüsse des Zwischeneinzugsgebietes und der daraus abgeleiteten Spenden plausibel erscheint. Mit den seit 1951 verfügbaren Daten der Jahresmittelwerte an den Zubringern zwischen Krems und Wien konnten sowohl die Jahresmittelwerte von Stein-Krems als auch von Wien-Nußdorf – vom jeweils anderen Pegel – mit maximalen Differenzen von -3% bis 5% rekonstruiert und so das seit 1950 beobachtete Differenzniveau bestätigt werden (Abb. 7).

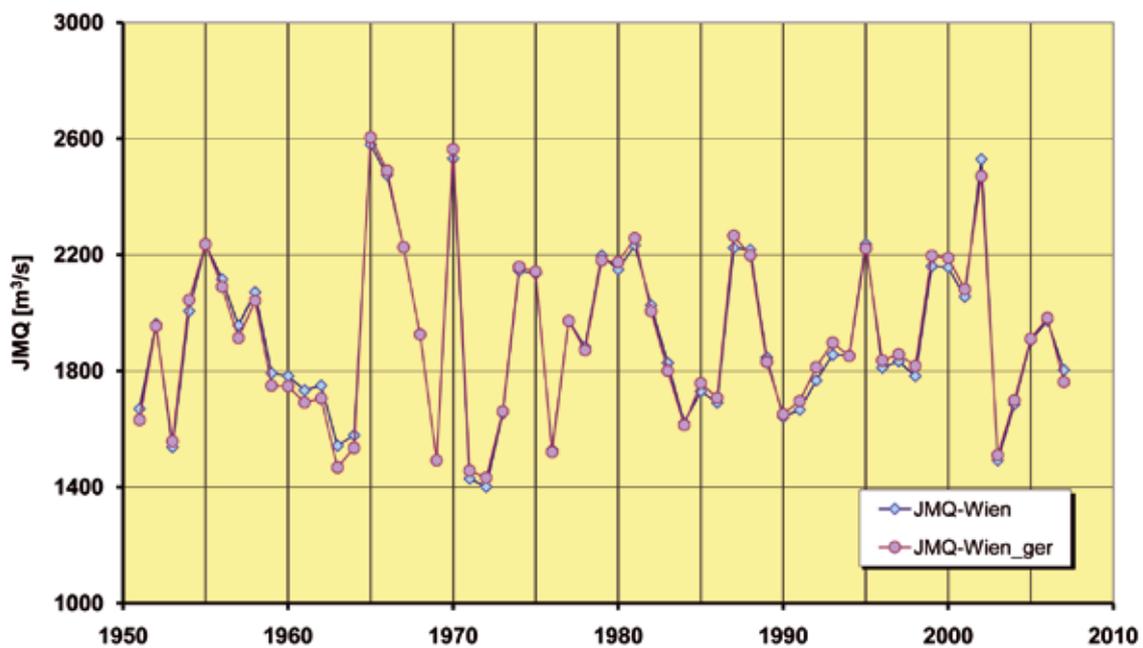


Abb. 7: Berechnung der Jahresmittelwerte (JMQ) des Abflusses an der Donau bei Wien mit den JMQ des Pegels Kienstock und den JMQ des Zwischeneinzugsgebietes.

Die nächste Frage war, ob die Zeitreihe Stein-Krems oder jene von Wien-Nußdorf von 1900 bis 1949 zu korrigieren ist. Aufgrund der von Böhm (BMLFUW, ÖWAV, 2008) im Donaeinzugsgebiet seit 1900 nachgewiesenen Zunahme der Jahresniederschlagssumme oberhalb Wiens und der aus den vorliegenden Aufzeichnungen nicht eindeutigen Zuordnungen des Abflusses des Donaukanals von 1900 bis 1950 wurde entschieden, die erfassten Abflüsse am Pegel Wien-Nußdorf zu korrigieren und für die weiteren saisonalen Auswertungen zu verwenden.

Das Abflussregime der Donau in Österreich seit 1900

Wie die meisten größeren Ströme in Europa, weist auch die Donau ein komplexes Abflussregime mit einem durch die Schmelzhochwasser im Mai und die Niederschlägen im Juni verursachten Maximum des Pardé-Koeffizienten ($SK = MQ_{\text{Monat}} / MQ_{\text{Jahr}}$) auf (Abb. 8).

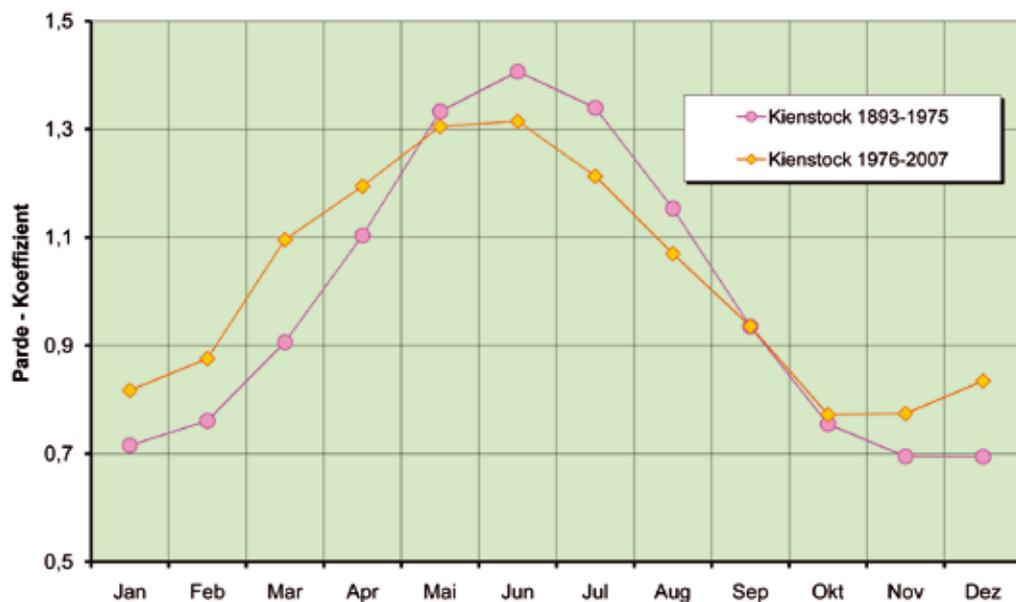


Abb. 8: Vergleich der Pardé-Koeffizienten am Pegel Kremes-Stein/Donau in den Perioden 1893–1975 und 1976–2007.

Die größten beobachteten Hochwasser ereigneten sich im Juli und August. Hochwasserereignisse mit maximalen Tagesmittelwerten von mehr als $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ sind jedoch auch schon im Februar, März und im September aufgetreten. Nur im April und im Mai wurden in den vergangenen mehr als 100 Jahren keine Ereignisse mit Tagesmittelwerten größer $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert. In den Wintermonaten November bis Februar finden sich die niedersten Abflüsse. Im Jahr 1965 wurde in Kremes und Wien das höchste, im Jahr 1921 – ebenfalls an beiden Messstellen – das niederste Jahresmittel gemessen (Abb. 9).

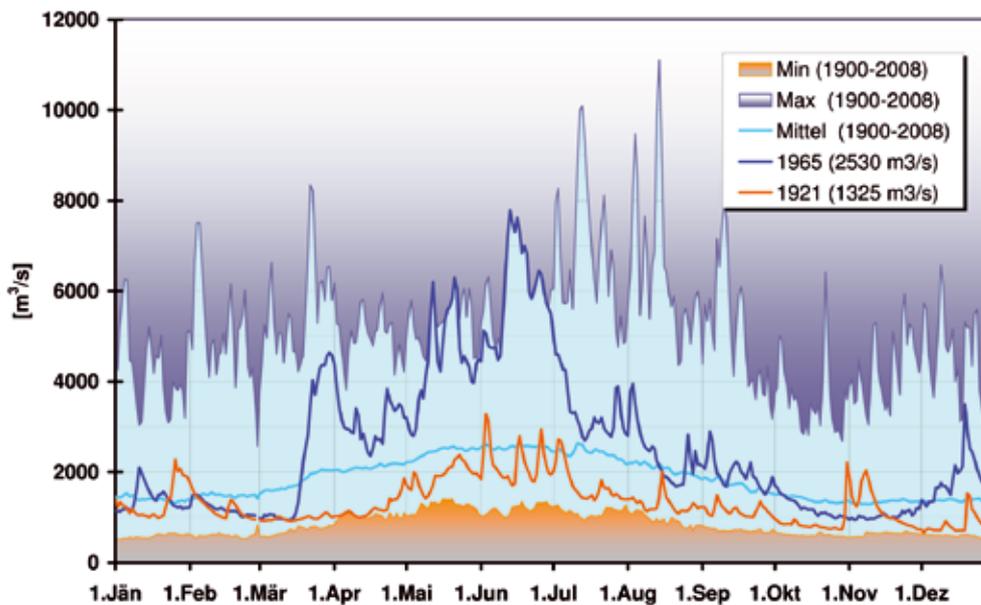


Abb. 9: Schwankungsbereich der Tagesmittelwerte am Pegel Krems-Donau von 1900–2008.

Veränderungen in den Abflüssen der Donau seit 1900

Niederwasser

Aufgrund von Ergebnissen der Klimaszenarien geht man davon aus, dass Trockenwetterperioden in Zukunft häufiger und intensiver ausfallen werden. Dies könnte in niederschlagsarmen Regionen zu einer Verknappung des natürlichen Wasserdargebots führen. Die Einordnung eines Niederwasserereignisses nach hydrologisch-statistischen Methoden ist ungleich schwieriger als die Einschätzung eines Hochwasserereignisses, das in der Regel zeitlich klar abgegrenzt und einem bestimmten Niederschlagsereignis zugeordnet werden kann. Die absoluten Niederwasserabflüsse an den Pegeln sind als Kenngröße nur bedingt verwendbar, da die Daten an kleinen Gewässern oft anthropogen beeinflusst sind und der Fehler der Wasserstands-Durchflussbeziehung (Pegelschlüssel) bei natürlichen Pegelprofilen im Bereich des absoluten Minimums der Wasserführung beträchtlich sein kann. Im Vergleich zu dokumentierten Hochwasserreihen gibt es für die Niederwasseranalyse auch weniger lange Zeitreihen mit zuverlässigen Daten.

Zur statistischen Analyse wird daher auch häufig das NMQ_{nT} – das niedrigste, arithmetische Mittel des Durchflusses an n aufeinander folgenden Tagen – verwendet. Diese Kenngröße ist zuverlässiger und robuster gegenüber kurzfristigen Beeinflussungen. Mit den rekonstruierten Tagesmittelwerten des Abflusses der Donau bei Krems und Wien wurden NMQ_{7T} -Werte gerechnet und saisonal zusammengefasst. Die Abb. 10 zeigt die Entwicklung der niedersten in den Winter- und Sommermonaten beobachteten NMQ_{7T} -Daten am Pegel Stein-Krems. In den Wintermonaten ist im 20. Jahrhundert eine mehr oder weniger kontinuierliche Zunahme ersichtlich, während die Kenngröße im Sommer bis 1975 um ein mittleres Niveau von knapp über 1500 m^3/s variiert und danach bis 2008 auf unter 1300 m^3/s reduziert wurde (Abb. 10). Sowohl der Pegel Kienstock/Stein-Krems als auch der Pegel Wien zeigt ein ähnliches Verhalten. Da Perioden mit geringen Abflüssen an der Donau vorwiegend in den Wintermonaten auftreten und diese in der Vergangenheit eher zugenommen haben, sind keine Veränderungen hinsichtlich der Dauer dieser

Niederwasserperioden erkennbar. Auch die Trendanalyse mit der Unterschreitungsdauer saisonal angepasster Schwellenwerte lässt keine signifikante Änderung erkennen.

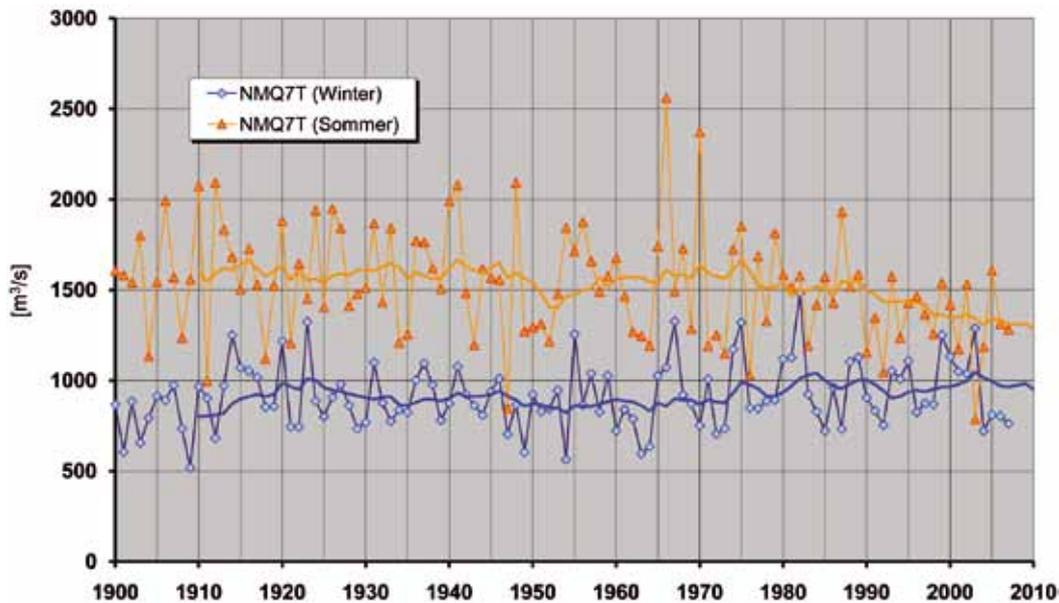


Abb. 10: Veränderung der kleinsten $MQ7_T$ -Werte im Winter und im Sommer am Pegel Kienstock/Donau.

Mittelwasser

Eine der auffälligsten Veränderungen im Abfluss der Donau zeigt sich in den Monatsmittelwerten der Vergleichszeiträume 1893–1975 und 1976–2007. Für diese Zeiträume wurden die Pardé-Koeffizienten gerechnet und miteinander verglichen. Die Mittelwerte in den Sommermonaten Juni, Juli und August zeigen eine deutliche Reduktion, der eine ebenso deutliche Zunahme in den Wintermonaten November bis Februar und im März und April gegenüber steht (Abb. 8). Dies würde die in vielen Klimaszenarien dargestellte Tendenz zu höheren Abflüssen im Winter und die Reduktion in den Sommermonaten bestätigen. Bemerkenswert ist auch die ausgeprägte Veränderung im März, die wahrscheinlich durch die Kombination von früher einsetzender Schneeschmelze mit dem zunehmend höheren Anteil an Niederschlag in flüssiger Form erklärt werden kann.

Hochwasser

Die klassische, statistische Trendberechnung ist eine Methode zur Analyse von Zeitreihen beobachteter Parameter hinsichtlich der in dieser Information enthaltenen Beharrung oder Änderung. Mit den Jahreshöchstwerten des Abflusses von 16 Abflussmessstellen in Österreich – für die mehr als 75 Jahre Beobachtungszeit zur Verfügung standen – wurde eine derartige Trendberechnung durchgeführt. Die Messstellen an der Donau, der Salzach und jene an der Gail zeigen einen signifikanten Anstieg der Jahresmaxima, alle übrigen ein unauffälliges, eher gleich bleibendes Verhalten. Ein im Auftreten (räumlich wie zeitlich) einheitliches Muster, sowie ein gesicherter Zusammenhang mit der seit Mitte der 1970er-Jahre merkbaren, raschen Temperaturänderung konnte nicht abgeleitet werden.

Vor allem bei den Donauzubringern ab einer Größe von 1500 km² überlagern die anthropogenen Veränderungen den Einfluss der Klimaänderung. Das vieljährige Hochwasserkollektiv (1828–2008) der Donau an den Pegeln Wien und Kienstock zeigt eine signifikante Steigerung der Jahreshochwasserwerte (Abb. 11). Der lineare Trend ergibt einen Anstieg von ca. 90m³/s pro Dekade. Verantwortlich dafür ist nicht die Zunahme der extremen Hochwasser, als vielmehr das häufigere Auftreten von Ereignissen in der Größenordnung eines HQ₅–HQ₁₀. Als Erklärung dafür wird der Ausbau der Donau zur Nutzung der Wasserkraft und die damit verbundene Reduktion von natürlichen Retentionsflächen zur Diskussion gestellt.

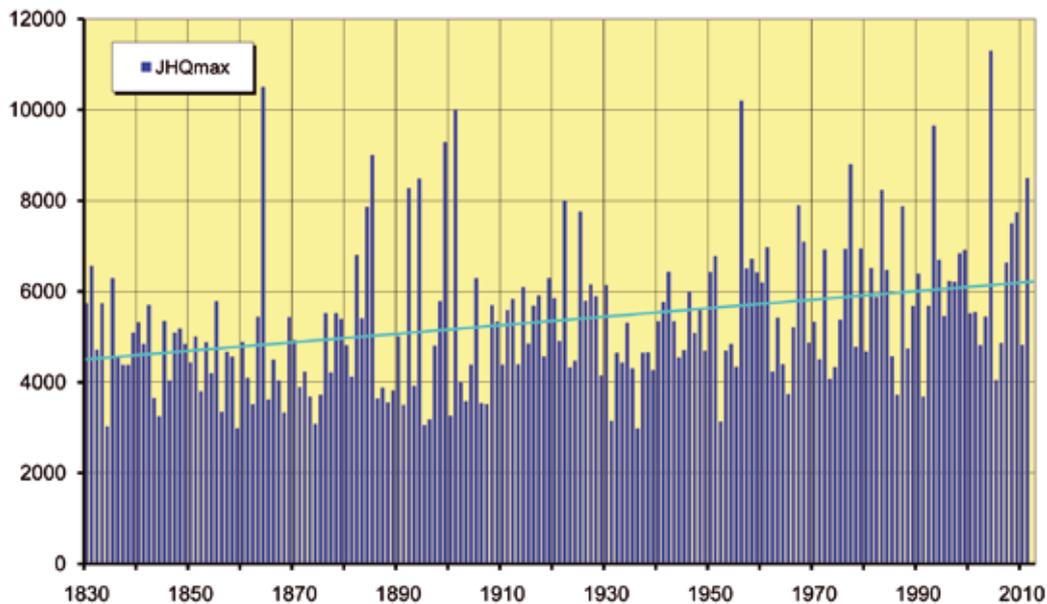


Abb. 11: Die maximalen Jahresabflüsse (JHQmax) am Pegel Stein-Krems/Donau seit 1830.

Die Hydrographie Österreichs hat eine lange Tradition sowohl in der Organisation als auch in ihrem Bestreben die Grundlagen für eine funktionierende Schutzwasserwirtschaft zu liefern. Die Ergebnisse der traditionellen Hochwasserstatistik wie sie seit den 1970er-Jahren angewandt wird, sind nur dann brauchbar, wenn die verwendeten Eingangsdaten repräsentativ für die Varianz des Abflussgeschehens im betrachteten Gewässerabschnitt sind. Dabei bedeutet jedes beobachtete Ereignis einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Die Analyse extremer Ereignisse und die in diesem Zusammenhang geforderte Angabe einer Größenordnung – ausgedrückt durch die Auftretswahrscheinlichkeit – ist eine besondere Herausforderung für die Hydrologie und auch eine Verantwortung angesichts der mit diesen Kenngrößen dimensionierten Maßnahmen des Hochwasserschutzes. Die mit der angewandten, traditionellen Methode der Extremwertstatistik verbundene Unsicherheit bei der Einschätzung der Auftretswahrscheinlichkeit, wird verstärkt vor dem Hintergrund des Klimageschehens und der damit erwarteten, aber in der Größenordnung nicht abzuschätzenden Wirkung auf das Abflussgeschehen.

Die extremwertstatistische Auswertung langer Beobachtungsreihen an Messstellen größerer Gewässer in Österreich lässt auch bei Berücksichtigung der jüngsten Ereignisse 2002, 2005, 2006 und 2009 keine besonderen Auffälligkeiten erkennen. Am Pegel Kienstock/Donau ergibt die periodische Verlängerung der Zeitreihe um jeweils 25 Jahre hinsichtlich des Kennwertes HQ₁₀₀ einen

homogenen Verlauf und immer einen wahrscheinlichen Wert im Bereich der Messunsicherheit (Abb. 12).

Davon abweichend, wurden in kleineren Einzugsgebieten – 2002 am Kamp, 2005 am Lech, der Bregenzerache und an der Sanna, 2006 an der Thaya in Niederösterreich – Abflussspitzen beobachtet, die außerhalb der üblichen theoretischen Verteilungsfunktionen und deren Konfidenzintervalle liegen. Ob diese Größen bereits einen zukünftigen Wandel signalisieren oder als zufällig beobachtete und die Grundgesamtheit repräsentierende „Ausreißer“ zu bewerten sind, wird eine der Aufgaben der Hydrologie in der Zukunft sein.

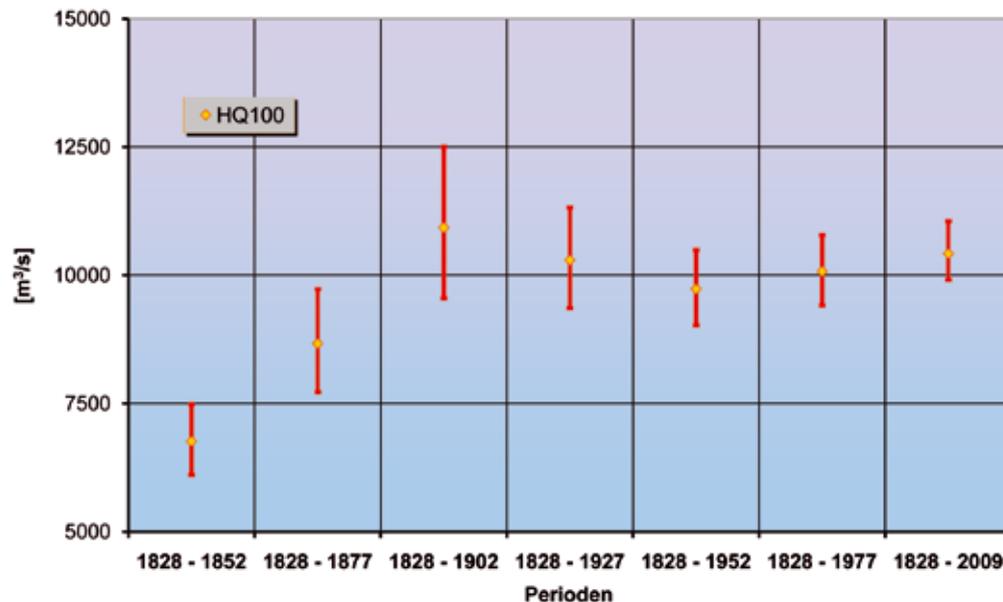


Abb. 12: Veränderungen der Extremwertstatistik – mit Angabe des Konfidenzintervalls – bei einem um jeweils 25 Jahre verlängerten Datenkollektiv am Pegel Stein-Krems/Donau.

Zusammenfassung

Rückblickende Analysen der Parameter der Wasserbilanz haben den Vorteil, dass sie auf Beobachtungen basieren. Der Nachteil ist, dass mit identifizierten und als signifikant erkannten Trends nur begrenzt Vorhersagen möglich sind. Für Prognosen in die Zukunft werden globale Zirkulationsmodelle verwendet, die aber nur einen grobmaschigen Raster berücksichtigen und aus diesem Grund für lokale Aussagen nur schwer heranzuziehen sind. Dieser Aufsatz gibt einen Überblick über hydrographische Daten, die für Veränderungsanalysen zur Verfügung stehen. Nicht nur die Messwerte sind geprägt durch eine natürliche Varianz, auch deren Entstehungsgeschichte und die Messmethodik kann sich geändert haben. Vor allem bei der nachträglichen Verlängerung von Zeitreihen ist daher die Messstellengeschichte besonders zu beachten. Am Beispiel der digitalen Erfassung historischer Abflusszeitreihen der Donau wird auf die Notwendigkeit und auf den Aufwand den die Plausibilitätsprüfung und Korrektur erfordert, eingegangen.

Das Abflussregime der Donau in Österreich hat sich in den letzten 100 Jahren verändert. Vor allem in der saisonalen Umverteilung der Monatsmittelwerte vom Sommer in den Winter zeigen sich Merkmale von Folgen des Klimawandels, die die Ergebnisse der globalen Klimamodelle

bestätigen. Die Zunahme der Jahresmaxima ist hingegen nicht eindeutig von anthropogenen Beeinflussungen, wie den Ausbau der Wasserkraftnutzung an der Donau zu trennen. Obwohl sich die Niederwasserkenngroße NMQ_{7_T} im Sommer signifikant reduziert hat, konnten Veränderungen was die Dauer von Niederwasserperioden betrifft, nicht festgestellt werden.

Literatur

- BMLFUW (2007) Hydrologischer Atlas Österreichs, 3. Lieferung. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, ISBN 3-85437-250-7.
- BMLFUW, ÖWAV (2008) Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft, Wien, Böhm R., Harte und weiche Fakten zum Klimawandel – ein Überblick.
- Moser J., (2007) Klimawandel und mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Internetartikel, Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 18 – Wasserwirtschaft / Hydrographie.

Anschrift des Autors:

MR DI Reinhold Godina
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt
Marxergasse 2, 1030 Wien
E-Mail: reinhold.godina@lebensministerium.at

Klimawandel und Gletscherschwund

Michael Kubm

1 Die Beziehung zwischen Klima und Gletschern

Gletscher in allen Gebirgen der Erde reagieren sehr empfindlich auf Änderungen des Klimas. Ihr Wachsen und Schwinden wird von mehreren klimatischen Größen gesteuert: Schneefall und Verteilung durch den Wind bestimmen die Akkumulation, Temperatur, Sonnenstrahlung und Luftfeuchte bestimmen den Energiehaushalt und damit das Schmelzen oder Verdunsten des Eises. Im Firnbecken oder Akkumulationsgebiet eines Alpengletschers bleibt auch unter den heutigen, warmen Bedingungen jährlich ein Überschuss, der in den Gletscher einsinkt, sich von Schnee zu Firn zu Eis verwandelt und durch das Fließen des Eises in eine Zone hinuntergebracht wird, in der genug Energie zu seinem Schmelzen vorhanden ist.

Die Reaktion eines Gletschers auf den Klimawandel hängt also auch von der Eisbewegung, das heißt, von der Steilheit und Dicke des Eises und der Form des Gletscherbetts ab, weiters von seiner Länge, Höhenlage und Exposition zur Sonne. Verschiedene Gletscher reagieren also auf eine einheitliche Klimaänderung individuell verschieden.

In den Alpen hat es im 20. Jahrhundert zwei kleine Gletschervorstöße gegeben, um 1920 und um 1980. Das ist insofern bemerkenswert, als in dieser Zeit das atmosphärische CO₂ ununterbrochen zugenommen hat, und zeigt, dass Gletscher auf mehr als nur auf den Treibhauseffekt reagieren. Allgemein haben aber in den vergangenen Jahrzehnten die zunehmenden Temperaturen den Gletschern arg zugesetzt: seit 1952 hat zum Beispiel der Hintereisferner im hinteren Ötztal im Mittel über seine ganze Fläche ca. 28 m Eisdicke verloren und der schreckliche Sommer 2003 hat den Alpengletschern zwischen 2 und 3 m Eisdicke gekostet. Radarmessungen zeigen, dass die größten österreichischen Gletscher noch über 200 m dickes Eis als Reserve haben, viele kleinere sind jetzt schon durchlöchert, manche ganz verschwunden.

Die Massenbilanz des Eises stellt die Verbindung zwischen Klima, Gletscher und Schmelzwasserabfluss her. Wie bei der Bilanz eines Wirtschaftsunternehmens ist die Massenbilanz eines Gletschers die Gegenüberstellung von Einnahmen und Ausgaben, die in der Glaziologie als Akkumulation (+) und Ablation (-) bezeichnet werden.

Zur Akkumulation gehören der Schneefall, die Windverwehung nach dem Niederschlag und die Verfrachtung von Schnee durch Lawinen. Der Wind ist damit eine für den Gletscheraufbau wichtige Klimagröße: Nach dem Niederschlag wird Schnee von den Kämmen und Steilhängen der Gletscherumgebung weggenommen und durch Wind und Lawinen in den Gletschermulden abgelagert – in vielen Fällen wird der eigentliche Niederschlag dadurch verdoppelt, und es ist klar, dass die Geländeform eine wichtige Randbedingung für die Existenz von Gletschern ist. Da sich die Geländeform aber mit der Zeit nicht ändert, sind Gletscheränderungen ganz auf Klimaänderungen zurückzuführen.

Die Ablation des Eises besteht überwiegend aus Schmelzen, nur zum geringen Teil aus Verdunsten oder Winderosion. Schmelzen braucht Energie (330 Joule pro Gramm Eis), die von den atmo-

sphärischen Energieflüssen geliefert werden muss: Sonnenstrahlung, Infrarotstrahlung, fühlbare und latente Wärmeflüsse.

Die Sonnenstrahlung ändert sich stark mit der Tages- und Jahreszeit, sie kann im Sommer 1.000 Watt/m² erreichen, davon wird aber ein Großteil wieder reflektiert. Das Reflexionsvermögen (die so genannte Albedo) der Oberfläche beträgt rund

- 80 % bei Neuschnee, d. h. nur 20 % werden absorbiert,
- 60 % bei Sommerfirn,
- 40 % bei schneefreiem Gletschereis, d. h. 60 % werden absorbiert.

Ein Neuschneefall im Sommer reduziert also die zum Schmelzen verfügbare Energie der Sonnenstrahlung auf ein Drittel gegenüber schneefreiem Eis, woran man sieht, dass auch nur wenige cm Neuschnee im Sommer für den Gletscher viel wichtiger sind als die gleiche Menge im Winter. Die Alpengletscher reagieren deshalb auch mehr auf die Sommerwitterung als auf die des Winters, anders ist es bei Gletschern in maritimem Klima wie z. B. in Norwegen, die mehr auf den Winterschnee angewiesen sind.

Die Infrarotstrahlung von der Eisoberfläche ist bei wolkenlosem Himmel stärker als die von der Atmosphäre zur Oberfläche, sodass das Eis in klaren Nächten gefroren bleiben kann, auch wenn die Lufttemperatur über Null ist.

Die turbulenten Flüsse von so genannter fühlbarer Wärme sind bei positiver Lufttemperatur von der Luft zum Eis gerichtet, die der sogenannten latenten Wärme hängen von der Luftfeuchtigkeit ab (negativ bei Verdunstung, also trockener Luft). Da sehr selten Messwerte aller dieser Energieflüsse zur Verfügung stehen, da aber die Temperatur sehr gut mit der Sonnenstrahlung korreliert (viel Sonne = hohe Temperaturen), kann man für das Schmelzen von Eis das Tagesmittel der Lufttemperatur als Kenngröße verwenden: 1 °C entspricht ca. 5 mm Eis, zum Beispiel kann an einem Sommertag mit der Mitteltemperatur von 8 °C im Lauf des Tages 4 cm Eis schmelzen.

2 Der Zusammenhang zwischen Klima und Gletschergröße auf ersten Blick

In der Massenbilanz gibt es also zwei Komplexe, die die Beziehung von Gletscher und Klima gut charakterisieren: Niederschlag und Wind fördern das Gletscherwachstum, Temperatur und Strahlung fördern das Schmelzen. Das bedeutet eine prinzipielle Schwierigkeit in der klimatischen Interpretation vergangener Gletschergrößen, denn ein Gletschervorstoß kann entweder auf eine Zeit mit niedrigeren Temperaturen oder auf höheren Niederschlag folgen. Ohne Zusatzinformation kann diese Entscheidung nicht getroffen werden, wobei für länger zurückliegende Vorstöße Pollen oder Baumringe zu Hilfe genommen werden können.

Seit etwas mehr als 200 Jahren gibt es in den Alpen Temperaturmessungen, seit 150 Jahren auch Niederschlagsmessungen, die die oben geforderte Information objektiv liefern. Die alpinen Daten passen auf ersten Blick oder in erster Näherung zum beobachteten Gletscherschwund: Seit dem Gletscherhöchststand von 1850–1860 hat der Jahresniederschlag bis heute um rund 10 % abgenommen, die Jahresmitteltemperatur ist in den Alpen um mehr als 1,5 °C gestiegen.

In der gleichen Zeit ist zum Beispiel der gut dokumentierte Hintereisferner im Ötztal wie folgt zurückgegangen:

Länge	ca. 1850: 10,3 km	heute: 7,3 km
Fläche	14,1 km ²	8,8 km ²
Volumen	1,5 km ³	0,5 km ³

3 Details des Archivs – nichtlineare Zusammenhänge

Der langfristige Trend des Gletscherrückgangs stimmt also mit dem langfristigen Temperaturanstieg gut überein. Auf zweiten Blick, bei näherem Hinschauen im Maßstab von Jahrzehnten oder Jahren, ist der Zusammenhang zwischen Klimagrößen und Gletscherverhalten nicht mehr so klar.

Bei dieser Zeitskala wird klar, dass das Klima/Gletscher-Verhältnis nicht von einzelnen Klimaparametern wie Temperatur oder Niederschlag, sondern von Kombinationen dieser Parameter, wie zum Beispiel den schon erwähnten Schneefällen im Sommer, abhängt, und dass dabei nicht nur zwei, sondern eine ganze Reihe von Parametern (Niederschlag und Wind, Temperatur und Feuchtigkeit, Strahlung und Wolken und Albedo usw.) wirksam werden.

Seit dem Gletscherhöchststand, der in verschiedenen Gebieten zwischen 1850 und 1860 aufgetreten ist, hat es mehrere Episoden gegeben, in denen die Mehrzahl der Alpengletscher entweder vorgestoßen ist oder ihre Fließgeschwindigkeit erhöht hat:

Höchststand	1850–60	deutliche Moränen
Vereinzelte Vorstöße	1890–1900	
Allgemeiner Vorstoß	1920	deutliche Moränen
Beschleunigte Bewegung	1943	
Allgemeiner Vorstoß	1980	Moränen bei mittelgroßen Gletschern
Starker Eisverlust seit 1982.		

Die Rekonstruktion des Klimas aus dem Archiv der Gletscherstände wird weiter dadurch kompliziert, dass die Geschwindigkeit der Eisbewegung bei Vorstößen sehr rasch zunehmen kann, und zwar in einem Ausmaß, das beim heutigen Stand des Wissens nur ungefähr berechnet werden kann. Beispiele für mittlere Geschwindigkeiten und Extremwerte können wieder für den Hintereisferner gegeben werden, für den seit 1894 jährliche Messungen der Eisbewegung vorliegen.

Vor 1915:	15–30 m/Jahr
1919	125 m/Jahr
1930	7 m/Jahr
1943	55 m/Jahr
1965	15 m/Jahr
1978	45 m/Jahr
heute	5 m/Jahr.

Es scheint, dass in den beschleunigten Phasen das Eis sich nicht nur selber rascher verformt, sondern auch rascher über den Untergrund gleitet, weil sich das Gletscherbett unter erhöhtem Druck anders deformiert. Das Ausmaß dieser Beschleunigungen kann beim heutigen Stand des Wissens nicht genau berechnet werden, sodass hier noch ein zweites Fragezeichen in der Kausalkette Klima – Gletschergröße steht:

Temperatur & Niederschlag → Massenbilanz → Eisdynamik → Gletscherlänge, Moräne.

Diese Kette ist von links nach rechts in gewissen Grenzen berechenbar, liest man aber im Archiv der Gletscherlängen von rechts nach links, um ein früheres Klima zu rekonstruieren, dann hat man mit der Eisdynamik und mit der Entscheidung Temperatur oder Niederschlag prinzipielle Schwierigkeiten.

Die langfristige Entwicklung lässt sich daher auch nicht quantitativ berechnen, der starke Gletscherschwund der letzten 150 Jahre passt aber qualitativ sehr gut zum Temperaturanstieg, der in den Alpen etwa doppelt so stark war wie der globale Mittelwert. Nach Messungen und Modellrechnungen entspricht eine Erwärmung um 1 °C einem Abschmelzen um 1 m Eis pro Jahr im Durchschnitt der Gletscherfläche.

4 Beispiele zum Gletscherschwund in Jahrhunderten und Jahrzehnten

Nach diesem Überblick über die Klima – Gletscher – Beziehung soll die Entwicklung seit 1894, dem Beginn der internationalen Zusammenarbeit in der Gletscherforschung, mit Beispielen und Fakten belegt werden (siehe die Bilder auf den folgenden Seiten).



1894

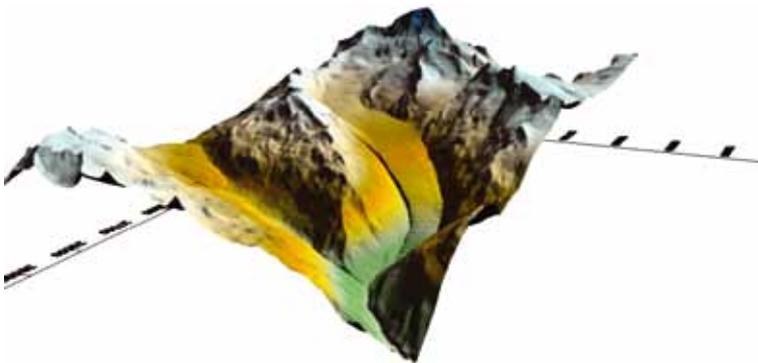


(Norbert Span, 2003)

1920



1939



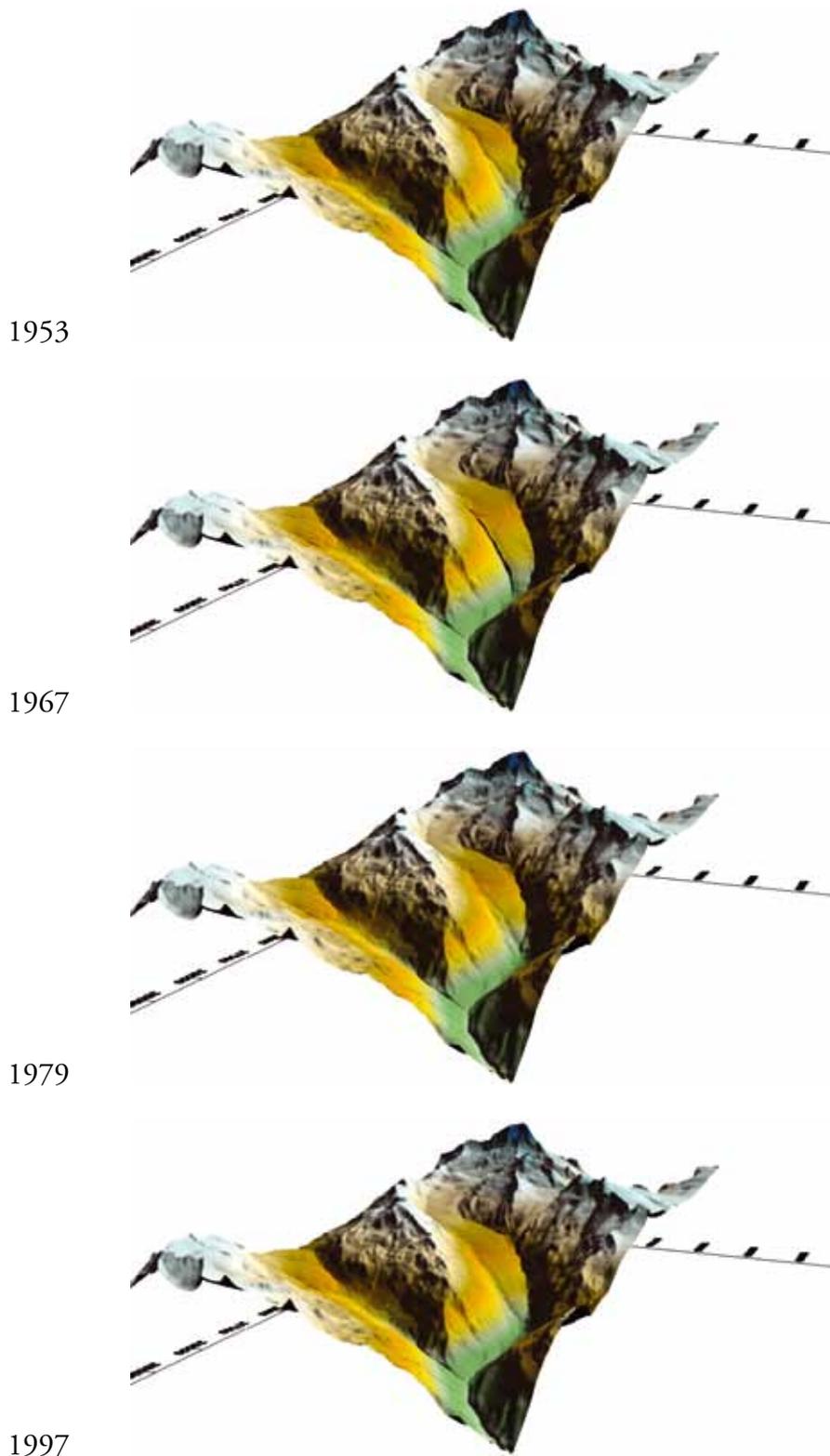


Bild 1 bis 8: Der Hintereisferner im südlichsten Ötztal mit dem Gipfel der Weißkugel im heißen Sommer 2003. Aus dem gleichen Blickwinkel eine Reihe von Geländemodellen, die aus präzisen Kartendarstellungen digitalisiert wurden. Auffällig ist die rasche Abnahme der Zunge und das vergleichsweise stationäre Verhalten des Firnbeckens. Die Farben geben die Höhe über dem Meer an (Bearbeitung: Dr. Norbert Span)

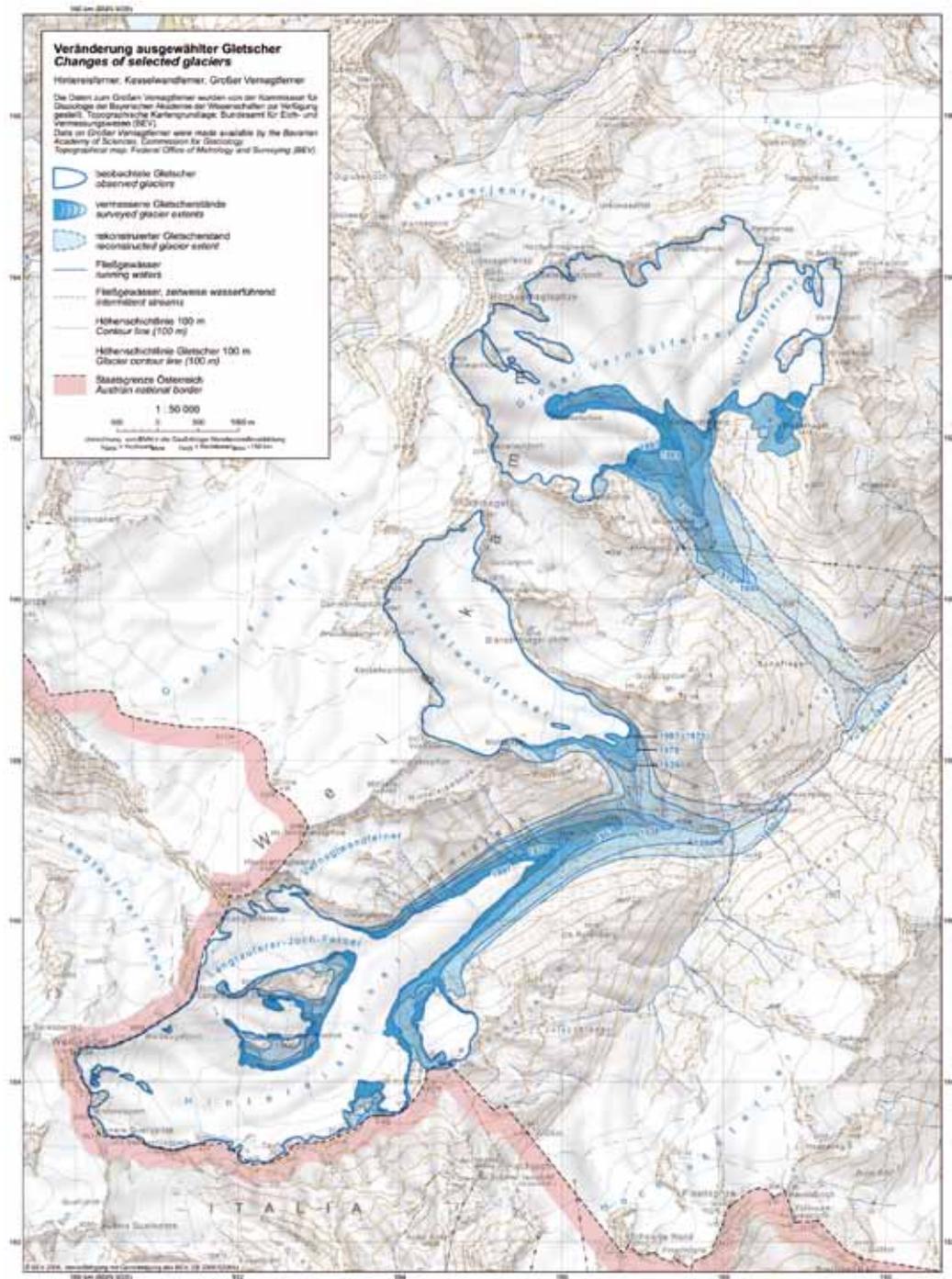


Bild 9: Die Veränderungen der drei besonders gut dokumentierten Gletscher Hintereisferner, Kesselwandferner und Vernagtferner seit ihrem Höchststand im Jahr 1848. Aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs

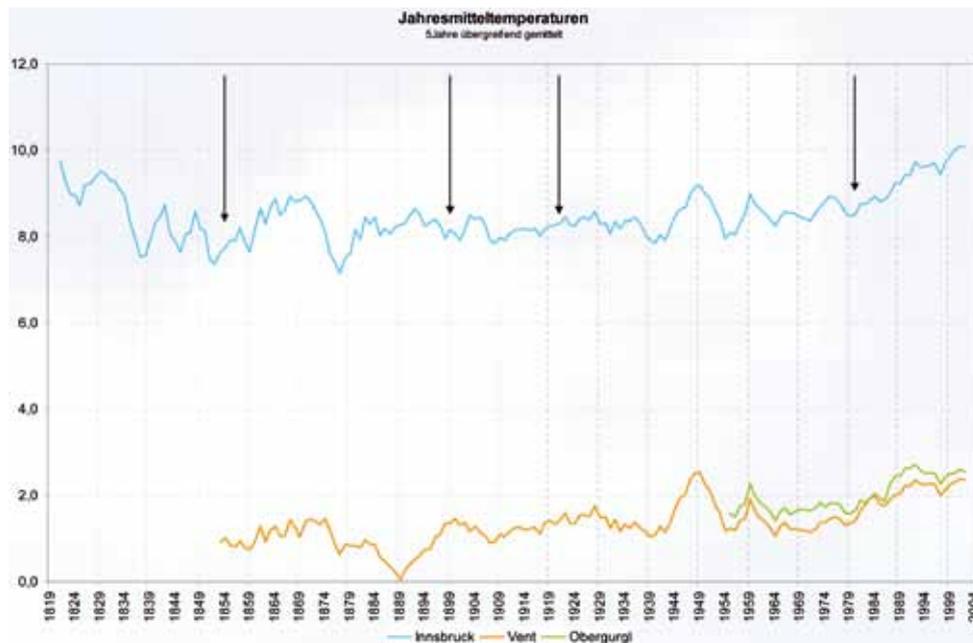


Bild 10: Die Jahresmitteltemperaturen von Innsbruck (580 m), Vent (1.900 m) und Obergurgl (1.940 m), dargestellt in fünfjährig übergreifender Mittelung. Zeitpunkt der Schwankungen und Trends stimmen in Innsbruck und den Bergstationen nicht immer überein. Die Pfeile zeigen die Zeiten allgemeiner Gletschervorstöße an, sie sind aus der Temperatur allein nicht abzuleiten (Bearbeitung: Fritz Pellet)

Höhe, Größe und Topographie bestimmen individuelle Massenbilanzen

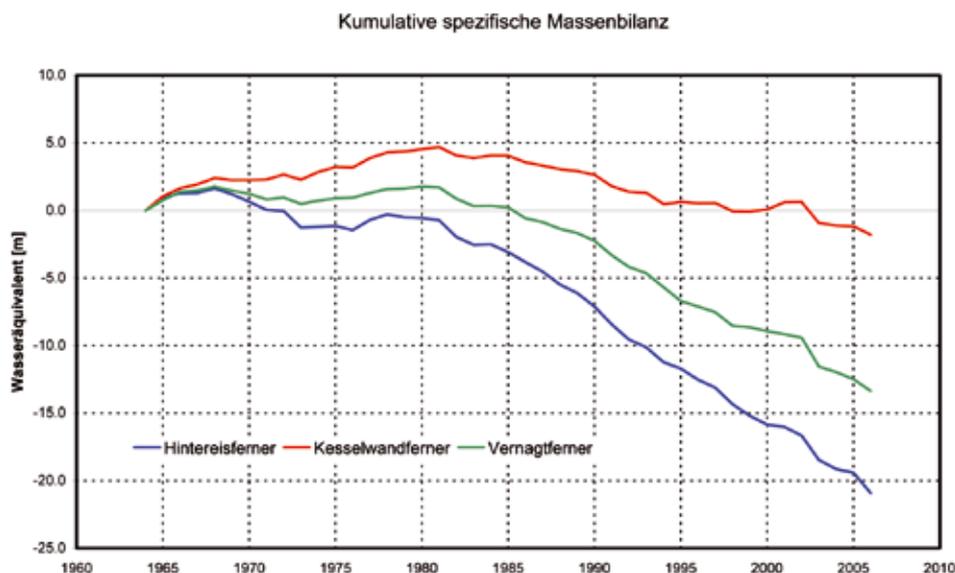


Bild 11: Die relative Änderung der mittleren spezifischen Massenbilanzen der drei Gletscher von Bild 9. Vom Herbst 1964 bis zum Herbst 2007 hat der Hintereisferner 21 m Wasseräquivalent verloren, das sind ca. 23 m Eisdicke über den ganzen Gletscher gemittelt. Seine Zunge hat dabei mehr als das Doppelte verloren (vergl. auch Bild 16). Verschiedene Höhe, Größe und Topographie haben bei diesen drei Nachbarn zu verschiedenen Reaktionen auf die gleiche Klimaänderung geführt (Bearbeitung: Fritz Pellet)

5 Dokumentation der rezenten Änderungen für alle Österreichischen Gletscher: die Österreichischen Gletscherinventare 1969 und 1998

In den Sommern um 1998 wurden alle österreichischen Gletscher aus der Luft fotografiert, fotogrammetrisch ausgewertet und zu digitalen Höhenmodellen im 5- und 10-m-Rastern verarbeitet. Zugleich wurden die Aufnahmen von 1969 nach dem heutigen Stand der Technik neu ausgewertet, sodass die Änderungen der Höhen (Eisdicken), Flächen und Volumina 1969–1998 bekannt sind. Die Absolutwerte der Volumina wurden durch Radarmessungen der Eisdicke an bisher 50 Gletschern, die ca. 40 % der Gesamtfläche der österreichischen Eisfläche darstellen, bestimmt. Die *Bilder 13 bis 16* zeigen exemplarisch die Produkte dieser Auswertungen.

Das österreichische Gletscherinventar 925 Gletscherflächen, 52 Gletschervolumina

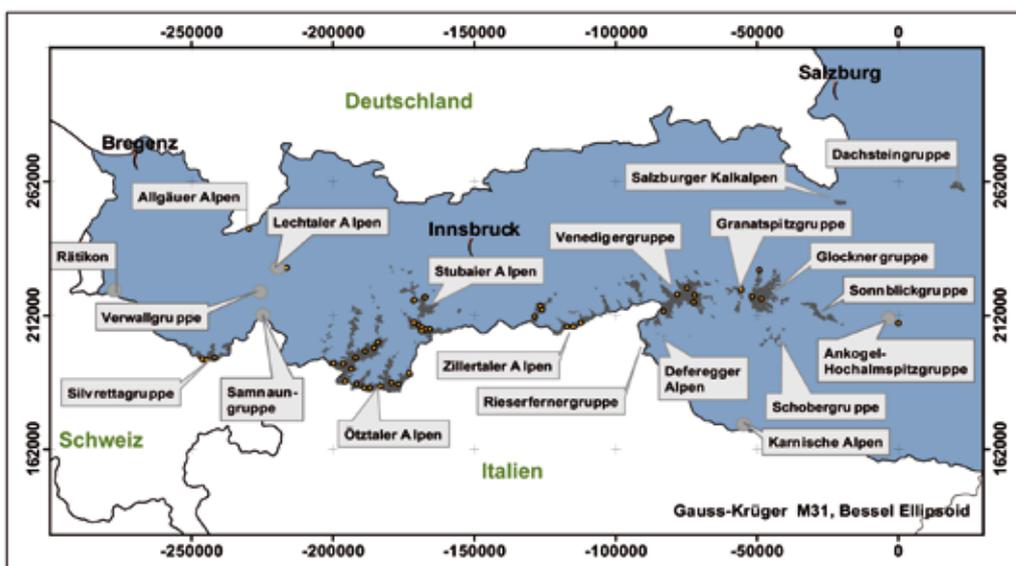


Bild 12: Übersicht über die Gletscher Österreichs, die in den Inventaren von 1969 und 1998 erfasst sind. Die gelben Punkte zeigen die Gletscher an, deren Eisdicke mit Radar gemessen wurde (Bearbeitung: Dr. Astrid Lambrecht)

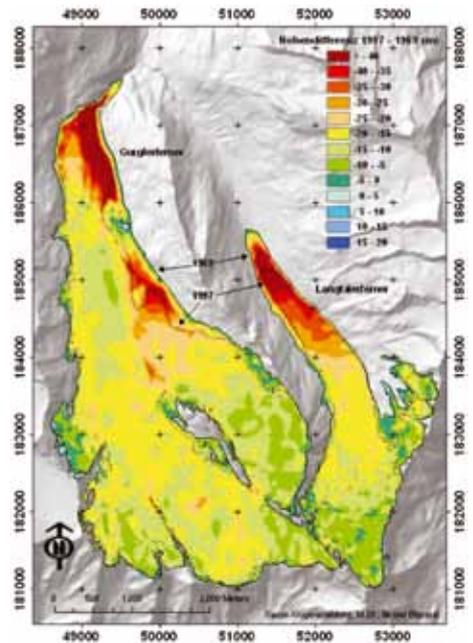
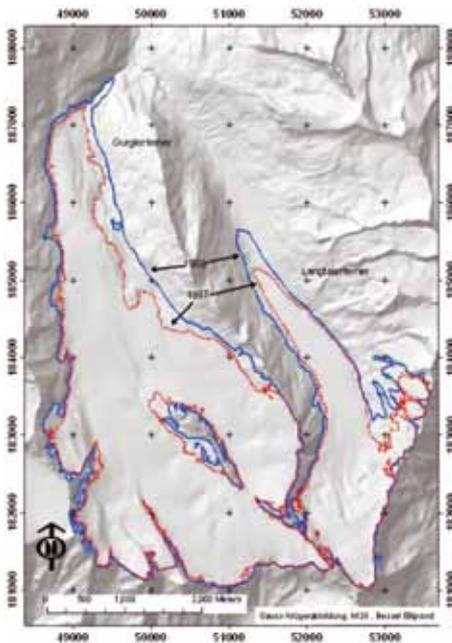
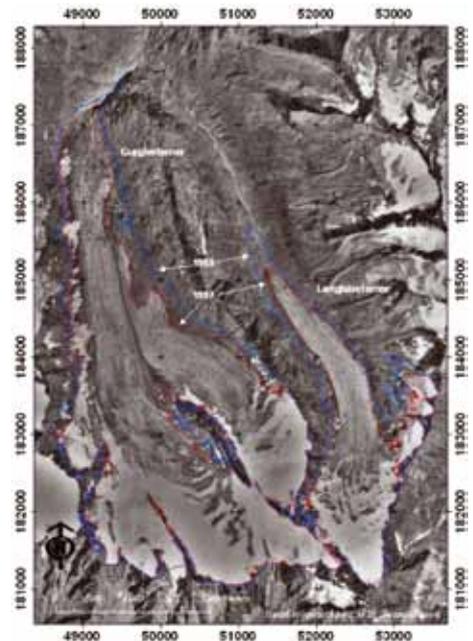


Bild 13: Luftaufnahme des Längentaler Ferners (links) und des Gurglerferners am 20.9.06, die Bildmitte liegt bei 11° 00' E, 46° 48' N, Blickrichtung nach Süden

Bild 14: Orthofoto der beiden Gletscher von Bild 13. Ihre Ausdehnung im Jahr 1969 ist blau, die von 1997 rot eingetragen. Noch besser als in der Bild 13 ist hier der helle Firn vom dunklen Gletschereis zu unterscheiden (Bearbeitung: Dr. Astrid Lambrecht)

Bild 15: Oberflächenmodell mit Schattierung (hillshade) bei Lichteinfall aus Nordwesten (Bearbeitung: Dr. Astrid Lambrecht)

Bild 16: Oberflächenmodell mit Farbcode für die Änderung der Oberflächenhöhe von 1969 bis 1997 (Bearbeitung: Dr. Astrid Lambrecht)

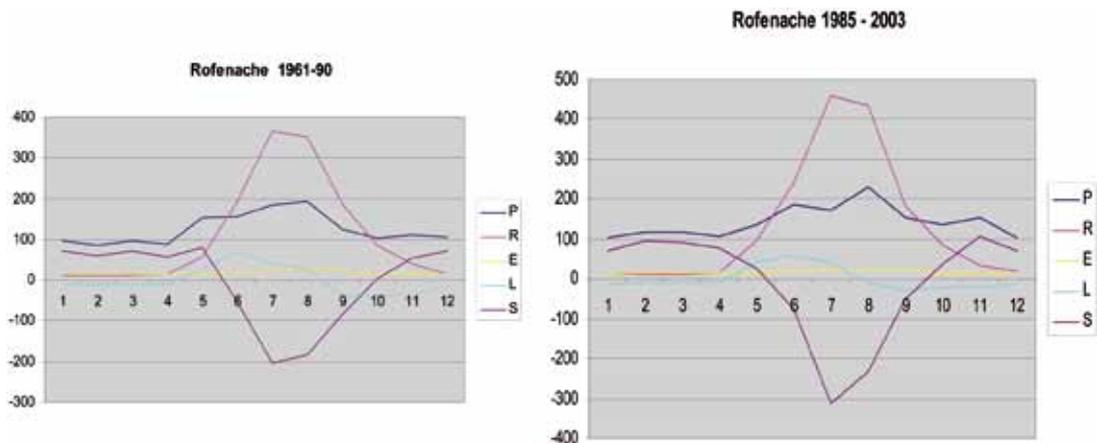


Bild 17: Änderung der Wasserbilanz des Einzugsgebiets des Pegels Vent-Rofenache ($10^{\circ} 54' 40''$ E, $46^{\circ} 51' 27''$ N, ca. 1.900 m), in mm pro Monat in den Perioden 1961–90 und 1985–2003. Niederschlag P, Abfluss R, Verdunstung E, Speicher S, davon flüssiger Speicher L. Die starke Zunahme des sommerlichen Abflusses um ca. 100 mm pro Monat ist überwiegend auf das Schmelzen von Gletschereis (die „Gletscherspende“) zurückzuführen, nur zum Teil auf eine Zunahme des Niederschlags. Änderungen der Verdunstung und der Flüssigwasserspeicherung sind nicht signifikant

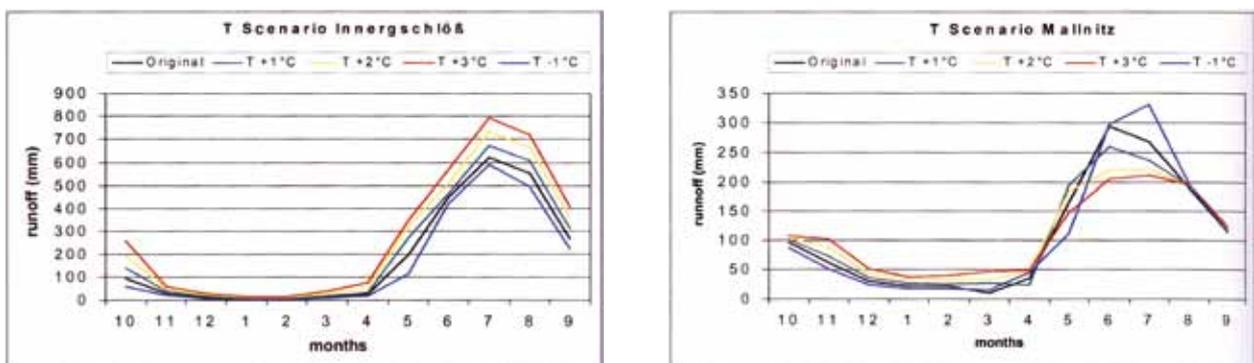


Bild 18 und 19: Mittelwerte 1961–1990 der monatlichen Abflüsse des Pegels Innerschloß ($12^{\circ} 27' E$, $47^{\circ} 07' N$, 1.686 m) und Szenarien für geänderte Temperaturen. In diesem stark (ca. 38 %) vergletscherten Einzugsgebiet bleibt auch bei einer Erwärmung um 3 °C die Abflussspitze in den Monaten Juli und August erhalten, in den Wintermonaten auch dann praktisch kein Abfluss. Anders im nur 2 % vergletscherten Gebiet von Mallnitz ($13^{\circ} 10' E$, $46^{\circ} 59' N$, 1.174 m), wo die Abflussspitze deutlich abgeflacht wird und der winterliche Abfluss verdoppelt wird

Anschrift des Autors

o.Univ.-Prof. Dr. Michael Kuhn
 Universität Innsbruck
 Institut für Meteorologie und Geophysik
 Innrain 52, 6020 Innsbruck
 Tel. +43-512-507-5150
 E-Mail: michael.kuhn@uibk.ac.at

Hydrologische Veränderungen in hochalpinen Einzugsgebieten

Hubert Holzmann und Gernot Koboltschnig

Kurzfassung

Hochalpine Einzugsgebiete sind charakterisiert durch die saisonale Abfolge von Kalt- und Warmperioden mit Akkumulation und Abschmelze von Schnee und der Beeinflussung der Abflussverhältnisse durch diese Speicherwirkung. Das Vorhandensein von Gletschern wirkt ausgleichend auf den Abfluss während der Sommermonate. Änderungen der meteorologischen Randbedingungen Niederschlag und Temperatur beeinflussen diese Komponenten maßgeblich. Offensichtlich aufgrund des Temperaturanstieges in den letzten Jahrzehnten waren die beobachteten Massenbilanzen der alpinen Gletscher überwiegend negativ. Im nachfolgenden Text werden mögliche Änderungen der Abflussverhältnisse aufgrund von Klimaänderungen beschrieben und quantifiziert. Als Referenzgebiete werden Kleineinzugsgebiete der Hohen Tauern angeführt, in denen die Autoren im Rahmen von Forschungsprojekten tätig waren. Ein Anstieg der Lufttemperatur in den nächsten Jahrzehnten kann als abgesichert gelten. Die Größenordnungen sind von den verschiedenen Entwicklungsszenarien abhängig. Generell gilt, dass die Höhe und die Dauer der Schneebedeckung abnehmen werden. Gemeinsam mit dem Abschmelzen der Gletscher wird ein Rückgang der mittleren Abflüsse im Frühjahr und Sommer erwartet. Aufgrund des erhöhten Niederschlags im Winter werden die bislang aufgetretenen Niederwasserphasen entschärft.

1 Allgemeines

Während in den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts die Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung noch hauptsächlich auf fachlicher, wissenschaftlicher Ebene behandelt wurden, findet diese Thematik spätestens seit der Veröffentlichung des letzten Klimareports des IPCC (2007) in der Öffentlichkeit und in den Medien breiten Raum. Dabei werden jedoch oftmals Wetterphänomene wie Starkniederschläge oder Trockenperioden und deren Auswirkungen fälschlicherweise als Klimaänderung interpretiert. Langfristige Änderungen sind aus den meteorologischen Datenreihen der Vergangenheit nicht so eindeutig erkennbar. Dies gilt insbesondere für die Niederschlagsentwicklung (vgl. Böhm et al., 2008). Eine Änderung des zukünftigen Temperaturverlaufs scheint besser abgesichert zu sein. Bei der zukünftigen Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten spielt weiters der durch menschliche Aktivität bedingte Ausstoß an Treibhausgasen für die Klimaentwicklung eine Rolle. Dazu gibt es eine Vielzahl von Klimamodellen, welche die erwartbaren Änderungen der meteorologischen Größen in Abhängigkeit von Emissionsszenarien angeben. Die Ergebnisse dieser Modelle schwanken zwar in ihrer absoluten Aussageschärfe stark, gewisse übereinstimmende Entwicklungen werden aber von den meisten Modellen simuliert. Es sind dies für den Zentraleuropäischen Raum folgende:

- Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur um ca. 2–4 °C,
- Anstieg des Niederschlags in den Wintermonaten,
- Reduktion des Niederschlags in den Sommermonaten.

Hochalpine Einzugsgebiete sind durch die saisonale Abfolge von Frost- und Warmperioden und der damit verbundenen Akkumulation und Schmelze von Schnee charakterisiert (vgl. Häberli &

Maisch, 2008). Das Vorhandensein von Gletschern verstärkt diesen Zyklus der Wasserbilanz. Speziell an den Gletschern und deren volumetrischer Ausdehnung können mittelfristige Änderungen der Klimabedingungen erkannt und beobachtet werden.

Generell gelten bei Änderungen der meteorologischen Randbedingungen folgende Wirkungen auf die hydrologischen Bedingungen hochalpiner Einzugsgebiete:

- Abschmelzen der Gletscherflächen,
- geringere Schneeakkumulation während der Wintermonate,
- früheres Einsetzen der Schneeschmelze im Frühjahr,
- Verschiebung der Niederwasserphasen vom Winter in den Spätherbst.

Um diese Wirkungen auf den Wasserhaushalt und auf die hydrologischen Verhältnisse zu beschreiben, wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl internationaler und nationaler Forschungsprogramme unterstützt (siehe Krahe et al. 2008). Neben Fragen des Hochwasserschutzes wurden dabei auch Bereiche der Land- und Forstwirtschaft, der Energiewirtschaft und des Tourismus angesprochen (vgl. Formayer, 2007). Auch im Rahmen der Projektinitiative FloodriskII (BMLFUW und BMVIT, 2008) wurden Aspekte des Klimawandels, insbesondere die Auswirkung auf das Hochwasser behandelt. In diesem Rahmen wurde für die quantitative Beschreibung der Auswirkungen unterschiedliche Herangehensweisen gewählt. Blöschl et al. (2008) verwendeten allgemeine Szenarien und untersuchten die Variabilitäten der Wirkungen für ein südliches und ein nördliches Einzugsgebiet in Österreich. Holzmann et al. (2008a) benutzten Szenarien aus einem regionalen Klimamodell, wobei nicht die berechneten Klimadaten direkt, sondern nur die Änderungssignale der Modellrechnungen herangezogen wurden. Von den fünf Pilotgebieten war eines das Einzugsgebiet der Oberen Salzach (Pegel Mittersill). Dieses Gebiet weist einen großen Flächenanteil hochgelegener Teilgebiete auf und wird daher als Referenz in diesem Beitrag verwendet. Weiters wurde von den Autoren ein Forschungsprojekt (SNOWTRANS) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt, in dem Teilgebiete der Hohen Tauern hinsichtlich ihres Abflussverhaltens unter Berücksichtigung der Schmelzprozesse untersucht wurden (siehe Abb. 1 und vgl. dazu Holzmann et al., 2008b und Koboltschnig, 2007). In beiden Projekten kamen verschiedene hydrologische Modelle zur Berechnung der Schneeschmelze und der Abflussbildung zur Anwendung.

Die kleinräumigen Gebiete wurden anhand von Beobachtungsdaten analysiert, wobei die beobachtete Variabilität der Wetterverhältnisse unterschiedliche Abflussreaktionen zeigte. In diesem Zusammenhang gilt das Extremjahr 2003 mit überdurchschnittlich hohen Lufttemperaturen als mögliches Referenzszenario zukünftiger Entwicklungen.

Das Gebiet der Oberen Salzach wurde mit Klimaänderungsdaten aus Klimamodellen simuliert und die prognostizierten Änderungen für Ende des Jahrhunderts mit der gegenwärtigen Referenzperiode verglichen.

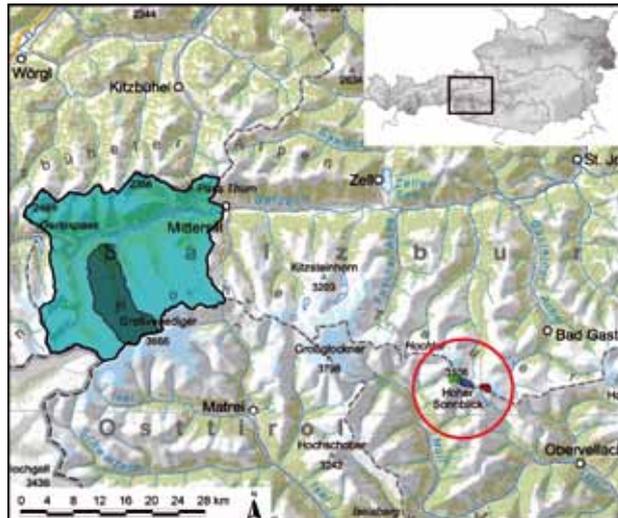


Abb. 1: Die Untersuchungsgebiete: Obere Salzach (türkis), Obersulzbach (grau); im roten Kreis: Goldbergkees (blau), Kleinfließkees (grün) und Wurtenkees (rot). Aus Kobltschnig (2007).

2 Erwartbare meteorologische Veränderungen

Die Abschätzung der Klimaänderung und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt beziehen sich auf die mittleren Verhältnisse des Zeitraums 2071 bis 2100. Als Referenzwert der Vergangenheit wurde die Klimanormalperiode 1961 bis 1990 verwendet. Als Entwicklungsszenarien wurden die von IPCC (2007) u. a. festgelegten Szenarien B1 und A1B verwendet. B1 ist ein sehr optimistisches Szenario. Hierbei geht man davon aus, dass es gelingt bis zum Ende des Jahrhunderts die Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau von 550 ppm zu stabilisieren. Für die globale Mitteltemperatur ergibt sich bis Ende des Jahrhunderts ein Anstieg von 1,8 °C (1,2–2,9 °C)

A1B ist ein eher realistisches Szenario mit der Annahme, dass die Treibhausgasemissionen bis in die Mitte des Jahrhunderts noch weiter stark ansteigen, danach jedoch rasch abnehmen. Innerhalb dieses Jahrhunderts kommt es noch zu keiner Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen und es wird ein Niveau von mehr als 700 ppm erreicht. Dies führt zu einem Temperaturanstieg von 2,9 °C (1,6–4,5 °C).

Abb. 2 zeigt die Änderungen des monatlichen Temperatur- und Niederschlagsverlaufs für das Gebiet der Oberen Salzach. Die Erwärmung fällt beim B1-Szenario wesentlich geringer aus als im A1B-Szenario. Für die Jahresmitteltemperatur liegt sie bei 2,48 Grad im B1-Szenario und bei 3,98 Grad beim A1B-Szenario. Die Erwärmung im Frühjahr (März) fällt deutlich geringer aus, als in den restlichen Monaten. Dies dürfte mit der Niederschlagszunahme in diesen Monaten zusammen hängen, die sich in beiden Szenarien zeigt.

Beim Niederschlag zeigt sich das B1-Szenario wesentlich feuchter als das A1B-Szenario. Es ist eine deutliche Niederschlagszunahme gegenüber dem Referenzzeitraum zu erkennen. Beim A1B-Szenario zeigt sich eine Abnahme.

Beim Jahresgang der Niederschlagsänderung zeigt sich bei Szenario B1 mit Ausnahme des Jänners in jedem Monat eine Niederschlagszunahme, am stärksten im März, mit 20 % Zunahme. Bei

Hydrologische Veränderungen in hochalpinen Einzugsgebieten

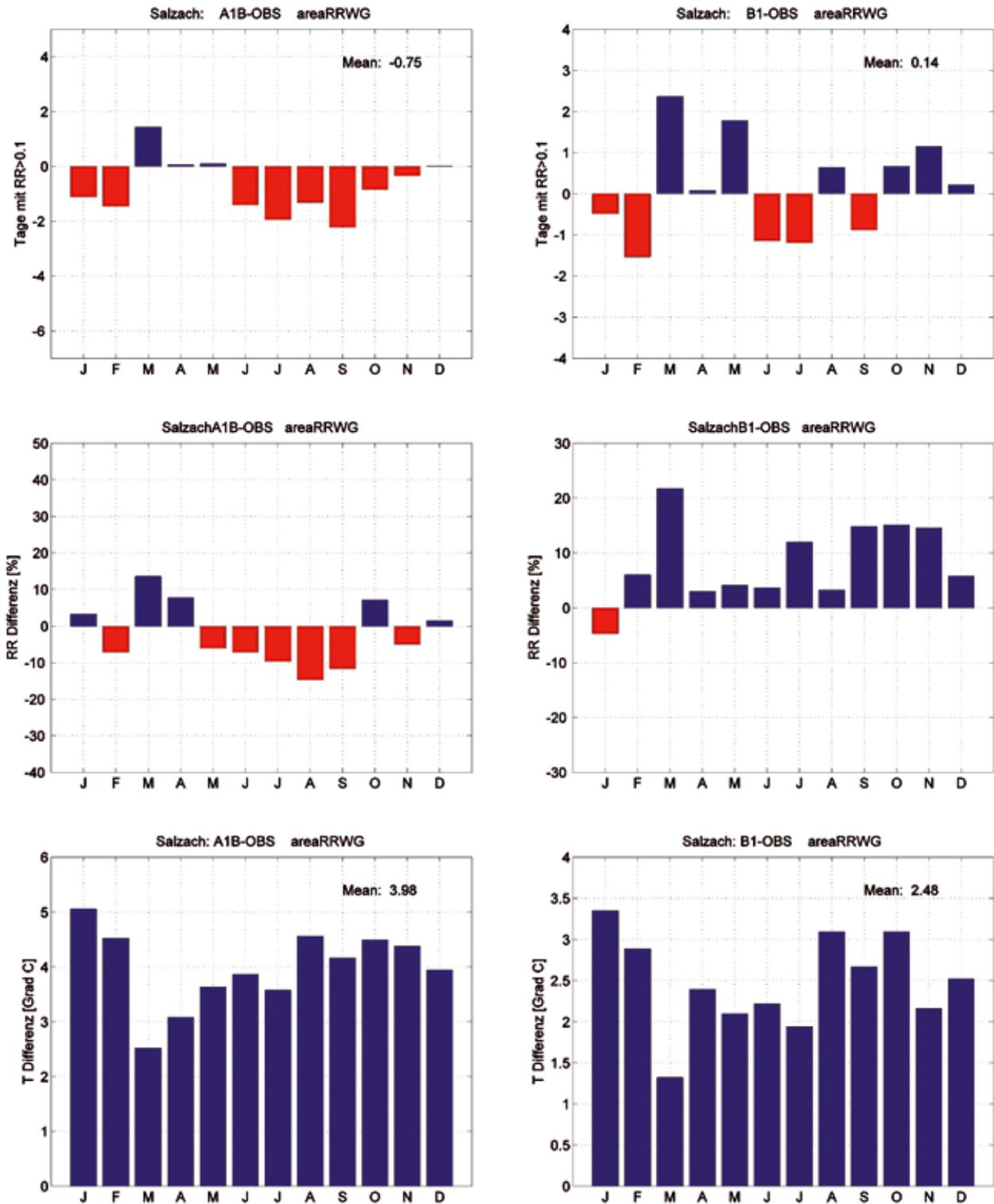


Abb. 2: Änderung der Monatsniederschlagshäufigkeit (oben), der monatlichen Niederschlagssumme (Mitte) und der Monatsmitteltemperatur (unten) für die REMO-UBA-Szenarien A1B (links) und B1 (rechts) für die Obere Salzach (aus Holzmann et al., 2008a).

A1B-Szenario zeigen die Sommer und Herbstmonate tendenziell eher eine Niederschlagsabnahme. Im Winter wird, mit Ausnahme des Februars eine Zunahme erwartet.

Die Niederschlagshäufigkeit nimmt in den Sommermonaten und hier speziell im A1B-Szenario deutlich ab. Dies, obwohl teilweise in den Monaten eine Zunahme der Niederschlagssumme zu beobachten ist.

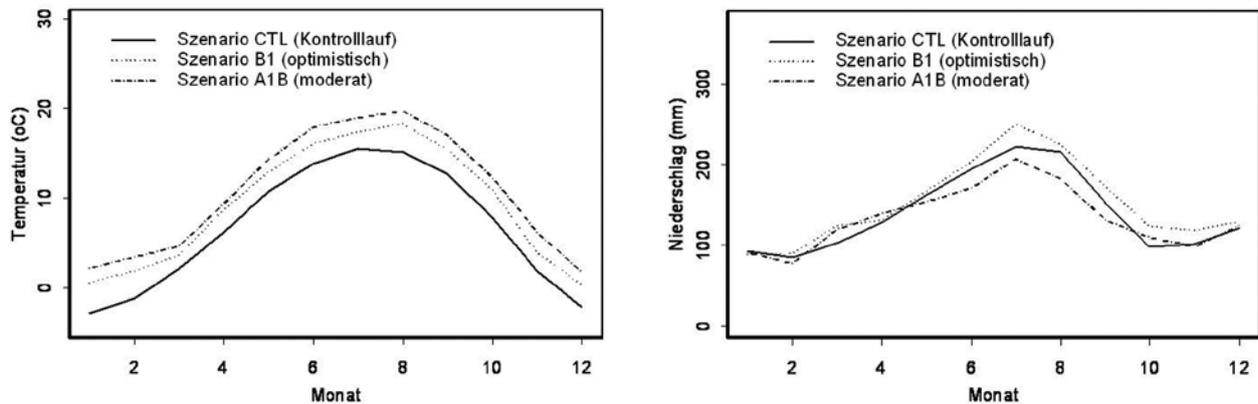


Abb. 3: Monatsmitteltemperatur und mittlerer monatlicher Niederschlag an der Oberen Salzach für die Szenarien A1B und B1.

Abb. 3 zeigt die Absolutwerte der Temperatur und der mittleren Monatssummen des Niederschlags. Der Temperaturanstieg ist für beide Szenarien erkennbar, stärker bei Szenario A1B. Während Szenario B1 durchwegs Niederschlagszunahmen bringt, sind bei Szenario A1B Abnahmen von Mai bis September zu erkennen.

3 Auswirkungen auf die Hydrologie

Klimaänderungen in Hochalpinen Gebieten beeinflussen Schneeprozesse und die damit verbundenen Charakteristika wie Schmelzabfluss, Schneedeckendauer und Höhe (Schneewasserwert). Auch der Abflussbeitrag aus vergletscherten Flächen und dessen Reduktion bei Abschmelzen der Eisflächen ist für die Wasserbilanz von Bedeutung. Auch die Veränderung der saisonalen Niederschlagsverteilung und der ansteigenden Verdunstung bei Temperaturerhöhung bewirken Änderungen in der Abflusscharakteristik.

Die Kenntnis und Quantifizierung möglicher Änderungen des Wasserhaushalts und des Abflussregimes sind wichtige Entscheidungsgrundlagen für Planungsorgane der Bereiche Wasserwirtschaft, Hochwasserschutz, Energiewasserwirtschaft, Tourismus etc. In den Eingangs genannten Projekten wurde die quantitative Beschreibung der Wirkungen eines Klimawandels auf den Wasserhaushalt versucht. Teilergebnisse sind nachfolgend angeführt.

Abfluss

Der mittlere Abfluss ist durch den Niederschlag und die Schmelzbeiträge aus Schnee- und Gletscherflächen dominiert. Änderungen dieser Eingangsgrößen beeinflussen den Abfluss wesentlich. Abb. 4 zeigt den Abfluss aus dem experimentellen Einzugsgebiet des Rauriser Goldbergkees (vgl. Koboltschnig, 2007) während des heißen Sommers 2003. Während die Abflussspitzen Mitte Juni noch durchwegs aus der Schneeschmelze resultieren, verlagert sich im Juli und August der Abflussanteil zu Eisschmelze des Gletschers. Die blau hinterlegte Fläche gibt den direkten Eisschmelz-

anteil wieder und zeigt, dass bei Fehlen von Gletscherflächen – als mögliches Szenario am Ende dieses Jahrhunderts – der Abfluss im August fast zur Gänze verschwindet.

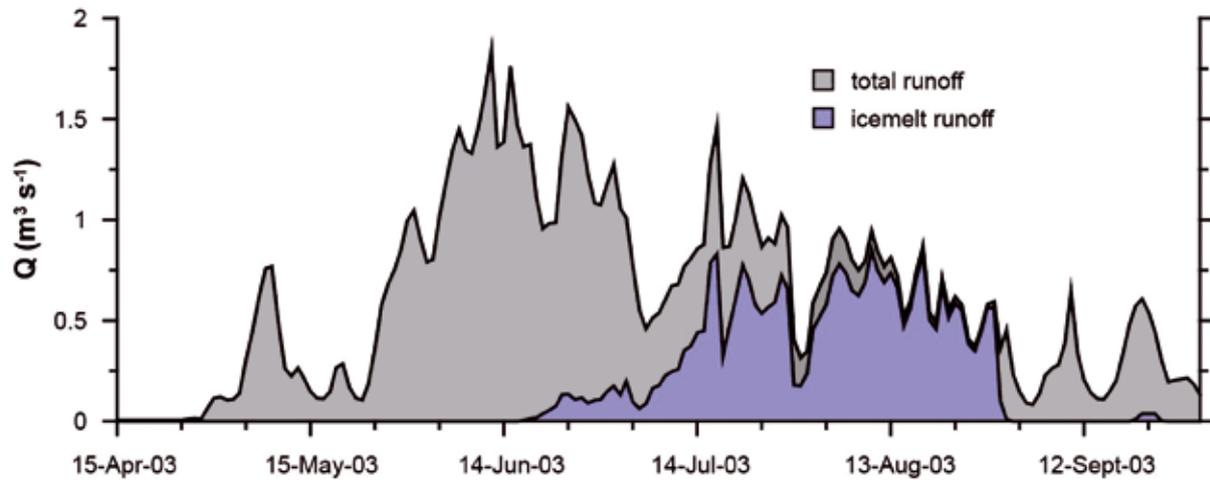


Abb. 4: Simulierte Tagesmittelwerte des Gesamtabflusses (grau) und des Eisschmelzanteiles (blau) am Gebietsauslass des Goldbergkees (aus Koboltschnig, 2009a).

Ein ähnliches Bild zeigt Abb. 5, in der die Abflüsse für die Obere Salzach (Pegel Mittersill) dargestellt sind. Die rechte Abbildung zeigt das Abflussverhalten ohne Vergletscherung, das linke Bild geht von der derzeitigen Vergletscherung von ca. 6 % des Gesamtgebiets aus. Es werden jeweils die Verhältnisse der Referenzperiode 1961–1990 (Kontrolllauf) und der Szenarien B1 und A1B verglichen.

Bei den mittleren Monatsabflüssen treten bei beiden Szenarien Zunahmen der Abflüsse bereits ab August über den Winter bis April auf. Dies ist auf die höheren Temperaturen und auf einen Anstieg der Niederschläge als Regen in diesem Zeitraum zurückzuführen. Szenario B1 zeigt zusätzlich Zunahmen im Mai und Juli, Abnahmen dagegen nur im Juni. Ersteres ist auf einen deutlichen Anstieg der Niederschläge bei diesem Szenario zurückzuführen. Szenario A1B lässt von Mai bis inklusive Juli stärkere Rückgänge der Abflüsse erkennen.

Bei Weglassen der Gletscherschmelze ergibt sich vor allem bei Szenario A1B eine ausgeprägte Reduktion des Abflusses in den Monaten Juli, August und September. Hier schlagen wieder die noch höheren Temperaturen und geringeren Niederschläge bei Szenario A1B im Vergleich zu Szenario B1 zu Buche.

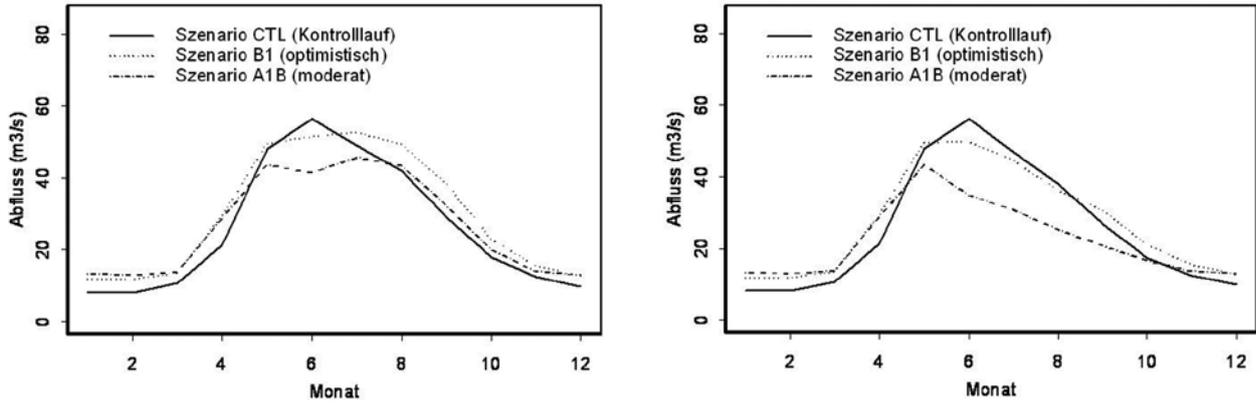


Abb. 5: Mittlere Monatsabflüsse an der Oberen Salzach für die Szenarien A1B und B1 mit (links) und ohne (rechts) Vergletscherung.

Schmelzabflüsse

Unter Schmelzabflüssen werden die Anteile aus Schnee- und Eisschmelze zusammengefasst. Sie sind in den Ursprungsbereichen der hochalpinen Gebiete gemessen am Gesamtabfluss sehr hoch (siehe Abb. 6), bei tieferen Teilgebieten tragen der Direktabfluss aus dem Niederschlag und der Grundwasserzufluss (Basisabfluss) verstärkt zum Gesamtabfluss bei.

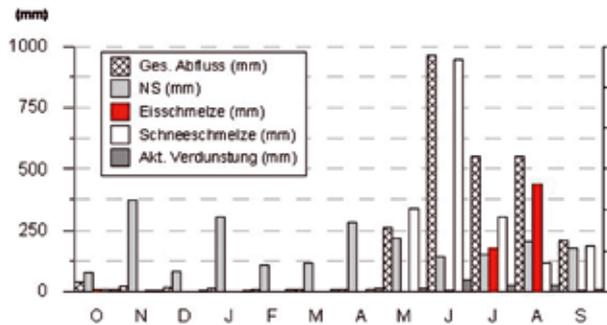


Abb. 6: Monatliche Bilanz des Einzugsgebiets Kleinfließkees 2002/03 (aus Kobltschmig, 2007).

Auch im Einzugsgebiet der Oberen Salzach ist bei den schmelzbedingte Direktabflüssen der Einfluss des Gletschers deutlich sichtbar (vgl. Abb. 7). Bei vorhandenem Gletscher ist die starke Zunahme der Schmelzabflüsse vor allem bei Szenario A1B und in den Monaten Juli, August und September auffallend. Bei Fehlen des Gletschers ist in diesen Monaten kaum noch Schmelzabfluss vorhanden. Auch gehen die Schmelzabflüsse bereits im Juni merkbar zurück. Bei Szenario A1B ist der Rückgang aufgrund der höheren Temperaturen stärker.

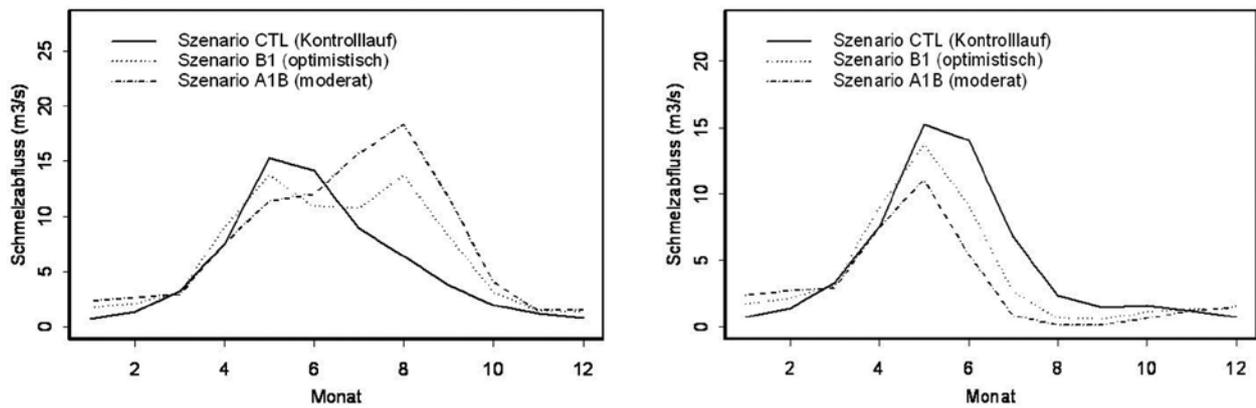


Abb. 7: Mittlere schmelzbedingte Direktabflüsse mit (links) und ohne Gletscher (rechts) für Mitterstill/Salzach für die Szenarien (1) Kontrolllauf, (2) B1 und (3) A1B.

Schneebedeckung / Wasseräquivalent

Die Schneedecke im Einzugsgebiet wirkt als Wasserspeicher, dessen bestimmende Größen die Flächenausdehnung des Schnees und der Wassergehalt der Schneedecke (Schneewasserwert) sind.

Der rapide Rückgang des Schneewasserwertes bei beiden Szenarien weist auf einen starken Rückgang der Schneemächtigkeit in diesem Gebiet hin. Es handelt sich hierbei um einen mittleren Gebiets-Schneewasserwert, der mit dem Flächenanteil der jeweiligen Höhenzonen gewichtet wurde.

Auch in Zonen über 2100m Seehöhe ist ein Rückgang der Schneebedeckung festzustellen, wenn auch nicht so stark wie in tieferen Lagen. Dies ist besonders im Monat Mai auffällig. Szenario A1B führt hier aufgrund des höheren Temperaturanstieges zu einem vermehrten Rückgang. Dies bedeutet eine Reduktion der Schneebedeckungsdauer um 4 bis 6 Wochen.

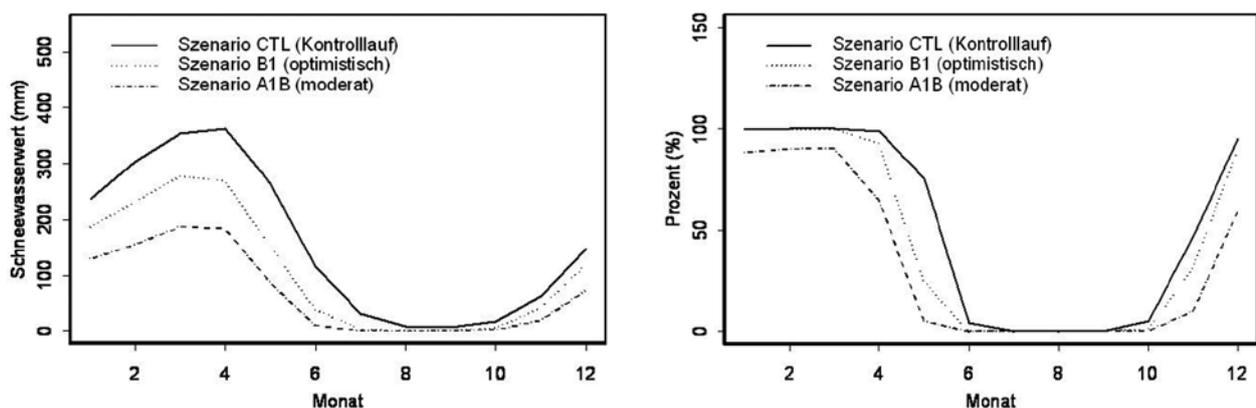


Abb. 8: Mittlerer Schneewasserwert und Tage mit Schneebedeckung (in Prozent) über 2100 m für die Szenarien (1) Kontrolllauf, (2) B1 und (3) A1B.

Niederwasser

Hochalpine Gebiete sind zumeist dadurch gekennzeichnet, dass während der Wintermonate infolge der niedrigen Temperaturen und der Schneefälle ein nur geringer Teil zum Abfluss gelangt.

In dieser Zeit können Niederwassersituationen beobachtet werden. Der Schwellenwert für Niederwasser wird in diesem Zusammenhang als Q95-Wert der Referenzperiode definiert und beträgt $6.82 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Anzahl der Tage mit Niederwasserabfluss wird aufgrund der höheren Schmelzrate im Winter und auch der prognostizierten Niederschlagszunahme bei beiden Szenario B1 und A1B stark abnehmen (vgl. Abb. 9). Bei Szenario A1B zeigt sich jedoch durch den Einfluss der fehlenden Gletscherschmelze eine Zunahme der Häufigkeiten von Niederwasser in den Monaten August bis November. Allerdings sind diese Phasen seltener als die jetzt auftretenden Winterniederwasser-Perioden.

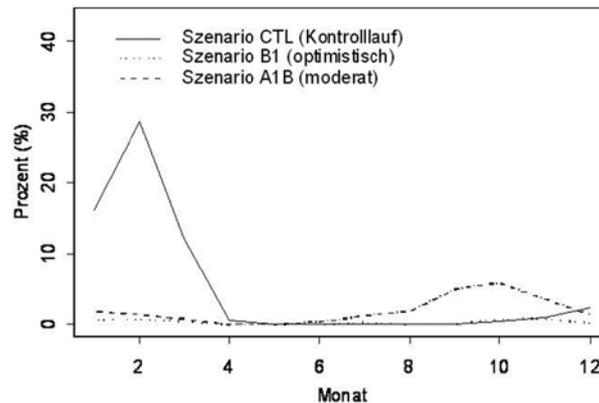


Abb. 9: Tage mit Niederwasserabfluss (ohne Gletscher) die Szenarien (1) Kontrolllauf, (2) B1 und (3) A1B.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse aus Klimastudien und Beobachtungen an Testeinzugsgebieten zusammengefasst und mögliche Änderungen der hydrologischen Verhältnisse in Hochalpinen Gebieten dargestellt. Aus den Erkenntnissen dieser Arbeiten und aus anderen Quellen gilt ein zukünftiger Anstieg der Lufttemperatur als wahrscheinlich. Die Entwicklung der Niederschläge ist schwieriger vorherzusagen, sie ist jedoch in starkem Maße von den Entwicklungsszenarien abhängig. Allgemein gilt eine Reduktion der Sommerniederschläge und eine Erhöhung der Winterniederschläge. Änderungen in den klimatischen Randbedingungen haben Auswirkungen auf die Hochwasserentwicklung, die mittleren Abflussverhältnisse, die Niederwassersituation und die Schneebedeckung bzw. Gletscherausdehnung. Dabei bestehen folgende Wirkungsbeziehungen zu wirtschaftlichen Sektoren bzw. Fachbereichen.

- a) Hochwasser: Hochwasserschäden, Schutzmaßnahmen,
- b) Mittelwasser: Wassermengenerzeugung, Energieerzeugung,
- c) Niederwasser: Fischerei, Kühlwasser, Ökologie, Schifffahrt,
- d) Schnee / Gletscher: Fremdenverkehr, Speicherreserven.

ad a): Hochwasser

Dieser Bereich wurde im vorliegenden zusammenfassenden Bericht nicht explizit behandelt. Eine detaillierte Analyse dazu findet sich in Holzmann et al. 2008a. An der Oberen Salzach liefert Szenario A1B kleinere Hochwässer, Szenario B1 lässt eine geringfügige Erhöhung gegenüber dem

Referenzzustand erwarten. Allerdings verbleibt bei der Schätzung extremer Hochwässer bei Klimaänderung ein gewisses Maß an Unsicherheit, da vor allem kurze intensive Ereignisse durch die Klimamodelle nicht gut abgebildet werden und daher nicht berücksichtigt sind.

ad b): Mittelwasser

Die Simulationsergebnisse hinsichtlich der mittleren Abflussverhältnisse gelten vom methodischen Standpunkt als gut abgesichert. Sie beeinflussen Fragestellungen zur Wassermengenwirtschaft und zur Energieerzeugung (Regelarbeitsvermögen). Die Winterabflüsse werden erhöht, Herbstabflüsse werden bei Szenario A1B niedriger.

ad c): Niederwasser

An der Oberen Salzach werden Niederwasserperioden im Winter seltener, während der Herbstmonate ist ein geringer Anstieg der Niederwasserphasen gegenüber dem Referenzzeitraum bei Szenario A1B wahrscheinlich. Dies kann Auswirkungen auf die Wassertemperatur und somit auf ökologische Problemstellungen haben (Fischökologie). Aufgrund der Wasserknappheit im Herbst kann zeitweise ein reduziertes Arbeitsvermögen von Wasserkraftanlagen auftreten.

ad d): Schneespeicher, Schneebedeckung

Die Schneeakkumulation während der Wintermonate wird verringert, die Schneedeckendauer verkürzt. Daraus ergeben sich Verschlechterungen für den Wintersport. Weiters reduzieren sich die Schneeschmelzbeiträge. Die Wasserspeicherung in der Schneedecke nimmt ab. Die Menge reicht u. U. nicht mehr aus, um die hochalpinen Speicher ganz zu füllen. Änderung der Wassertemperaturen in den Ursprungsbereichen haben auch Auswirkungen auf Fischökologie.

Literatur

- Blöschl, G., Viglione, A., Heindl, H. (2008): Dynamik von Hochwasserbemessungsgrößen und Konsequenzen - Klimaänderung. Endbericht zum Teilprojekt TP6.2 von Floodrisk II. Bericht an den Auftraggeber BMLFUW.
- BÖHM R., Godina, R., Nachtnebel, H., Pirker, O. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Hrsg. Von BMLFUW und ÖWAV, Wien
- Formayer, H. (2007): Auswirkungen des Klimawandels in Niederösterreich. NÖ Klimastudie 2007 im Auftrag der NÖ Landesreg.
- Häberli, W., Meisch, M. (2008): Klimawandel im Hochgebirge. In Endlicher & Gerstengabe (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Pp. 98–107.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Haas, P., Formayer, H. (2008a): Auswirkung möglicher Änderungen der Schnee-, Regenanteile in Hinblick auf die Abflussbildung bei Klimaänderung. Endbericht zum Teilprojekt TP1.2 von Floodrisk II. Bericht an den Auftraggeber BMLFUW.
- Holzmann, H., Schöner, W., Koboltschnig, G., Kroisleitner, Ch., Hynek, B., Mott, R., Michlmayer, G., Schneider, W., Kaiser, G., Vollmann, M., Rauch, L. (2008b): *SNOWTRANS* - Regionalisation of snow- and ice melt processes in the Hohe Tauern mountains in Austria. Endbericht and die Österr. Akademie der Wissenschaften. ISBN: 978-3-7001-3987-4
- Holzmann, H., Koboltschnig, G., Schöner, W., Rauch, L. (2009): Schnee- und Gletscherschmelze als Baustein der hydrologischen Abflussmodellierung Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 1-2/09, 9-16; ISSN 0945-358X

- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P. (2010): Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, 56.JG, 1-2/10, 7-11
- IPCC (2007): Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. ISBN-13: 978-0521705967
- Koboltschnig, G. (2007): Mehrfachvalidierung hydrologischer Eis- und Schneeschmelzmodelle in hochalpinen, vergletscherten Einzugsgebieten. Dissertationsschrift an der Univ. f. Bodenkultur Wien.
- Koboltschnig, G.R., Schöner, W., Zappa, M. and Holzmann, H. (2009a): Glaciers melt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003, Hydrol. Process. 23, 1010–1018, DOI: 10.1002/hyp.7203.
- Koboltschnig, G., Schöner, W., Holzmann, H.. (2009b): Simulierter zeitlicher Schneedeckenverlauf und Schneedeckendauer des Oberen Pinzgau berechnet auf Basis eines mehrfach validierten hydrologischen Modells Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 1-2/09, 17-24; ISSN 0945-358X
- Krahe K., J. Korck, L. Tomassini, U. Gelhardt, G. Smiatek, H. Formayer, (2008): Global and regional climate projections for the Alpine space. In: Castellari S.: Climate Change Assessment Report. ClimChAlp Interreg III B Alpine Space, Work Package (5): 47-88.
- Nachtnebel, H.P. (2008): Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen. In: Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Hrsg. von BMLFUW und ÖWAV, Wien, 27-52.
- Schöner, W., Hynek, B., Böhm, R., Binder, D., Koboltschnig, G., Holzmann, H.. (2009): Glazialhydrologisches Monitoring im Bereich des Rauriser Sonnblicks (Hohe Tauern, Österreich) Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 1-2/09, 1-8; ISSN 0945-358X

Anschrift der Autoren:

ao.Univ.-Prof. DI Dr. Hubert Holzmann
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 18, 1190 Wien
E-Mail: hubert.holzmann@boku.ac.at

DI Dr. Gernot Koboltschnig
Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT
c/o Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. 18 – Wasserwirtschaft
Flatschacher Straße 70, 9020 Klagenfurt
E-Mail: gernot.koboltschnig@ktn.gv.at
www.interpraevent.at

Hydrologische Veränderungen und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz

Bruno Schädler

Zusammenfassung

Die seit über hundert Jahren beobachtete und sich in Zukunft verstärkt abzeichnende Klimaänderung hat Auswirkungen auf den Wasserkreislauf und auf alle Bereiche der Wasserwirtschaft. Die schon beobachteten Veränderungen im Wasserkreislauf und in den anderen wichtigen hydrologischen Faktoren werden dargestellt. Zusammen mit den aus neusten wissenschaftlich Erkenntnissen erarbeiteten Klimaszenarien für das Jahr 2050 werden anschließend die Auswirkungen auf die einzelnen Sektoren der Wasserwirtschaft sowie auf ihre Nutzergruppen, z. B. Wasserversorgung, Energieerzeugung, Hochwasserschutz oder Landwirtschaft diskutiert.

1 Die Wasserressourcen der Schweiz

Auf der Fläche der Schweiz liegen große Mengen Wasser in Reserve: Nach neusten Untersuchungen (Farinotti et al., 2009) waren im Jahr 2008 in Form von Gletschereis 58 ± 8 Milliarden Kubikmeter Wasser gespeichert. Dies sind noch knapp 60 % des Volumens, welches am Ende der kleinen Eiszeit um 1850 in den Schweizer Alpen gespeichert war. Die Gletscherfläche hat sich entsprechend bis heute von rund 1800 km^2 auf weniger als 1050 km^2 , das heißt auch um etwa 40 % reduziert. In den Seen innerhalb der Schweizer Staatsgrenzen sind etwa 130 Mia. m^3 , im nutzbaren Grundwasser ca. 11 Mia. m^3 und in Speicherseen 4 Mia. m^3 Wasser gespeichert.

Die gesamten Schneereserven im Frühjahr belaufen sich im Durchschnitt auf etwa 5 Mia. m^3 wobei sehr grosse Schwankungen von einem Jahr zum nächsten zu beobachten sind. Obwohl die Schweiz nur 0.4 Prozent der Fläche Europas einnimmt, liegen rund 5 Prozent der Wasservorräte Europas auf ihrem Territorium. Außerdem spielen die Alpen – wie viele andere Gebirgsräume auch – eine zentrale Rolle in der Wasserversorgung der umliegenden tiefer liegenden und trockeneren Regionen. So trägt der Alpine Rhein mit nur 15 % der Gebietsfläche zu 34 % des Gesamtabflusses des Rheingebietes bei. Bei der Rhone (23 % Flächenanteil) sind es sogar 41 % und beim Po (35 % Flächenanteil) 53 % Abflussanteil (Viviroli und Weingartner, 2004).

Auf dem Territorium der Schweiz lagern nicht nur außerordentlich große Reserven von Wasser, diese werden auch immer wieder durch riesige Mengen von Niederschlag erneuert (rund 60 Mia. m^3 pro Jahr). Nach Abzug der Verdunstung stehen den rund 8 Millionen Einwohnern heute pro Kopf und Jahr 5100 m^3 im Inland erneuerbares Wasser zur Verfügung, was weltweit gesehen eine durchaus überdurchschnittliche Menge ist.

Im 20. Jahrhundert wurden in der Schweiz jährlich im Durchschnitt 1431 mm Niederschlag beobachtet (vgl. Abb. 1). Davon sind rund 32 Prozent, also 464 mm/a verdunstet. Da in dieser Zeit wegen der Klimaänderung die Gletscher stark zurück geschmolzen sind, haben sie etwa 14 mm/a zum Abfluss beigetragen, sodass sich dieser auf total 981 mm/a erhöhte. Dieser Abfluss wurde ausschließlich auf schweizerischem Staatsgebiet generiert. Zusätzlich fließen der Schweiz aus ihren Nachbarländern erhebliche Mengen von Wasser zu, sodass schließlich über die großen

Flüsse Rhein, Rhone, Ticino und Inn 1299 mm Wasser pro Jahr verlassen. Dies entspricht einem Volumen von 53.6 Milliarden Kubikmeter Wasser pro Jahr oder einem Abfluss von 1700 m³/s. Dieses jährliche Gesamtabflussvolumen aus der Schweiz ist vergleichbar mit dem Wasservolumen, welches in Form von Eis in den Schweizer Gletschern gespeichert ist!

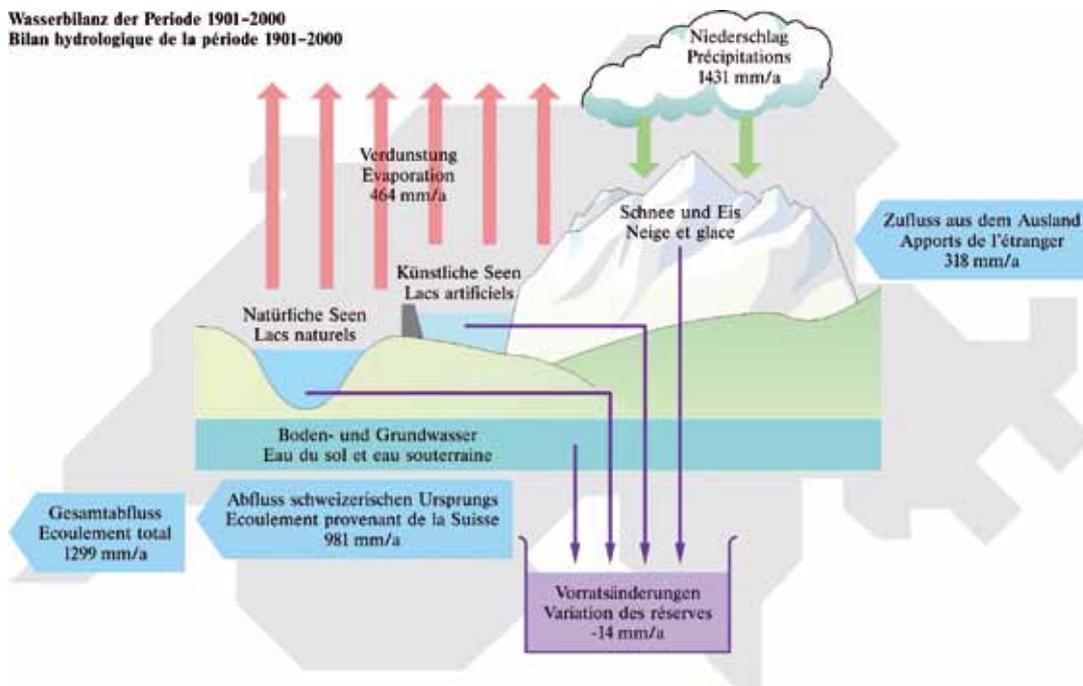


Abb. 1: Der Wasserhaushalt der Schweiz (Hubacher und Schädler, 2010).

Die genannten Durchschnittswerte unterliegen sehr großen jährlichen Schwankungen. Zudem haben sie sich mit der Klimaänderung auch langfristig verändert. Die Jahresniederschläge haben – allerdings für den Mittelwert der Schweiz nicht statistisch signifikant – im 20. Jahrhundert um rund 120 mm (8 %) zugenommen. Da mit der Erwärmung auch die Verdunstung der Landoberfläche, der Vegetation und der Gewässer insgesamt um 105 mm zugenommen hat, ist der Gesamtabfluss unserer Fließgewässer – das Resultat der Wasserbilanz – im Jahresmittel praktisch unverändert geblieben.

Im Vergleich zu den Wasserressourcen ist die Wassernutzung bescheiden: Insgesamt werden in der Schweiz (ohne die Nutzung durch die Wasserkraftwerke und die Durchflusskühlung der Kernkraftwerke) heute etwa 2220 Mio. m³ Wasser für Haushalt, Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie und für öffentliche Zwecke genutzt (Freiburghaus, 2009). Dies entspricht ca. 3.7 Prozent des Niederschlages, bzw. 5.4 Prozent des erneuerbaren Wassers in der Schweiz. Für die Durchflusskühlung der zwei Kernkraftwerke ohne Kühltürme werden zusätzlich jährlich etwa 1640 Mio. m³ Flusswasser gebraucht.

2 Veränderungen und zukünftige Auswirkungen auf hydrologische Faktoren

Die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft der Schweiz sind größtenteils nur qualitativ bekannt. Zahlreiche Untersuchungen und Berichte haben sich in den letzten Jahren mit diesen Auswirkungen befasst: Einerseits in Fallstudien

andererseits in umfassenderen Grundlagenstudien, z. B. für das gesamte internationale Rheingebiet in Middlekoop (2001), für die Schweiz in OcCC (2007), KOHS (2007) und Schürch (2009). Die diesen Untersuchungen zu Grunde gelegten Klimaszenarien basieren in Studien, die nach 2007 erschienen sind, auf Frei (2004). Aus den vorliegenden Studien ergeben sich zahlreiche Hinweise, in welcher Art und Weise die Klimaänderung sich auf hydrologische Parameter auswirken könnte. Viele Auswirkungen können jedoch für zukünftige Zeiträume noch immer nicht zuverlässig quantifiziert werden: Dies deshalb nicht, weil nur recht unsichere und uneinheitliche Szenarien für die Klimaänderung und nicht wirkliche Prognosen vorliegen, wobei diese Szenarien immer noch in einer räumlich-zeitlichen Auflösung vorliegen, die dem stark strukturierten Alpenland Schweiz nicht gerecht werden. Ein einzelnes Tal mit seinen Gebirgszügen (z. B. Wallis) kann nicht genügend räumlich aufgelöst werden, Niederschlagsintensitäten, welche relevant für Hochwasser in kleineren Einzugsgebieten sind, können in regionalen Klimamodellen nicht berechnet werden.

In Zukunft werden dank des Projektes CCHydro des Bundesamtes für Umwelt Bafu (Volken, 2010), den Projekten Klimaänderung und Wasserkraftnutzung (Auftrag: Bundesamt für Energie und swisselectric research sowie Kanton Wallis), ACQWA (EU Forschungsprogramm), und insbesondere den Projekten innerhalb des Nationalen Forschungsprogrammes NFP 61 „Nachhaltige Wassernutzung“ (Schweizerischer Nationalfonds, 2010) vermehrt quantitative Aussagen zur Verfügung stehen.

Nachstehend werden die wichtigsten hydrologischen Einflussgrößen diskutiert und im Hinblick auf ihre Sensitivität auf Klimaänderung beurteilt. Einen umfassenden Überblick dazu geben Schädler und Weingartner (2010).

2.1 Niederschlag

Die Niederschlagsmengen (Jahresniederschläge, saisonale Niederschläge) sind großen interannuellen Schwankungen unterworfen. Auch scheinen sie periodischen Schwankungen unterworfen zu sein (Hubacher und Schädler, 2010). Deshalb sind langfristige Veränderungen nur schwer zu erkennen. Sommer-Niederschläge sind in fast allen Regionen deutlich größer als Winter-Niederschläge (Schädler, 2008). Die Niederschlagsintensitäten haben besonders im Winter in den letzten 30 Jahren des 20. Jahrhunderts zugenommen (Frei und Schär, 2001). Dies betrifft jedoch nicht die größten Intensitäten (Hegg und Vogt, 2005).

Klimaszenarien zeigen eine leichte Zunahme der Niederschläge im Winter und eine Abnahme im Sommer-Herbst. Insgesamt wird sich der Jahresniederschlag deutlich (Frei, 2004) bzw. geringfügig (Bosshard et al. 2009) vermindern (*Abb. 2*). Die intensiven Niederschläge wie auch die Anzahl der Tage ohne Niederschlag können im Sommer deutlich zunehmen (Frei et al. 2006). Allerdings sind die Unsicherheiten der Niederschlagsszenarien von gleicher Größenordnung wie das Signal der Veränderungen. Besonders den Aussagen im Sommer und über Extremwerte ist – insbesondere für den regionalen oder lokalen Rahmen – mit besonderer Vorsicht zu begegnen.

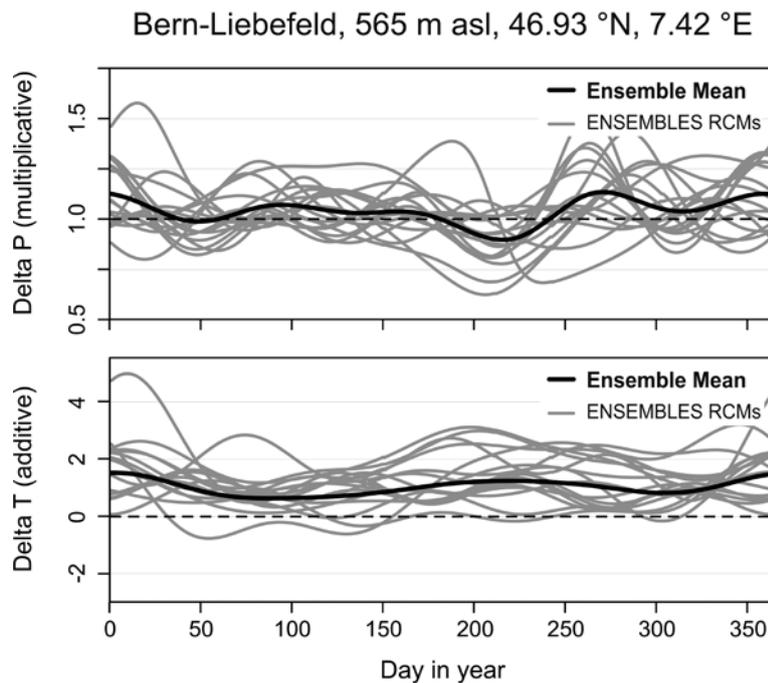


Abb. 2: Szenarien (Veränderungen) für Niederschlag (oben) und Temperatur (unten) für die Station Bern für die Zeitperiode 2020–2050 im Vergleich zu 1976–2005. Das Emissionsszenario ist A1B. Die Daten von 17 regionalen Klimamodellen des ENSEMBLES-Projektes (Hewitt & Griggs 2004) wurden auf das Stationsmessnetz herunterskaliert, korrigiert und ein mittlerer Jahresgang der Variablen berechnet (Bosshard et al. 2009).

Die Auswertungen der Klimasimulationen erlauben eine grobe Quantifizierung der Niederschlags-extremwerte für Jährlichkeiten zwischen 5 und 50 Jahren. Es zeigen sich nur geringe Unterschiede für die Extreme mit einer Dauer zwischen 1 und 5 Tagen. Zwischen den Jahreszeiten muss unterschieden werden: Im Herbst wird mit einer Zunahme der Extremwerte bis zu 10 % auf der Alpennordseite respektive 20 % auf der Alpensüdseite gerechnet. Im Winter und Frühling liegt die Zunahme beidseits der Alpen zwischen 0 und 20 %. Im ungünstigsten Fall kann ein heute 100-jährliches Ereignis in Zukunft zu einem 20-jährlichen werden (Frei et al. 2006). Im Winter und Frühling wird als Folge der Kombination von höheren Spitzen und längerer Dauer eine Zunahme der Niederschlagsvolumen erwartet.

2.2 Schnee

Die mittlere Schneehöhe, das Schneewasseräquivalent, die Dauer der Schneedecke und die Anzahl der Tage mit Schneefall haben sich in der Vergangenheit gleichartig verändert (Latarnser und Schneebeli, 2003; Scherrer und Appenzeller, 2004): Nach einem langsamen Anstieg seit Beginn der Analyse in 1931 bis in die frühen 1980er-Jahre folgte eine signifikante Abnahme in den folgenden Jahren.

Schneefall ist ein Teil der Niederschläge. Die (winterlichen) Niederschlagszenarien bilden sich also hier ab, allerdings mit einem gewichtigen Unterschied: Die Temperaturentwicklung ist entscheidend für die Veränderung der Schneefallgrenze und damit für die Ausdehnung der Schneedecke. Diese steigt um rund 200 m pro Grad Erwärmung (Occc, 2007). Trotz zunehmendem

Schneefall im Winter dürften die Schneereserven im Frühjahr kleiner werden, da die Flächen, die nicht mehr mit Schnee bedeckt werden, überproportional groß sind im Vergleich zur gesamten schneebedeckten Fläche.

2.3 Abfluss

Der mittlere Abfluss wie auch die Abflussregimes haben sich in den letzten 100 Jahren in großen Einzugsgebieten kaum verändert (Hubacher und Schädler, 2010). In kleinen hoch gelegenen und gletschernahen Fließgewässern ist er allerdings mit zunehmendem Gletscherschwund größer geworden. Dort, und nur dort, sind auch schon Veränderungen der Regimes sichtbar wie *Abb. 3* am Beispiel des Regimetyps a-glaciaire der Massa zeigt (siehe auch Barben et al., 2010; Birsan, 2005).

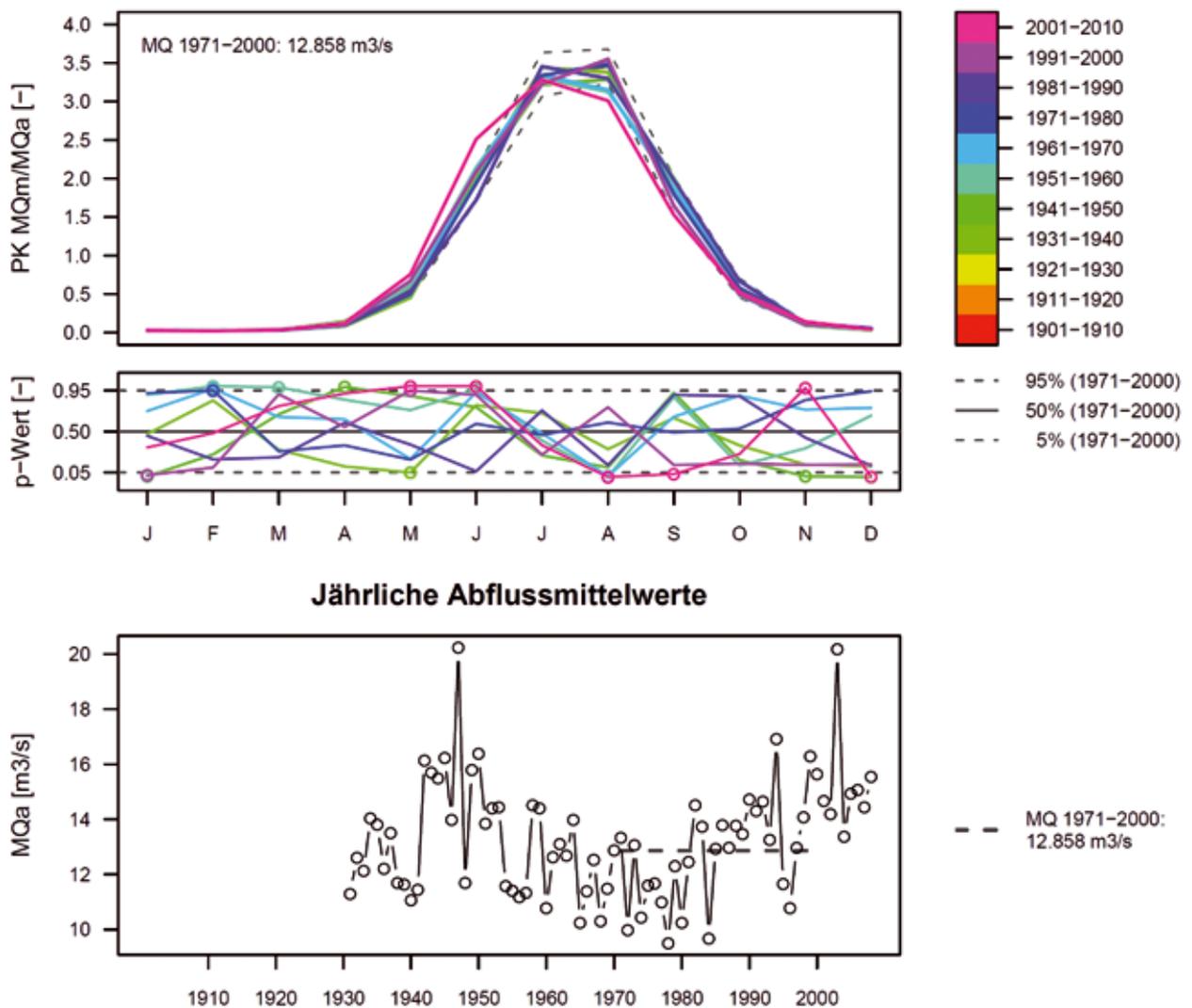


Abb. 3: Darstellung der 10-jährigen mittleren Abflussregimes inkl. dem 1971–2000 90%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linie) am Beispiel der Massa, dem Gewässer welches die Aletschgletscher entwässert (oben). Zu jedem Pardé-Koeffizient (PK) ist das Perzentil (p -Wert) dargestellt (unten), wobei signifikant unterschiedliche Werte im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 umkreist sind (Hänggi und Schädler, 2009). Ganz unten die jährlichen Abflüsse MQa im Vergleich zum Mittelwert (gestrichelt) 1971–2000.

Wie sich die monatlichen Abflüsse und damit die Regimes in Zukunft verändern können zeigt *Abb. 4*: Für Gebiete mit niedriger Höhenlage lassen sich abnehmende Monatsabflüsse verzeichnen (Broye, Ergolz, Emme). Die Abnahme ist im Sommerhalbjahr am stärksten, was auf die geringeren Niederschläge und höheren Verdunstungshöhen zurückzuführen ist. In Gebieten höherer Lagen, die von der Schneeschmelze geprägt sind (Thur, Plessur), nehmen die Winterabflüsse zu, die Frühjahrsabflüsse bleiben unverändert und die Sommerabflüsse nehmen ab. Hier führen höhere Wintertemperaturen zu einem größeren Anteil an Regen anstelle von Schnee, der direkt abflusswirksam wird. Da die Schneespeicher infolgedessen eine geringere Mächtigkeit aufweisen, sind diese zum Ende des Frühlings bereits erschöpft und der Sommerabfluss nimmt gegenüber der Kontrollperiode ab, obwohl die Niederschläge in etwa gleich bleiben. Höhere Verdunstungshöhen wirken hier ebenfalls in Richtung abnehmender Abflüsse. Das vergletscherte Testgebiet (Lütschine) zeigt eine ganzjährige Zunahme des Abflusses. Der erhöhte Abfluss im Winter ist auch hier auf einen größeren Anteil des Niederschlags in flüssiger denn in fester Form zurückzuführen. Im Frühjahr setzen die Schnee- und Anfang des Sommers die Gletscherschmelze zeitiger ein, so dass sich die Abflussspitze zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr hin verschiebt. Da bis zum Jahr 2050 die Schnee- und Gletscherspeicher noch nicht erschöpft sind, kommt es auch zum Ende des Sommers nicht zu einer Abnahme der Abflüsse gegenüber der Kontrollperiode.

Diese Regimeveränderungen dürften sich insbesondere in heute glazialen und nivalen Regimes in weiterer Zukunft zunehmend bemerkbar machen (Huss et al. 2008).

Die Niedrigwasser in natürlichen Gerinnen schwankten in der Vergangenheit kaum und weisen keinen Trend auf (Helbling et al. 2006). Für die Zukunft muss davon ausgegangen werden, dass die Niedrigwasserperioden ausgeprägter in ihrer Zeitdauer und in ihrer Wasserführung werden (OcCC, 2007). Dem entsprechend dürften auch die Q_{347} -Werte, das heißt das 95%-Quantil der Abflüsse, welche in der Schweiz für die Festsetzung der Restwassermengen entscheidend wichtig sind, eher kleiner werden.

2.4 Verdunstung (Evapotranspiration)

Die aktuelle Verdunstung liegt in der Schweiz in der Regel nahe der potenziellen Verdunstung. Nur in ausgeprägten Trockengebieten (Wallis, zeitweise Tessin, Engadin) ist die potenzielle Verdunstung größeren Einschränkungen unterworfen. Da die potenzielle Verdunstung hauptsächlich von der zur Verfügung stehenden Nettostrahlung, das heißt der verfügbaren Energie und damit von der Lufttemperatur abhängig ist, ist in fast allen Einzugsgebieten während der vergangenen 110 Jahren die Verdunstung angestiegen (Hubacher und Schädler, 2010). Mit der weiterhin zunehmenden Temperatur, teilweise auch mit den abnehmenden Schnee- und Eisflächen, wird die potenzielle Verdunstung weiter ansteigen. Da in vielen Regionen während langer Zeit im Jahr genügend Regen fällt, dürfte die reelle Verdunstung auch weiterhin noch leicht ansteigen. Damit können die Abflüsse im Sommer und im Herbst geringfügig sinken.

2.5 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur ist in allen Fließgewässern proportional zur Lufttemperatur angestiegen (Hari et al., 2006). *Abb. 5* zeigt wie in höher gelegenen und insbesondere vergletscherten Einzugsgebieten der Anstieg deutlich vermindert war. Parallel zum Anstieg der mittleren Wassertemperatur

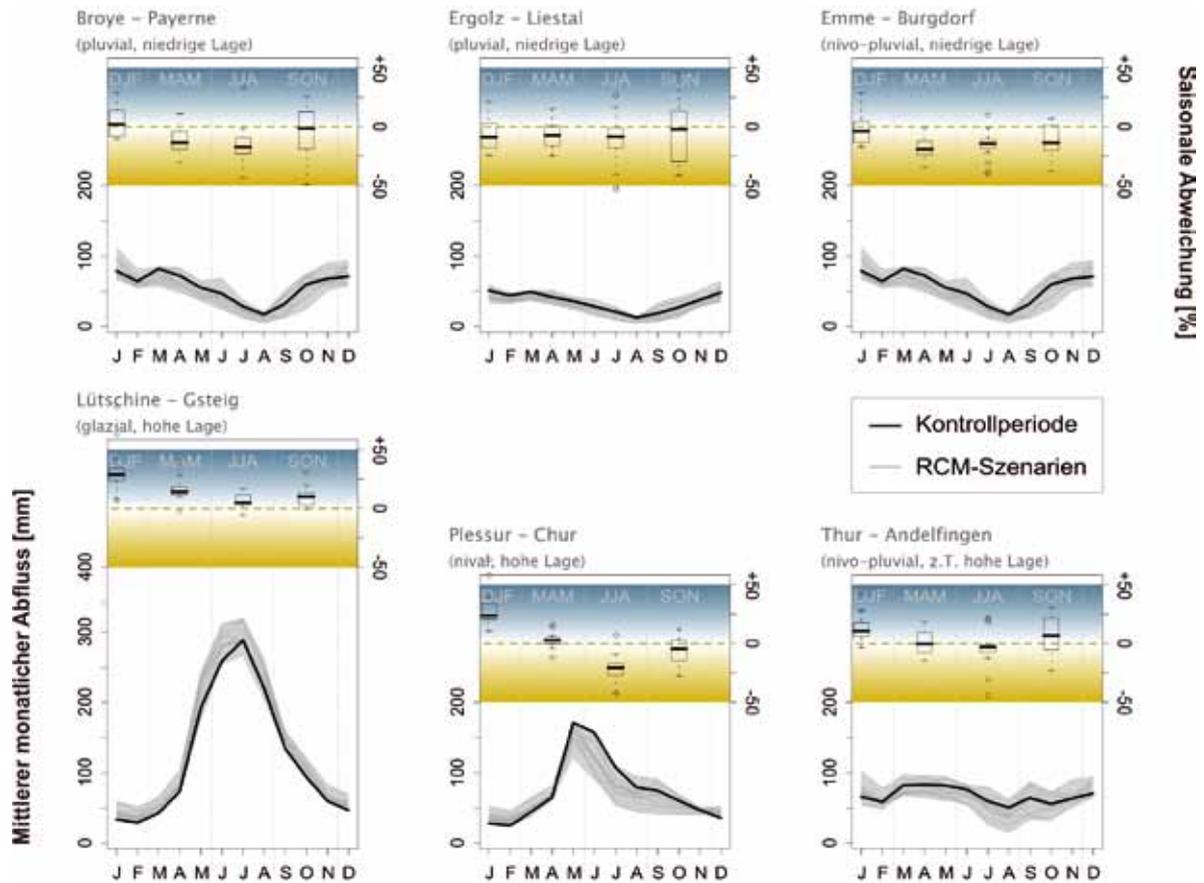


Abb. 4: Der untere Abschnitt jeder Teilgrafik zeigt das Regime des Einzugsgebietes (mittlerer Monatsabfluss [mm]) für die modellierte Kontrollperiode 1976–2005 und die Szenarioperiode 2020–2050 je RCM. Im oberen Teil sind die saisonalen Abweichungen der Szenarien gegenüber der Kontrollsimulation als Boxplots dargestellt, der gelbe Bereich bedeutet eine Abnahme der Abflüsse, der blaue eine Zunahme unter den projizierten Klimabedingungen bis 2050 (aus: Köplin et al., 2010).

sind auch die Anzahl Stunden, während derer die Wassertemperatur über kritischen Grenzwerten gelegen hat (z. B. 15, 18, 21, 24 °C) deutlich angestiegen (Jakob et al., 2007). Mit dem zukünftigen weiteren Temperaturanstieg der Luft dürfte also die Wassertemperatur in Fließgewässern und Seen kontinuierlich weiter ansteigen, wobei sie bei verminderter Schnee- und Eisbedeckung in den höher gelegenen Gebieten überproportional ansteigen dürfte.

Analysen an verschiedenen Stellen im Grundwasser zeigten, dass in den letzten 50 Jahren auch dort die Wassertemperatur vor allem in den Monaten März bis Mai um bis zu 2.5 Grad angestiegen sind (Schürch, 2009). Dieser Anstieg hat negative Konsequenzen für den Sauerstoffgehalt im Grundwasser und kann die Qualität des Trinkwassers beeinflussen.

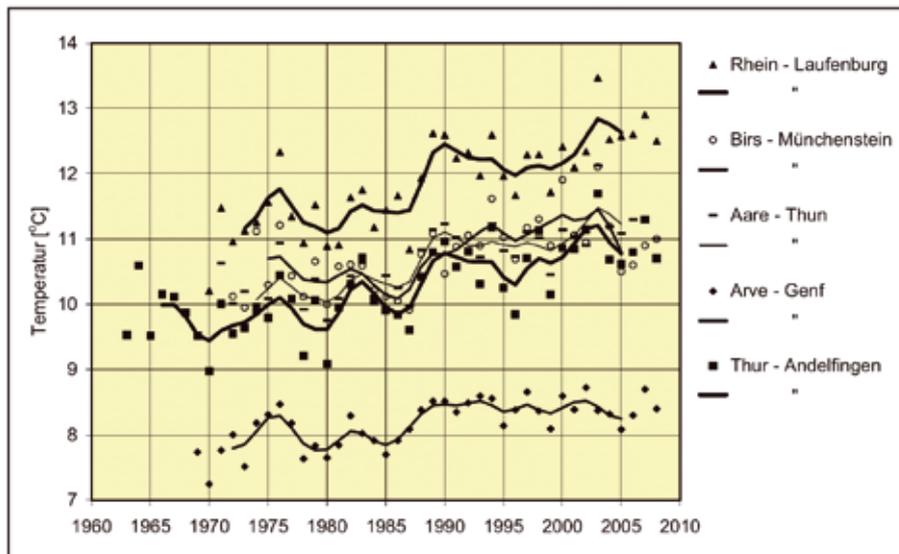


Abb. 5: Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen größerer Flüsse. Der Temperatursprung ist vor allem bei Messstationen wie z. B. Arve-Genf, die im Einflussbereich von Gletschern liegen, unterproportional (Bild aus: Jakob et al., 2010).

2.6 Sedimenttransport

Zum Transport von Feststoffen (Schwebstoffe und Geschiebe) liegen Daten nur über relativ kleine Zeiträume vor (Grasso et al. 2010a und 2010b, Jakob und Spreafico, 1997). Wegen der ausgesprochen großen interannuellen Variabilität (mehrere Größenordnungen) können dazu keine Trendaussagen gemacht werden. Für Stauräume konnten empirische Beziehungen zwischen dem Feststoffeintrag und der Bodennutzung, der rel. Längenänderung von Gletschern und dem Niederschlag hergeleitet werden (Schleiss et al., 2010). Daraus wird auch klar, dass in Zukunft mit dem Abschmelzen der Gletscher die Feststoffeinträge in die Stauräume größer werden dürften.

2.7 Grundwasser

Die großen Grundwasservorkommen in der Schweiz sind einerseits durch die Nutzung stark anthropogen beeinflusst. Andererseits sind sie oft in einer gegenseitigen Abhängigkeit mit den Oberflächengewässern, das heißt je nach Wasserständen wird Wasser ins Grundwasser infiltriert oder Wasser aus dem Grundwasser exfiltriert. Entsprechend sind langjährige Veränderungen der Grundwasserspiegel kaum zu identifizieren. Kleinere und natürliche Grundwasservorkommen sind bisher noch wenig ausgewertet (Schürch, 2009). In Zukunft können die Grundwasser jedoch durch die Klimaänderung sowohl quantitativ (Veränderungen im Niederschlag, in der Schnee- und Gletscherschmelze) wie auch qualitativ (Temperatur, chemisch-physikalische Eigenschaften) verändert werden.

3 Auswirkungen auf wichtige Teilgebiete der Wasserwirtschaft

3.1 Wassernutzung zur Stromerzeugung

Die Schweiz deckt rund 60 % der Elektrizitätsnachfrage respektive 1/8 des gesamten Energiebedarfs durch Wasserkraft. Die Klimaänderung ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Stromproduktion. Einerseits ist die Wasserkraft stark abhängig vom Wasserangebot (Niederschlag und Schmelzwasser), andererseits sind thermische Kraftwerke, wie z. B. Kernkraftwerke auf ausreichende Mengen an Kühlwasser angewiesen.

Kurzfristig steht im Sommer wegen der abschmelzenden Gletscher örtlich ein größeres Wasserangebot für die Wasserkraft zur Verfügung. Langfristig werden jedoch das Wasserangebot und damit die Stromproduktion im Sommer eher abnehmen. Für die Reduktion der Abflussmengen sind abnehmende Niederschläge und erhöhte Verdunstung verantwortlich. Der geringere Wasserabfluss dürfte bis 2050 zu einer um bis zu 7 % geringeren Wasserkraftproduktion führen.

Wegen der höheren Wassertemperaturen können Kernkraftwerke im Sommer weniger Kühlleistung aus den Flüssen beziehen und die Stromproduktion wird abnehmen. Im Sommer 2003 musste beispielsweise die Leistung der Kernkraftwerke in der Schweiz während 2 Monaten um 25 % gedrosselt werden. Dies reduziert die Strommenge im Jahr um 4 %. Die Wassertemperaturen in den Flüssen werden bis 2050 weiter ansteigen. Als Folge davon müssen die technischen Einrichtungen zur Kühlung von thermischen Kraftwerken angepasst und erweitert werden, um Produktionseinschränkungen möglichst zu vermeiden. Neue thermische Kraftwerke müssen in Zukunft mit Kühltürmen ausgerüstet werden.

3.2 Hitze und Trockenheit

Für die Landwirtschaft wird es auch in der Schweiz vermehrt zu trockenen Böden und Sommerdürren kommen. Bewässerung wäre dann vielerorts nötig (Fuhrer und Jasper, 2009). Entsprechend müssen in Zukunft die notwendigen Geräte angeschafft werden und die Landwirte müssen für eine effiziente Bewässerungstechnik ausgebildet werden. Auch müssen wo möglich andere Pflanzensorten angebaut werden, welche weniger Wasser benötigen.

Die Rheinschifffahrt ist ein wichtiger Versorgungsweg für die Schweiz. Jährlich werden 9 Mio. Tonnen Güter (15 % des mengenmäßigen Außenhandels) auf dem Rhein in die Schweiz transportiert. Durch verstärkte Niedrigwasser im Sommer und Herbst würde die Transportkapazität teilweise massiv eingeschränkt. Ein unerwünschtes Ausweichen auf teurere und energieintensivere Transportmittel wäre die Folge. Insgesamt entsteht vor allem während Trockenzeiten in den kleinen und mittleren Fließgewässern im Mittelland eine neue Konkurrenz ums Wasser: die Landwirtschaft möchte Bewässerungswasser pumpen, der Kühlwasserbedarf der Kraftwerke und der Industrie steigt, wegen sinkender Grundwasserstände versickert mehr Wasser aus den Fließgewässern, die Trinkwasserförderung entnimmt mehr Wasser und Ökosysteme am und im Wasser benötigen zum Überleben genügend und nicht zu stark erwärmtes Wasser.

3.3 Wasserversorgung mit Trink- und Brauchwasser

Extreme Trockenperioden werden – entsprechend der Abnahme der mittleren Niederschläge und der Anzahl der Niederschlagstage – im Sommer länger und häufiger auftreten. Die Kombination von Niederschlagsabnahme und höherer Verdunstung kann regional zu einer Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts im Boden führen. Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen könnte in diesen Regionen notwendig werden. Zu den heute rund 55'000 Hektaren bewässerten Flächen werden in Zukunft weitere dazukommen. Die Landwirtschaft braucht in einem normalen Trockenjahr schon heute gegen 150 Mio. Kubikmeter Bewässerungswasser (BLW, 2007). Es wird erwartet, dass in den nächsten Jahren der Bedarf auf 170 Mio. m³ ansteigt.

Mit der Abnahme der Schneereserven in den Alpen werden zudem Flüsse, die heute im Sommer von Schmelzwasser gespeist werden, häufiger austrocknen sowie die saisonale Wasserspeicherung in den Alpen abnehmen. Die Grundwasserneubildung im Winter wird eher zunehmen und im Sommer und Herbst zurückgehen. Die Grundwasserstände werden insgesamt leicht sinken. Das geringere Wasserangebot führt zu einer Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Nutzungen und Nutzern:

- Landwirtschaft (Bewässerung),
- Trinkwassernutzung,
- Brauchwassernutzung (z. B. Kühlung),
- Tourismus (im Winter, lokal, Beschneigung),
- evtl. Wasserkraftnutzung,
- ökologischen Anforderungen in den Fließgewässern (Mindestwasserführung),
- Anforderungen der Wasserentsorgung (ARA-Einleitungen),
- internationale Ansprüche.

Wasser wird damit – allerdings zeitlich und örtlich beschränkt – vor allem im Sommer zunehmend zu einem knappen Gut werden. Die Notwendigkeit einer geeigneten Bewirtschaftung wird zunehmen (Gander, 2009). Dies wird Auswirkungen auf Nutzungs-Prioritäten, Nutzungs-Rechte und Nutzungs-Preise haben. Neben den Ansätzen der Bewirtschaftung sind auch Maßnahmen auf der Nachfrageseite zu treffen, insbesondere bei der Landwirtschaft (effizienter Einsatz von Bewässerungstechniken bis hin zur Wahl der angepflanzten Kulturen) und beim Brauch- und Trinkwasserbedarf.

3.4 Gewässerökologie

Die Klimaänderung hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Wassertemperaturen. In der Schweiz werden die Wassertemperaturen in den Flüssen und in der Oberflächenschicht der Mittellandseen bis 2050 um ungefähr 2 °C gegenüber 1990 ansteigen. Als Folge der künftigen Erwärmung kann es in Seen, die heute einen ausreichenden Sauerstoffgehalt aufweisen, zu einer Verschlechterung der Lebensbedingungen kommen.

Die Erwärmung der Gewässer hat Auswirkungen auf Kaltwasserfische; ihre geeigneten Habitate werden verkleinert und die Artenzusammensetzung verändert sich. Kalt- und Warmwasserfische profitieren von den wärmeren Wintern. Abschätzungen zeigen, dass bei einer Erwärmung von

2 °C bis 2050 die Lebensräume der Salmoniden in der Schweiz um 1/5 bis 1/4 gegenüber heute schrumpfen werden. Von den wärmeren Wintertemperaturen profitieren sowohl Kalt- als auch Warmwasserfische; die Wachstumsphasen dauern länger und die Fische wachsen schneller. Als Folge davon werden die Gewässer geeigneter für Karpfen (Cypriniden) und exotische Fischarten. Krankheiten wie die Parasiteninfektion PKD (Proliferative Kidney Disease) werden sich bei wärmeren Wassertemperaturen ausbreiten.

3.5 Hochwasser

Aussagen zur Entwicklung der Hochwasserabflüsse sind saisonal, regional und auch bezogen auf die Einzugsgebietsgröße differenziert zu betrachten (KOHS, 2007; Schädler et al., 2007).

Nordalpine Gebiete unter 1500 m ü. M.: Im Winter sind durch erhöhte Bodenwassergehalte und durch höhere Niederschlagsleistungen höhere Hochwasserspitzen zu erwarten. Trotz Erwärmung bleiben im Mittelland Schneedecken und damit kombinierte Schmelz-/Regenereignisse weiter möglich. Der Einfluss von Schmelzereignissen nimmt wie bisher mit der Höhenlage der Einzugsgebiete im betrachteten Höhenbereich zu. In diesen Gebieten treten bereits heute im Winter und Frühjahr die Jahreshochwasser auf. Sie können auch in Zukunft bis ins Frühjahr vorkommen, werden aber dem Klima entsprechend höher.

Im Sommer werden die Hochwasser besonders in tieferen Lagen geringer ausfallen, weil die Abflussdisposition der Böden durch verringerte Niederschläge und höhere Verdunstung deutlich reduziert ist. Allerdings ist zu beachten, dass im Sommer immer auch mit konvektiven Starkniederschlägen zu rechnen ist, welche hauptsächlich in kleinen Einzugsgebieten zu Hochwasser führen können.

Nord- und inneralpine Gebiete über 1500 m ü. M.: Die Regimes in den Alpen wechseln von glazialer zu nivaler Prägung. Im Winter steigen die Abflüsse wegen gelegentlicher Regenfälle etwas an. Daraus ergeben sich jedoch keine wirklichen Hochwasser. Im Frühjahr sind kleine Schmelzhochwasser möglich, die Spitzen werden größer als heute. Die Jahreshochwasser werden jedoch wie heute im Sommer auftreten und voraussichtlich nicht größer werden. Im Herbst sind kaum Veränderungen zu erwarten.

Alpensüdseite: Im Winter und Frühjahr lassen die stärker wachsenden Niederschlagsleistungen auch eine entsprechende Hochwasserzunahme erwarten. Im Sommer deuten abnehmende Niederschläge auf kleinere Abflussspitzen hin. Maßgebend für die Jahreshochwasser bleiben die hydrometeorologischen Bedingungen im Herbst. Dabei lassen die höheren Niederschlagsleistungen eine Zunahme der Hochwasser erwarten.

3.6 Hochwasserschutz

Sowohl die erwartete Zunahme des Schadenspotenzials als auch die Möglichkeit häufigerer Hochwasser erfordern einen höheren Schutz vor Hochwasser. Die flexible Hochwasserstrategie der Schweiz beinhaltet raumplanerische Maßnahmen zur Begrenzung des Schadenspotenzials, Objektschutz zur Minderung der Schadenempfindlichkeit, bauliche Schutzmaßnahmen sowie Notfallmaßnahmen. In jedem Fall muss dem erhöhten Unsicherheitsgrad in der Hochwasser-

schutzbemessung durch die Berücksichtigung des Überlastfalls minimiert werden. Eine ständige Überprüfung der Risikosituation ist Voraussetzung für eine langfristige Wirksamkeit der Umsetzung der Strategie, da sich sowohl Schadenspotenzial als auch Gefahrensituation laufend ändern. Auch könnten in Zukunft alpine Speicherbecken vermehrt für den Rückhalt von Hochwasserspitzen eingesetzt werden. Ihr Einsatz als Mehrzweckanlagen wird an Bedeutung gewinnen.



Abb. 6: Die Hochwasserrückhalteanlage Orden (bei Maloja im Oberengadin) schützt das Bergell vor Hochwasser und Murgängen, die der Orlegna-Bach aus dem Fornotal mit sich bringt. Die Mauer ist 43 m hoch, die Dammkrone 171 m lang und das Rückhaltevolumen beträgt 1.7 Mio. m³. Mit dem Rückgang der Gletscher und dem Auftauen von Permafrost wird das Feststoffpotenzial im Fornotal zunehmen. Das Rückhaltebecken wird in Zukunft eine zunehmende Bedeutung für den Geschieberückhalt haben.

3.7 Feststofftransport

Durch den Rückzug der Gletscher und das Auftauen von Permafrost nimmt in Gebieten zwischen ca. 2300 und 2800 m ü. M. das Feststoffpotenzial deutlich zu. Der neue lose Schutt sammelt sich in Gletschervorfeldern, in Gräben und Bachbetten und kann bei Hochwasser, ausgelöst durch möglicherweise intensivere und bis in größere Höhen flüssige Niederschläge, mitgerissen und als Murgang zu Tal und bis in bewohnte Gebiete gelangen. Erosion, Geschiebetransport und Feststoffablagerungen sind bei Hochwasser sehr oft für die großen Schäden verantwortlich. Das Potenzial für solche Ereignisse wird, allerdings nur im Gebirgsraum, deutlich steigen.

In den Voralpen lassen die erwähnten künftigen hydrometeorologischen Bedingungen (Niederschlag, Schneedecke, Verdunstung) im Winter und Frühjahr über längere Phasen auf wassergesättigte Böden schließen. Nasse Böden in steilen Hängen können bei intensiveren Niederschlägen als Rutschungen niedergehen. Insgesamt nimmt damit das Schadenrisiko für Infrastrukturanlagen wie Verkehrsverbindungen und touristische Einrichtungen im Berggebiet zu.

3.8 Internationale Ansprüche

Weiter unten an den Fließgewässern liegende Anrainerstaaten haben legitime Ansprüche auf eine genügende Wasserversorgung. Auch ist es durchaus denkbar, dass Nachbarstaaten Ansprüche bezüglich der Erhöhung des Wasserstands bei Niedrigwasser und der Abminderung von Hochwasser sowie für die Lieferung größerer Mengen Trinkwasser stellen. Dadurch nimmt die Bedeutung der Alpen als Wasserschloss Europas noch zu.

Rhein, Bodensee, Rhone, Lac Léman, Tresa, Lago Maggiore, Lago Lugano und Inn sind die wichtigsten internationalen Gewässer. Alle sind entsprechend von Interessen des Auslandes betroffen, welche teilweise schon heute in internationalen Abkommen geregelt sind (Wasserqualität), aber auch solchen, die nicht geregelt sind:

- Rückhalt in Seen für Hochwasserminderung,
- Rückhalt in Seen für Niedrigwasseraufhöhung und Bewässerungswasserreserve,
- Nutzung von Trinkwasser,
- Nutzung zur Kühlung thermischer Kraftwerke.

4 Fazit

Die bis ins Jahr 2050 zu erwartenden Folgen der Klimaerwärmung auf den Wasserkreislauf scheinen aus heutiger Sicht und unter der Voraussetzung, dass die Erwärmung im erwarteten Rahmen bleibt, für die Schweiz bewältigbar. Diese Feststellung darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die längerfristige Entwicklung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts entscheidend von den in den nächsten Jahren und Jahrzehnten getroffenen Emissionsminderungsmaßnahmen abhängig ist und die Folgen im Falle einer „Business-as-usual-Entwicklung“ viel größere Ausmaße annehmen werden. Um rechtzeitig den Auswirkungen der Klimaänderung begegnen zu können, ist die Schweizerische Regierung – der Bundesrat – zur Zeit daran, eine „Schweizerische Anpassungsstrategie an die Klimaänderung“ zu erarbeiten und dem Parlament wenn möglich im Jahr 2011 zur Genehmigung vorzulegen. Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche und koordinierte Anpassungsstrategie in der Schweiz wird darin bestehen, die Verantwortlichkeiten und der Zusammenarbeit im Rahmen Bund – Kantone – Gemeinden zu klären. Die ist die Voraussetzung, auch in der Schweiz ein „integrales Wassermanagement für die Schweiz und für ihre Einzugsgebiete“ zu verwirklichen (Schaffner et. al, 2010). Eines der Werkzeuge dazu ist die vor kurzem eingeführte Initiative der „Wasseragenda 21“.

Literatur

- Barben, M.; Hänggi, P.; Viviroli, D (2010).: Wasserhaushalt ausgewählter mittelgrosser Einzugsgebiete 1961-2007 1961-2007. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 6.5. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Birsan, M., Molnar, P., Burlando, P. and Pfandler, M., 2005. Streamflow trends in Switzerland. *J. Hydrology* 314 (2005), 312-329.
- Bosshard, T., Ewen, T., Kotlarski, S. and Schär, C. (2009): The annual cycle of the climate change signal – An improved method for use in impact studies, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-7095.
- BLW Bundesamt für Landwirtschaft (2007): Stand der Bewässerungen in der Schweiz – Bericht zur Umfrage 2006, Bern.

Hydrologische Veränderungen und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz

- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., and Funk, M. (2009): An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 68/3, p. 225-231.
- Frei C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Erhältlich unter http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html.
- Frei, Ch., and Schär, Ch. (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in Alpine region. In: *J. Clim.* 14, p. 1568-1584..
- Frei C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli, und P.L. Vidale (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Freiburghaus, M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *Gas-Wasser-Abwasser gwa* 12/2009, p. 1001-1009.
- Fuhrer, J., Jasper, K. (2009). Bewässerungsbedürftigkeit von Acker und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* 16 (10), p. 396-401.
- Gander, B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgungen. *Gas-Wasser-Abwasser, gwa* 4/2009, p. 1-9.
- Grasso, A., Jakob, J., Spreafico, M., und Bérod, D. (2010a): Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. *Wasser Energie Luft*, 102. Jg, Heft 1, p. 41-45.
- Grasso, A., Dobmann, J., Jakob, A. (2010b): Geschiebefrachten in ausgewählten Einzugsgebieten. Tafel 7.8. In: Weingartner R, Spreafico M. (eds) *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Hänggi, P. und Schädler, B. (2009): Veränderungen der Abflussregimes aus ausgewählten Einzugsgebieten der Schweiz. *Arbeitsbericht, Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung, GIUB, Bern*, 65 p.
- Hari, R., Livingstone, D., Siber, R., Burckhardt-Holm, P., Güttinger, H. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12, p- 10-26.
- Hegg, C. and Vogt, S. (2005): Häufigkeiten und Trends von Starkniederschlägen in der Schweiz im Zeitraum 1864-2002. *Wasser-Energie-Luft*, 97: 209-212.
- Helbling, A., Kan, C., and Marti, Ph. (2006): Niedrigwasser – kleinste Mehrtagesmittel des Abflusses. Tafel 5.11. In: Weingartner R, Spreafico M. (eds) *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*. Bundesamt für Umwelt, Bern..
- Hewitt, C. D. & D. J. Griggs (2004): Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 85(52), doi:10.1029/2004EO520005.
- Hubacher R. und Schädler B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Tafel 6.6. In: Weingartner R, Spreafico M. (eds) *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, M., and Funk, M. (2008): Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate, *Hydrol. Processes* 22 (19) p. 3888–3902.
- Jakob A., Pfammatter F. & Schädler M. (2007) Temperaturveränderungen 1976-2005. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 7.7; Weingartner R, Spreafico M. (eds). Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Jakob, A., Binderheim, E., Schädler, M., und Pfammatter, F. (2010): Temperaturen in Schweizer Fließgewässern – Langzeitbeobachtung. *Gas-Wasser-Abwasser gwa* 3/2010, p. 221-231.
- Jakob, A., Spreafico, M., (1997): Schwebstoffkonzentrationen und –frachten in Fließgewässern. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 7.4; Weingartner R, Spreafico M. (eds). Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. and Weingartner, R. (2010): Klimasensitivität mesoskaliger Einzugsgebiete im Schweizer Alpenraum. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Im Druck.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS), *Wasser Energie Luft*, 99, 55-57.
- Latarnser, M. and Schneebeli, M., (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-1999). *Int. J. of Climatology*, 23: 733-750. DOI: 10.1002/joc.912.

- Maisch, M., Paul, F. and Käab, A. (2004): Kenngrößen, Flächen- und Volumenänderungen der Gletscher 1850-2000, Tafel 3.10, Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Bern, Bundesamt für Wasser und Geologie.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J. C. J., Lang, H., Parmet, B. W. A. H., Schädler, B., Schulla, J., and Wilke, K. (2001): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, *Climatic Change*, 49, 105-128.
- OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC/ProClim, Bern, 168 S.
- Schädler, B., Frei, C., Grebner, D. and Willi, H. P. (2007): Grundlagen zum Klima, *Wasser Energie Luft*, 99, 58-60.
- Schädler, B. (2008): Klimawandel – geht uns das Wasser aus? *Gas-Wasser-Abwasser*, 10/2008, p. 763-769.
- Schädler B, Weingartner R (2010): Impact of Climate Change on Water Resources in the Alpine Regions of Switzerland. Bindi U, ed. *Alpine Waters. Handbook of Environmental Chemistry, Volume 6*. Springer, Berlin, D, ISBN 978-3-540-88274-9, p. 59–70.
- Schaffner, M., Pfaundler, M., und Aschwanden, H. (2010): Stand und Zukunft der Schweizer Wasserwirtschaft – Ein breit abgestütztes Meinungsbild. *Wasser Energie Luft*, 102. Jg, Heft 1, p. 47-53.
- Scherrer, S. and Appenzeller, C., (2004): Trends in Swiss Alpine snow days: the role of local- and large-scale climate variability. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L13215, doi: 10.129/2004GL020255.
- Schleiss, A., De Cesare, G., und Jenzer Althaus, J. (2010): Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Wasser Energie Luft*, 102. Jg, Heft 1, p. 31-40.
- Schmocker-Fackel, P. and Naef, F. (2010): More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850, *J. Hydrol.*, 381, 1-8.
- Schürch, M. (2009): Grundwasser im Fokus der Klimaänderung. *Geosciences Actuel*, 3/2009, p.21-24.
- Schweizerischer Nationalfonds (2010): Nachhaltige Wassernutzung, Portrait des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61, Bern, 54p.
- Viviroli, D. und Weingartner, R. (2004) Zur hydrologischen Bedeutung des Europäischen Alpenraums. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 6.4), Bern.
- Volken D. (2010): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz, KLIWA – Berichte (in preparation).

Anschrift des Autors:

Dr. Bruno Schädler
Universität Bern
Gruppe für Hydrologie
Geographisches Institut
Hallerstrasse 12, 3012 Bern (CH)
E-Mail: bruno.schaedler@giub.unibe.ch

Klimawandel im Alpenraum – Ergebnisse von GLOWA-Danube

Wolfram Mauser und Monika Prasch

1 Einleitung

Der Globale Klimawandel wird neben der zunehmenden Internationalisierung der Wirtschaft, Landnutzungsänderungen, dem demografischen Wandel u. v. m. die zukünftigen Lebensbedingungen der Menschen verändern (IPCC 2007, Mauser und Ludwig 2002). Dabei wird es verstärkt zu regionalen Veränderungen der Wasserressourcen kommen, die die Entwicklung der Region nachhaltig beeinflussen. Um die in den nächsten Jahren anstehenden, über Jahrzehnte wirksamen Zukunftsinvestitionen (z. B. im Energiesektor, in der Landwirtschaft, im Tourismus, in der Industrie) optimal zu gestalten, ist daher eine intensive Auseinandersetzung mit den Folgen des Klimawandels notwendig.

Der Projektverbund GLOWA (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs, www.glowa.org) wurde vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Ziel ins Leben gerufen, die regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Wasserressourcen anhand ausgewählter Einzugsgebiete zu untersuchen und die dazu nötigen Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung zu entwickeln, um ein nachhaltiges Management der Ressource Wasser zu ermöglichen. Innerhalb dieses Verbundes beschäftigt sich das Forschungs- und Entwicklungsprojekt GLOWA-Danube (www.glowa-danube.de, Mauser und Ludwig 2002) auf integrative Weise mit der umfassenden Analyse der regionalen Folgen des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Dabei wird zum einen untersucht, wie sich der Globale Wandel, d. h. sowohl der Klimawandel als auch der demografische sowie der ökonomische Wandel auf die Wasserressourcen der Oberen Donau im Zeitraum der nächsten 50 Jahre auswirken wird. Zum anderen werden im Rahmen eines intensiven Dialogs mit Stakeholdern aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft geeignete regionale Handlungsoptionen für die Anpassung an und die Vermeidung von Klimafolgen identifiziert, simuliert und ihre Wirksamkeit überprüft. Dazu arbeiten Wissenschaftler aus verschiedensten Disziplinen der Natur-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften seit 2001 in einem interdisziplinären, universitären Kompetenznetzwerk zusammen.

Als Untersuchungsgebiet wurde das Einzugsgebiet der Oberen Donau gewählt, das durch den Pegel Achleiten bei Passau nach dem Zusammenfluss von Donau und Inn definiert ist (*Abb. 1*). Mit mehr als 10 Millionen Einwohnern und einer Fläche von 77.000 km² zählt es zu einem der größten und bedeutendsten Alpen-Einzugsgebiete Europas. Die Hydrologie der Oberen Donau wird weitgehend durch die Alpen bestimmt. Das starke Relief mit Höhenunterschieden von bis zu 3600 m führt zu einer außergewöhnlich breiten Palette von Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt. Das Einzugsgebiet beinhaltet sowohl Gletscher als auch landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete in den Vorländern. Hinzu kommt eine vielfältige und intensive Nutzung der Wasserressourcen für Wasserkraft, Landwirtschaft (zukünftig evtl. Bewässerung) und Tourismus (z. B. Schneekanonen). Das Einzugsgebiet der Oberen Donau bündelt somit in exemplarischer Weise viele Wassernutzungsprobleme Mitteleuropas und stellt deshalb ein hervorragend geeignetes, mesoskaliges Untersuchungsgebiet für die Auswirkungen des Klimawandels auf Gebirgs-Vorland Regionen in den temperierten Mittelbreiten dar.



Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet der Oberen Donau.

2 Das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA

Um sowohl die regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels zu simulieren als auch geeignete Adaptionsmaßnahmen abzuleiten, wurde im Rahmen von GLOWA-Danube das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA (Barth et al. 2004) entwickelt.

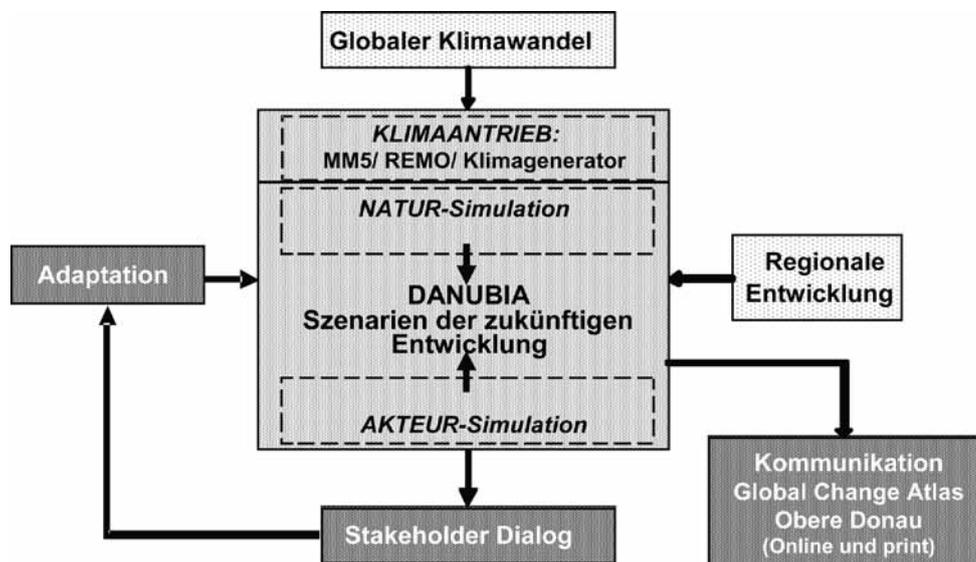


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Entscheidungsunterstützungsystems DANUBIA.

DANUBIA ist ein integratives, gekoppeltes Simulationsmodell, das sich dadurch auszeichnet, dass es erstmals Modellkomponenten für naturwissenschaftliche und sozioökonomische Prozesse gemeinsam und in ihrer gegenseitigen Beeinflussung berücksichtigt. DANUBIA wurde von Grund auf neu entwickelt, um die für die Untersuchung von Zukunftsszenarien notwendige Prognosefähigkeit möglichst gut zu gewährleisten. Physikalische und physiologische Komponenten beschreiben die natürlichen Prozesse (Hydrologie, Hydrogeologie, Pflanzenphysiologie, Ertrag

sowie Glaziologie) auf der Basis des Modells PROMET (Mauser und Bach 2009). Die naturwissenschaftlichen Prozessbeschreibungen in den hydrologischen Teilmodellen wurden deshalb nicht an gemessenen Abflüssen kalibriert. Zur Simulation der Entwicklungen in den berücksichtigten gesellschaftlichen Sektoren (Landwirtschaft, Wirtschaft, Wasserversorgungsunternehmen, private Haushalte und Tourismusunternehmen) benutzt DANUBIA tiefe Multi-Akteursmodelle, die Entscheidungen der beteiligten Akteure auf Grundlage der Gesellschaftsstruktur und der jeweiligen Rahmenbedingungen und Interessen abbilden. In einem intensiven Dialog mit Stakeholdern aus der Politik, Verwaltung und Wirtschaft werden die Simulationsergebnisse diskutiert und Handlungsoptionen entwickelt, die in den weiteren Simulationsläufen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden schließlich durch den Global Change Atlas Obere Donau (GLOWA-Danube-Projekt 2009) sowohl in einer print- als auch in einer online-Version (www.glowa-danube.de/atlas/index.php) den Entscheidungsträgern aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft zur Verfügung gestellt. *Abb. 2* zeigt den schematischen Aufbau von DANUBIA.

DANUBIA wurde mit umfangreichen Datensätzen der Jahre 1971–2003 eingehend validiert. Stellvertretend dafür wird hier die Güte des modellierten täglichen Abflusses an verschiedenen Pegeln im Einzugsgebiet der Oberen Donau gezeigt. Vergleicht man den gemessenen mit dem modellierten täglichen Abfluss am Gebietsauslass in Achleiten, so ist eine hohe Übereinstimmung zu erkennen, wie die *Abb. 3 und 4* zeigen. 87 Prozent der Varianz der täglichen Messwerte wird durch das Modell wieder gegeben, während ein Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (Nash und Sutcliffe 1970) von 0.84 erreicht wird. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass mit DANUBIA die tägliche Variabilität des Wasserhaushaltes wieder gegeben werden kann, auch wenn auf den *Abb. 3 und 4* eine leichte Überschätzung der Hochwasserereignisse zu erkennen ist, die auf die fehlende Berücksichtigung von Überschwemmungsflächen und Dammbrochen zurück geführt werden kann.

Tabelle 1 zeigt die Gütemaße sowie die Charakteristika weiterer Pegel im Einzugsgebiet der Oberen Donau, die die Modellqualität von DANUBIA im Wesentlichen bestätigen.

Für die detaillierte Beschreibung der Teilmodelle von DANUBIA sowie die Validierung der Ergebnisse wird auf GLOWA-Danube-Projekt (2009) verwiesen.

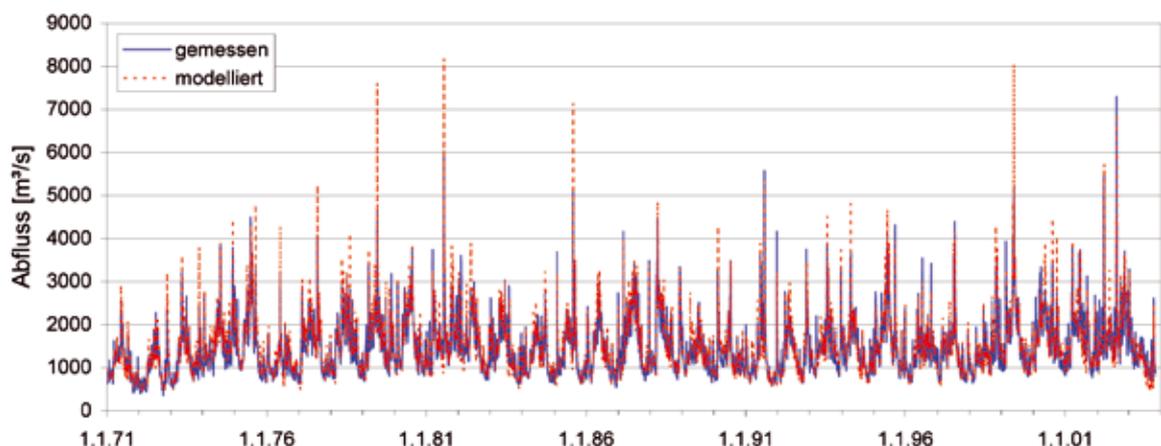


Abb. 3: Verlauf des gemessenen und modellierten täglichen Abflusses am Pegel Achleiten von 1971 bis 2003 (Mauser and Bach 2009).

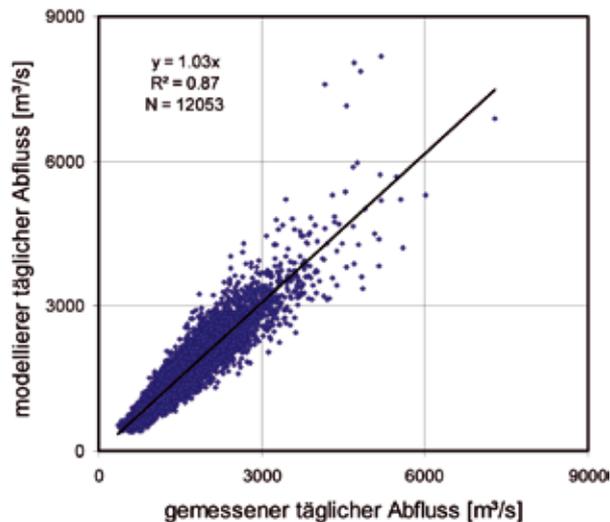


Abb. 4: Vergleich von gemessenem und modelliertem täglichem Abfluss am Pegel Achleiten an der Donau von 1971 bis 2003 (Mauser und Bach 2009).

Tabelle 1: Gütemaße der Validierung von modellierten mit gemessenen täglichen Abflüssen an verschiedenen Pegelstellen sowie deren Charakteristika im Einzugsgebiet der Oberen Donau (Mauser und Bach 2009).

Pegelname	Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km ²]	Steigung der Regressionsgeraden	R ²	Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
Achleiten	Donau	76 673	1.03	0.87	0.84
Hofkirchen	Donau	46 496	1.11	0.87	0.81
Dillingen	Donau	11 350	1.13	0.84	0.72
Oberaudorf	Inn	9 715	0.94	0.81	0.80
Plattling	Isar	8 435	1.08	0.75	0.47
Laufen	Salzach	6 112	0.86	0.85	0.80
Heitzenhofen	Naab	5 431	0.99	0.78	0.79
Weilheim	Ammer	607	0.98	0.63	0.69

3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt an der Oberen Donau

Im Folgenden werden zuerst die GLOWA-Danube-Szenarien als Klimaantrieb für DANUBIA vorgestellt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen dann die Auswirkungen des Klimawandels unter den gewählten Szenarien auf den Wasserhaushalt der Oberen Donau.

3.1 Die GLOWA-Danube-Szenarien

Die GLOWA-Danube-Szenarien beschreiben den Unsicherheitstrichter einer möglichen zukünftigen Entwicklung sowohl des Klimas als auch der gesellschaftlichen Entwicklung. Deshalb bestehen sie zum einen aus einem Klimaszenario verschiedener Ausprägungen und zum anderen aus einem Gesellschaftsszenario. Die GLOWA-Danube-Klimaszenarien stellen regionale Antriebe für

die Modellierung der hydrologischen Prozesse bereit. Alle beruhen auf der Annahme, dass sich die Emissionen nach dem globalen IPCC A1B Szenario (IPCC 2007) entwickeln werden und geben dann die regionalen Trends verschiedener regionaler Klimamodelle wieder. Die Klimaszenarien basieren auf Klimatrends, die sich in verschiedene Klimavarianten unterteilen. Die meteorologischen Antriebe werden sowohl aus Klimadaten der Vergangenheit mit Hilfe des Klimagenerators KLIMAGEN statistisch generiert werden bzw. auf bias-korrigierten Ergebnissen regionaler Klimamodelle beruhen. Die angenommene künftige Temperatur- und Niederschlagsentwicklung der Klimatrends ist in *Abb. 5* mit aufgeführt. Die Klimavariante spezifiziert den generellen Klimatrend, wobei hier für bestimmte Fragestellungen hinsichtlich der Wasserressourcen interessante Varianten aus jeweils 5000 verschiedenen Läufen des Klimagenerators ausgewählt wurden. Schließlich unterscheiden die Gesellschaftsszenarien zwischen der Fortführung des Status quo, einer von freiem Wettbewerb gesteuerten Gesellschaft und einer, die sich auf die gesamtgesellschaftliche Verantwortung rückbesinnt.

Ein GLOWA-Danube-Szenario setzt sich also aus der Kombination eines Klimatrends, einer Klimavariante und eines Gesellschaftsszenarios zusammen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Szenario mit einer Maßnahme zu kombinieren. Unter einer Maßnahme wird ein gezielter Eingriff in die Entwicklung eines Szenarios, beispielsweise durch den Einsatz von Schneekanonen in Gebieten, in denen der Wintertourismus bedroht ist, verstanden. Damit können die von Stakeholdern vorgeschlagenen Handlungsoptionen unter Nutzung der gesamten Palette aller Kombinationen von Klimatrends und Klimavarianten auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Die verschiedenen Kombinationen ermöglichen die Simulation eines Ensembles an Szenarien, deren Ergebnisse zusammen einen plausiblen Erwartungstrichter aufspannen. Der Prognosezeitraum ist auf den Zeitraum von 2011 bis 2060 begrenzt, da danach der verwendete Klimagenerator wegen des verstärkten Klimawandels seine Gültigkeit verliert. *Abb. 5* gibt einen Überblick über die einzelnen Auswahlkategorien, aus denen sich ein GLOWA-Danube-Szenario zusammensetzt (GLOWA-Danube-Projekt 2009).

3.2 Ergebnisse der Simulation mit DANUBIA

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Simulation mit DANUBIA vorgestellt, die zu erwartende Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen vor allem im Alpenraum der Oberen Donau unter den gewählten Szenariobedingungen aufzeigen.

Die Jahresmitteltemperatur wird sich an der Oberen Donau je nach gewähltem Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts zwischen 3,3 °C und 5,2 °C erhöhen. Die Obergrenze des Temperaturintervalls steht dabei für die Fortschreibung des historisch gemessenen Temperaturanstieges von 1,6 °C seit 1960 in diesem Gebiet. Während bei der Niederschlagssumme im Sommer ein leichter Rückgang in der Vergangenheit verzeichnet wurde, kam es im Winter zu einer geringfügigen Erhöhung. Im Modellzeitraum setzt sich dieser Trend fort. So beträgt die Niederschlagserhöhung im Winter zwischen 8 und 47 Prozent, während im Sommer mit einer Abnahme von 14 bis 69 Prozent zu rechnen ist. Für die mittlere Jahressumme bedeutet das eine Reduzierung von 3.5 bis 16.4 Prozent. Dabei spielt nicht nur die Niederschlagssumme, sondern auch die Niederschlagsart eine entscheidende Rolle. So ist bereits in der Vergangenheit eine deutliche Abnahme des Anteils an Schneeniederschlag am Jahresniederschlag zu erkennen, die sich in Zukunft weiter fortsetzen wird, wie in *Abb. 6* zu sehen ist. Zusammen mit dem Temperaturanstieg führt das zu einer Ver-

Klimawandel im Alpenraum – Ergebnisse von GLOWA-Danube

Auswahl 1: Klimatrend	Auswahl 2: Klimavariante	Auswahl 3: Gesellschafts- szenario	Auswahl 4: Maßnahme
1. Trend – IPCC regional: Temperaturanstieg: +3.3 Grad Niederschlagsänderung: +7% Winter, -14% Sommer	1. Variante – Baseline: mittlere Temperatur aus 5000 Realisierungen 2011 - 2035	1. Szenario – Baseline: Ein business as usual-Szenario, das den Status Quo weiterführt	Auswahl aus allen Modell- parametern innerhalb der Teil- modelle, um einzelne vorhande- nene Variablen gezielt auf ihre Auswirkungen zu untersuchen. Diese Auswahlmöglichkeit ist optional.
2. Trend – REMO regional: Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: -4.9% Winter, -31.4% Sommer	2. Variante – 5 warme Winter: die 5 wärmsten aufeinander folgenden Winter 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen	2. Szenario – Performance: Szenario mit freiem Wettbewerb	
3. Trend – MM5 regional: Temperaturanstieg: +4.7 Grad Niederschlagsänderung: +7.7% Winter, -28.7% Sommer	3. Variante – 5 heiße Sommer: die 5 heißesten aufeinander folgenden Jahre 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen	3. Szenario – Allgemeinwohl: Szenario mit Rückbesinnung auf gesamtgesellschaftliche Verantwortung	
4. Trend – Fortschreibung: Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: +47% Winter, -69% Sommer aus Korrelation Niederschlag - Temperatur (1960-2006)	4. Variante – 5 trockene Jahre: die 5 trockensten aufeinander folgenden Jahre 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen		
	5. Variante – REMO skaliert & blaskorrigiert: Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: -1.4% Winter, -32.6% Sommer		
	6. Variante – MM5 skaliert & blaskorrigiert: Temperaturanstieg: +4.7 Grad Niederschlagsänderung: +8.4% Winter, -29.4% Sommer		

Abb. 5: Szenariomatrix der GLOWA-Danube Szenarien auf der Basis des IPCC-SRES-A1B Emissionsszenarios, deren Zusammenstellung aus der Kombination der Auswahl 1 bis 3 und optional der Auswahl 4 bestehen (GLOWA-Danube Projekt 2009, S1).

kürzung der mittleren Schneedeckendauer um 30 bis 60 Tage in allen Höhenlagen, so dass die Schneeverhältnisse, die heute in einer Höhe von ungefähr 1000m NN zu finden sind, zukünftig erst in etwa 2000m NN zu finden sein werden.

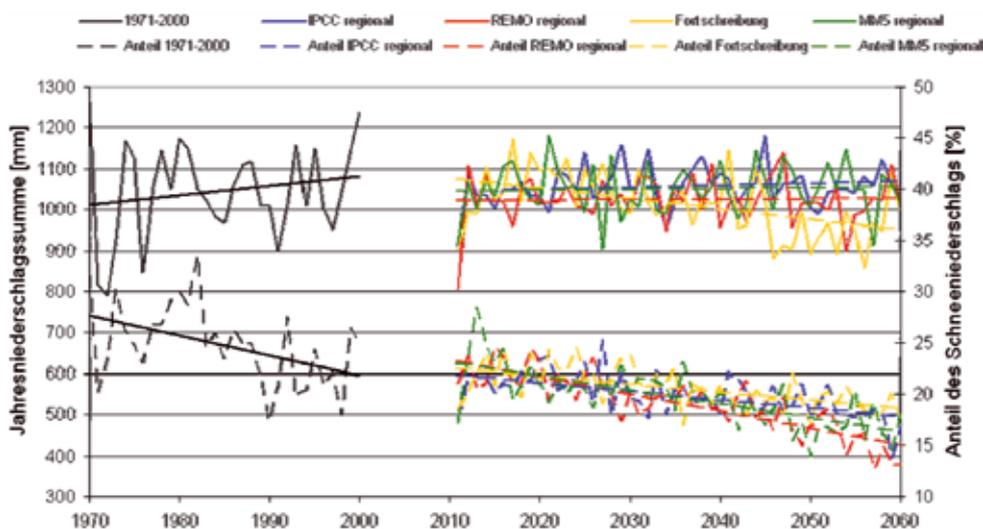


Abb. 6: Die Entwicklung des Jahres- und Schneeniederschlags im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Der zu erwartende Temperaturanstieg hat außerdem einen Anstieg der Verdunstungssumme von 10 bis 25 Prozent zur Folge, so dass zusammen mit der beschriebenen Niederschlagsentwicklung das Wasser an der Oberen Donau knapper werden wird. Am Pegel in Achleiten am Ausgang der Oberen Donau ist je nach betrachtetem GLOWA-Danube-Szenario mit einer Abnahme von 5 bis 35 Prozent des Abflusses bis zum Jahr 2060 zu rechnen.

Regional betrachtet fällt dieser Rückgang besonders am Alpennordrand deutlich aus, wie die Differenz von Niederschlag, Evapotranspiration und Abfluss für den Simulationszeitraum von 2036 bis 2060 zur Vergangenheit von 1971 bis 2000 nach dem mittleren Szenario *REMO regional – Baseline* in *Abb. 7* zeigt. So verringert sich hier einerseits der Niederschlag am stärksten, andererseits steigt die Verdunstung aufgrund einer längeren Vegetationsdauer deutlich an. In den nördlichen Regionen des Einzugsgebietes dagegen kommt es regional auch zu einer leichten Erhöhung der Wasserverfügbarkeit. Während hier die Änderungen der allerdings verhältnismäßig geringen Niederschlagssumme klein sind, kommt es aufgrund von Wasserstress zu einer Reduktion der Verdunstungssumme.

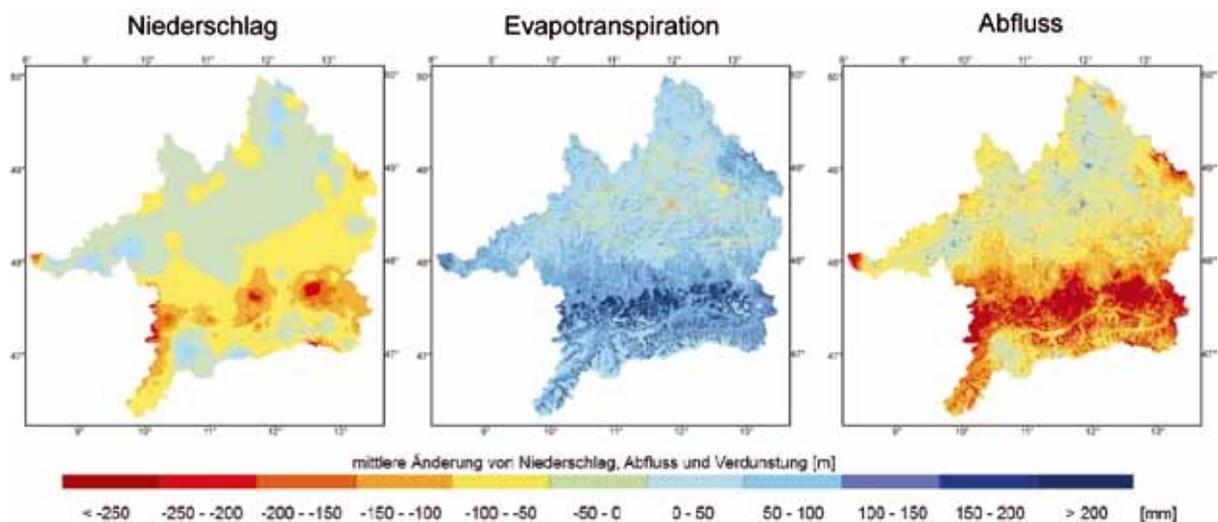


Abb. 7: Änderung des Wasserhaushaltes nach dem Szenario REMO regional – Baseline von 2036–2060 zu 1971–2000 im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Betrachtet man den jahreszeitlichen Verlauf des Abflusses am Gebietsauslass der Oberen Donau in Achleiten über die Dekaden von 1961 bis 2060 für das Szenario *REMO regional – Baseline*, so ist eine deutliche Verschiebung des Abflussmaximums vom Sommer in den Frühling zu sehen (*Abb. 8, links*). Da der Niederschlagsverlauf mit dem Sommermaximum gleich bleibt (*Abb. 8, rechts*), ist diese Verschiebung auf die Veränderungen des Schneespeichers sowie die erhöhte sommerliche Verdunstung zurückzuführen.

Die Auswirkungen auf Extremereignisse wie Niedrig- und Hochwasser wurden ebenfalls detailliert untersucht. So ist am Pegel in Achleiten mit einer Verringerung des Niedrigwasserabflusses um 25 bis 52 Prozent zu rechnen, während dieser starken Erniedrigung an der Donau eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse in den Alpentälern gegenüber steht. Gründe dafür sind mehr Regenniederschlag sowie das Abschmelzen der Gletscher. *Abb. 9* verdeutlicht die Veränderungen des Niedrigwasserabflusses in den Gewässern im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Dargestellt ist der

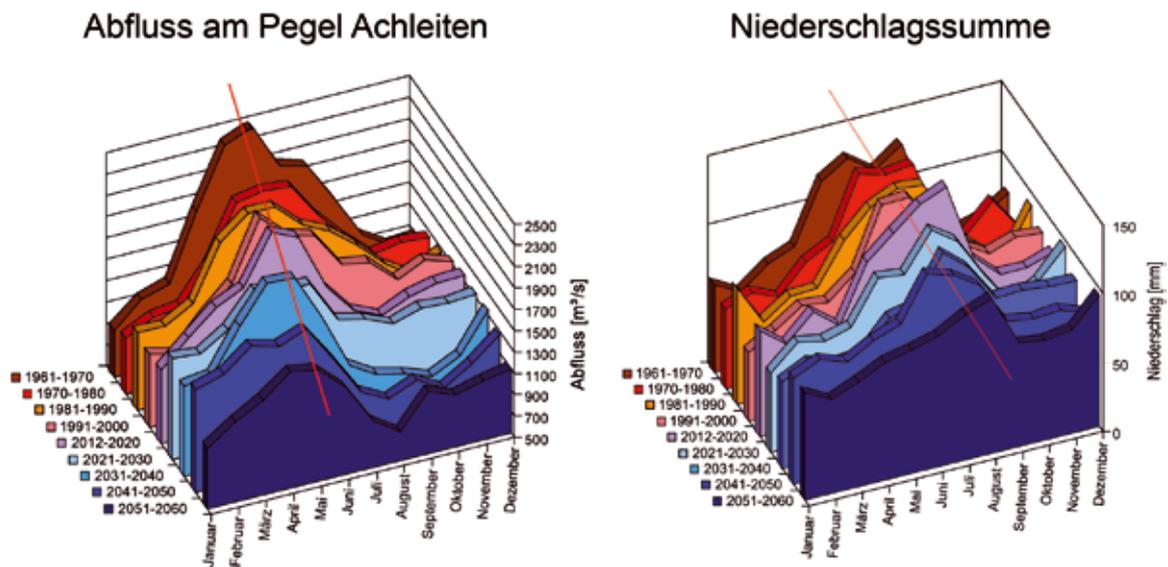


Abb. 8: Verlauf des monatlichen Abflusses (links) am Gebietsauslass in Achleiten sowie der Niederschlagssumme (rechts) des Einzugsgebietes der Oberen Donau nach dem Szenario REMO regional – Baseline von für die Dekaden von 1961 bis zum Jahr 2060.

Quotient des $NM7Q_{50}$ der zukünftigen Zeiträume von 2011–2035 und 2036–2060 nach dem Szenario *REMO regional – Baseline* zur Vergangenheit von 1971–2000 für Gerinne, für die bei der Berechnung des $NM7Q_{50}$ ein Bestimmtheitsmaß von über 0.8 berechnet wurde. Gelb- bis Rotöne bedeuten eine Reduzierung des Niedrigwasserabflusses, während Grün- und Blautöne eine Zunahme des Niedrigwasserabflusses darstellen.

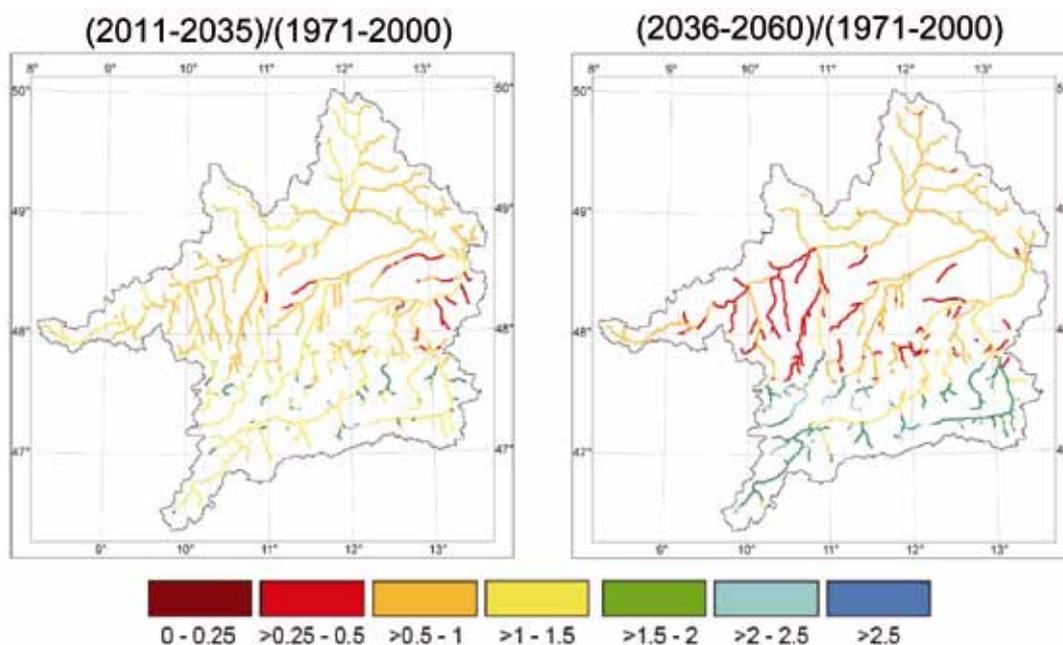


Abb. 9: Quotient aus $NM7Q_{50}$ für die zukünftigen Zeiträume von 2011–2035 und 2036–2060 und die Vergangenheit von 1971–2000 nach dem Szenario REMO regional – Baseline im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Analog zur Analyse des 50-jährlichen Niedrigwasserabflusses wurde das 100-jährliche Hochwasser HQ_{100} untersucht. *Abb. 10* zeigt die Quotienten aus den zukünftigen und vergangenen HQ_{100} für den Mittelwert über alle 16 statistischen Klimavarianten für die Gerinne mit einem Bestimmtheitsmaß von über 0.8. Die Ergebnisse weisen auf eine z. T. beträchtliche Zunahme der Hochwasserspitzen in den Alpentälern und Kopfeinzugsgebieten hin (Grün-, Gelb- und Rottöne), während es im restlichen Einzugsgebiet kaum zu Änderungen kommt (Blautöne). Eine der Ursachen ist wiederum in der Veränderung der Niederschlagsart zu sehen, durch die in den Alpen weniger Wasser in Form von Schnee gespeichert werden wird und Regenniederschläge auf Schnee gehäuft auftreten.

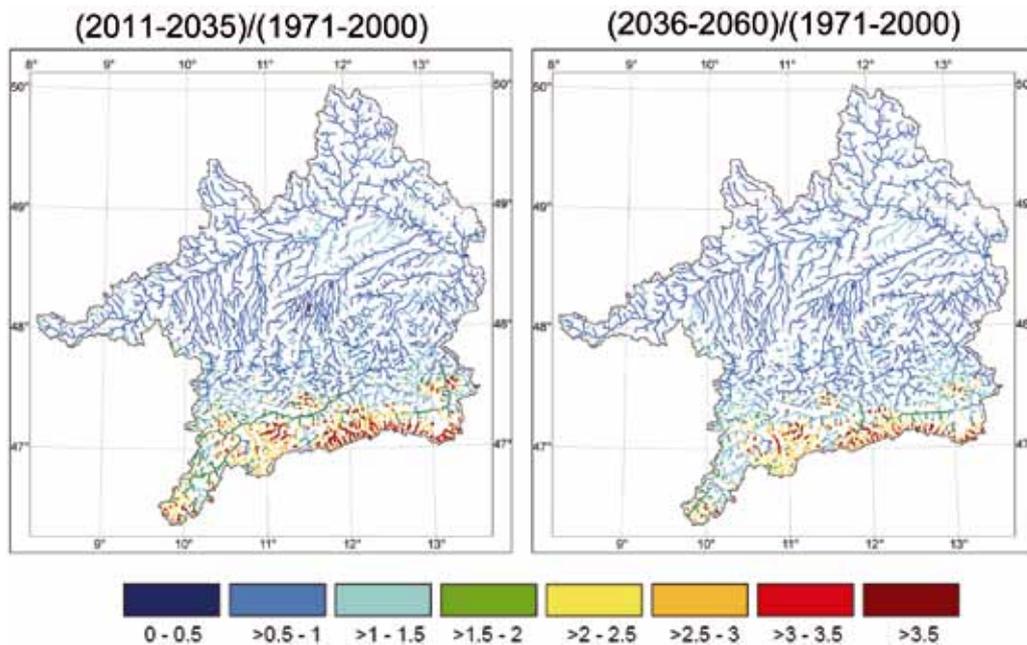


Abb. 10: Quotient aus HQ_{100} für die zukünftigen Zeiträume von 2011–2035 und 2036–2060 und die Vergangenheit von 1971–2000 nach dem Mittelwert über alle 16 statistischen Klimavarianten im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Eine detaillierte Analyse der Entwicklung der Abflussdynamik aufgrund der angenommenen Klimaveränderungen zeigt *Abb. 11*. Hier ist auf der Grundlage des Klimavariante *Baseline* des Klimatrends *REMO regional* (*Abb. 5*) die dekadische Entwicklung der mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Innsbruck und der Anteil des Gletscherabflusses am Gesamtabfluss dargestellt. *Abb. 11* zeigt zum einen deutlich die Vorverlagerung der Abflussspitze vom Hochsommer in das Frühjahr. Zum anderen zeigt der Anteil des Gletscherabflusses am Abfluss am Pegel Innsbruck nach dem behandelten Szenario in der nächsten Dekade eine Zunahme. Sie ist auf die ansteigenden Temperaturen und die dadurch verursachte frühere Schneeschmelze, die wiederum eine Verlängerung der Exposition des Eises zur Folge hat, zurück zu führen. Erst danach reduziert sich der Anteil des Gletscherabflusses am Gesamtabfluss in Innsbruck, um dann zwischen 2040 und 2050 fast vollständig zu verschwinden.

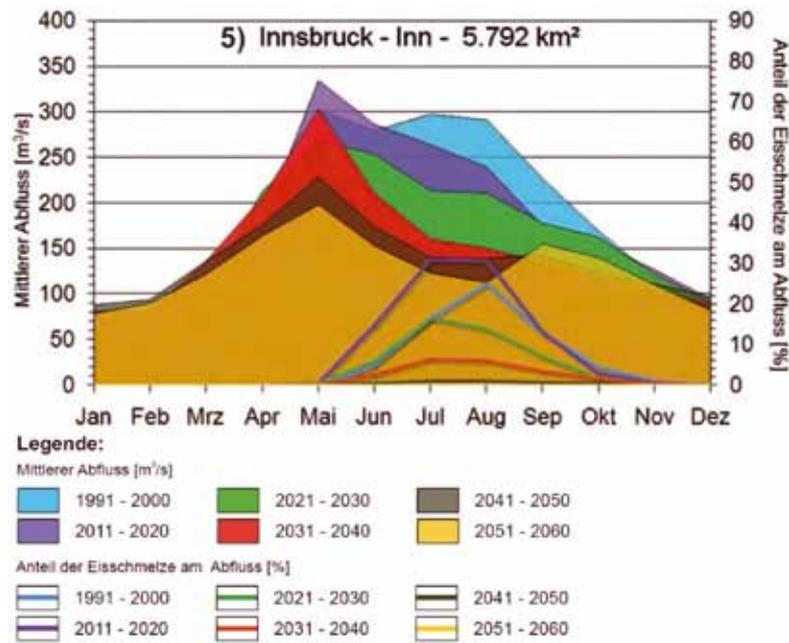


Abb. 11: Mittlerer Monatsabfluss und Anteil des Gletscherabflusses am Pegel Innsbruck für den Zeitraum von 1991 bis 2060 auf der Grundlage des GLOWA-Danube-Szenarios REMO-regional/Baseline.

3.3 Folgen des Globalen Wandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Die nach den gewählten Szenarien zu erwartenden Änderungen der Wasserressourcen an der Oberen Donau führen zu einer Verringerung des verfügbaren Wasserdargebotes, so dass das Wasser künftig knapper, jedoch nicht knapp werden wird. Neben zahlreichen weiteren Folgen wird es zu einer Reduzierung der Wasserkraftproduktion der vorhandenen Wasserkraftanlagen kommen. Für den derzeitigen Hauptträger der erneuerbaren Energie im Einzugsgebiet ist mit einem Rückgang zwischen 8 und 16 Prozent der Leistung zu rechnen. Des Weiteren reduziert sich aufgrund der verschärften Niedrigwassersituation in Verbindung mit steigenden Wassertemperaturen das Angebot an Kühlwasser für die Wärmekraftwerke im Sommer. Zudem ist mit einer häufigeren Einschränkung der Schifffahrt in Niedrigwasserzeiten zu rechnen. Diese Folgen spielen nicht nur eine Rolle an der Oberen Donau, sondern sie werden sich auch auf die Unterliegerstaaten, die das Wasser des „Wasserschlosses“ der Oberen Donau intensiv nutzen, deutlich auswirken.

4 Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungs- und Entwicklungsprojektes GLOWA-Danube wurden die Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Oberen Donau detailliert analysiert. Dazu wurde mit DANUBIA ein Instrumentarium zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, in dem sowohl naturräumliche als auch sozioökonomische Modelle miteinander gekoppelt werden, und das somit eine integrative Betrachtung des Systems ermöglicht. Unter den gewählten Szenarien, die sich aus einer Kombination von Klima- sowie Gesellschaftsszenarien zusammensetzen, kommt es zu einer Verringerung des Wasserdargebotes an der Oberen Donau um 5 bis 35 Prozent, je nach gewähltem Szenario. Gründe dafür sind neben der leichten Verringerung der Niederschlagssumme die deutliche Abnahme des Schneeniederschlags sowie die starke

Erhöhung der Verdunstung aufgrund der steigenden Temperaturen. Durch die Veränderung des Schneespeichers kommt es zu einer Verlagerung der sommerlichen Abflussspitzen vom Sommer in den Frühling, so dass eine Veränderung des Abflussregimes in Achleiten simuliert wurde. Für die künftige Entwicklung der Extremereignisse ist unter den gewählten Szenarien mit einer Verringerung der Niedrigwasserabflüsse im Einzugsgebiet zu rechnen, mit Ausnahme des Alpenraums, in dem eine Erhöhung zu erwarten ist. Für die künftige Hochwassersituation ergeben sich im Alpenraum z. T. starke Verschärfungen, im Alpenvorland sind weitgehend geringe Veränderungen zu erwarten.

Neben zahlreichen weiteren Folgen kommt es zur teilweise beachtlichen Reduzierung der Wasserkraftproduktion sowie zu Einschränkungen der Schifffahrt. Die Veränderungen sind aufgrund der verringerten Wasserabgabe besonders auch für die Unterliegerstaaten der Oberen Donau von Bedeutung.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die vorgestellten regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels unter der Annahme der gewählten Szenariobedingungen simuliert wurden und in diesem Sinne keine Prognose darstellen.

Danksagung

Allen Projektpartnern wird für die Zusammenarbeit sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Freistaat Bayern und der Ludwig-Maximilians-Universität München für die Förderung im Rahmen des GLOWA-Verbundes herzlich gedankt. Außerdem gilt dem Deutschen Wetterdienst (DWD), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) ein Dank für die Bereitstellung von Daten.

Literatur

- Barth, M., Hennicker, R., Kraus, A., Ludwig, M. (2004): DANUBIA: An Integrative Simulation System for Global Change Research in the Upper Danube Basin. *Cybnetics and Systems* 35(7-8), 639-666.
- GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.)(2009): *Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau*. München.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge
- Mauser, W., Bach, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology* 376, 362-377
- Mauser, W., Ludwig, R., 2002. GLOWA-DANUBE – a research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle. In: Beniston, M. (Ed.), *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management, Advances in Global Change Research*, vol. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, 171–188.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 227, 33-51

Anschrift der AutorInnen:

Prof. Dr. Wolfram Mauser
Dipl.-Geogr. Monika Prasch

Ludwig-Maximilians-Universität München
Department für Geographie
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung
Luisenstraße 37, 80333 München (D)
E-Mail: w.mauser@iggf.geo.uni-muenchen.de

Beobachtete Veränderungen in der Wasserbilanz Österreichs

Josef Fürst, Harald Kling, Hans Peter Nachtnebel und Thomas Hörhan

Anmerkung: Der vorliegende Beitrag ist ein gegenüber (Fürst et al., 2008) geringfügig angepasster Auszug aus dem ausführlichen Bericht (Fürst et al., 2007).

1 Einleitung und Zielsetzung

In der Diskussion um die hydrologischen Folgen des globalen Klimawandels standen Veränderungen in den Extremwerten, insbesondere Größe und Häufigkeit von Hochwässern, aber auch Trockenperioden bisher im Vordergrund (Kundzewicz et al., 2004; Nobilis & Lorenz, 1997; Svensson et al., 2004). Hydrologisch und wasserwirtschaftlich von Interesse ist aber auch, ob und wie sich die Komponenten der Wasserbilanz – Niederschlag, Verdunstung, Abflusshöhe und Vorratsänderung – verändert haben. Erkenntnisse über langfristige Veränderungen der Jahresniederschläge und deren saisonale Verteilung stellen eine wesentliche Grundlage für wasserwirtschaftliche Maßnahmen dar. Dabei ist sowohl die zeitliche Veränderung als auch das räumliche Muster zu beachten (Birsan et al., 2005; Dore, 2005; Xu et al., 2003). Eine jahreszeitlich und geografisch differenzierte Analyse und Darstellung der Trends verbessert die Grundlagen für wasserwirtschaftliche Kompensationsmaßnahmen.

Ziel der Untersuchung war es, für das gesamte Bundesgebiet in hoher räumlicher Auflösung konsistente, aufeinander abgestimmte Darstellungen der Trends in den Wasserbilanzgrößen zu erstellen. Die flächenhaften Aussagen wurden durch Simulationen mit einem Wasserbilanzmodell erzielt, das anhand von Monatsdaten der Niederschläge und des Abflusses an den Messstellen des Hydrografischen Dienstes (HD) kalibriert wurde. Die wichtigsten Ergebnisse wurden auch im Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ) (BMLFUW, 2007) veröffentlicht.

2 Datengrundlage

Als Datengrundlage wurden folgende Informationen herangezogen:

- Beobachtete monatliche Niederschläge und Monatsmittel des Abflusses an den Messstellen (i. A. ab 1951). Insgesamt wurden vom HD Abfluss-Zeitreihen von 132 Stationen und Niederschlags-Zeitreihen von 641 Stationen zur Verfügung gestellt. Die Zeitreihen liegen durchwegs lückenlos von 1951–2000 vor. Die Abflussdaten beziehen sich teilweise durchaus auch auf Pegel, die durch Zu- und Ableitungen oder Speicher deutlich beeinflusst sind.
- Berechnete Monatsniederschläge aus dem Skoda/Lorenz Modell (Skoda & Lorenz, 2003) ab 1951.
- Daten aus dem HAÖ (Messnetzkarten, Höhenmodell, Einzugsgebietsgliederung, Karten der mittleren Wasserbilanzgrößen 1961–1990).
- Monatsmittel der Lufttemperatur ab 1951 an repräsentativen Messstellen.

3 Methodik

Geeignete Methoden zur Trendanalyse der Zeitreihen der Monatsmittel berücksichtigen, dass die Reihen der Monatswerte eine deutliche Autokorrelation und Saisonalität aufweisen und nicht normal verteilt sind. Aus diesen Gründen scheidet die klassische lineare Trendanalyse aus. Als parameterfreies Verfahren, das monotone Trends ohne Annahme normal verteilter Daten erkennen kann, eignet sich der Mann-Kendall Trend Test (Helsel & Hirsch, 1992). Um auch die Saisonalität der Daten zu berücksichtigen, wird der saisonale Mann-Kendall-Trend-Test eingesetzt. Diese Vorgangsweise wurde für jüngere Untersuchungen des Trendverhaltens hydrologischer Größen u. a. in der Schweiz (Birsan *et al.*, 2005) und in Kanada (Burn & Hag Elnur, 2002) angewendet.

Der Mann-Kendall-Trend-Test (MK-Test) verwendet eine rangbasierte Prozedur, die sich speziell für nicht-normal verteilte Daten mit Ausreißern und nicht-linearem Trendverhalten eignet (Helsel & Hirsch, 1992). Die Nullhypothese für den MK-Test auf Trend in der Zufallsvariablen x lautet, dass die Wahrscheinlichkeit $Pr(x_j > x_i) = 0.5$, für $j > i$. Die MK-Statistik S ist die Anzahl der positiven Vorzeichen aller Differenzen $(x_j - x_i)$, worin x_j und x_i die Datenwerte zu den Zeitpunkten j und i darstellen, mit $j > i$.

Der saisonale Mann-Kendall-Trend-Test (SMK) berücksichtigt die Saisonalität, indem der MK-Test zunächst für jede der m Saisonen separat berechnet und das Ergebnis dann addiert wird. Bei Monatsdaten ($m = 12$) werden also die Jännerdaten nur mit Jännerdaten verglichen, Februar nur mit Februar usw. Kendall's S-Statistik S_k für die gesamte Reihe ergibt sich durch Aufsummieren der Statistiken S_i der einzelnen Monate.

Der MK Test dient dazu, die Signifikanz eines monotonen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen zu testen. Eine robuste Schätzung der Steigung für eine parameterfrei (verteilungsunabhängig) angepasste Trendgerade ermöglicht die Methode nach Kendall-Theil (Helsel & Hirsch, 1992). Die Steigung β nach Kendall-Theil ist der Median der Steigungen zwischen jeweils 2 Datenpunkten.

Das räumlich verteilte, konzeptionelle Wasserbilanzmodell COSERO (Eder *et al.*, 2005; Kling *et al.*, 2006) wird für das gesamte österreichische Staatsgebiet für den Zeitraum 1951–2000 in Monatsschritten angewendet und liefert als Ergebnis Zeitreihen der räumlich verteilten Wasserbilanzkomponenten. Das Wasserbilanzmodell wurde im Rahmen eines Projektes im Programm „Hydrologie Österreich“ der ÖAW entwickelt (HÖ 27/2003, (Kling, 2006)). Mit einer leicht modifizierten Modellversion wurde die saisonale Wasserbilanz der Periode 1961–1990 erstellt. Diese Version wurde nun auch verwendet, um die Wasserbilanz für die Periode 1951–2000 zu rechnen. Dieses Modell unterteilt Österreich in 16 interne Berechnungsgebiete, die wiederum in Teilgebiete unterteilt sind, die in der Regel Teil- und Zwischeneinzugsgebieten entsprechen (insgesamt 188 Teilgebiete). Die Modellzonen der Teilgebiete basieren auf einem 1 x 1 km Raster. Ergebnis des Wasserbilanzmodells sind Zeitreihen der Wasserbilanzkomponenten in Monatsschritten von 1951–2000 für jede Modellzone. Diese hoch auflösenden Daten wurden für die weitere Darstellung und Analyse zunächst für Einzugsgebiete aggregiert, und zwar entsprechend den Einzugsgebietsgrenzen in den Wasserbilanzkarten des HAÖ. Auf die so erzeugten Ganglinien für 1044 Einzugsgebiete wurde die Trendanalyse, wie oben beschrieben, angewandt. Die berechneten Parameter wurden im GIS jeweils einem Einzugsgebiet zugeordnet und flächenhaft dargestellt.

4 Ergebnisse

Die Trendanalysen wurden sowohl auf die an den Messstellen beobachteten Zeitreihen von Niederschlag und Abfluss angewandt, als auch auf die mit dem Modell berechneten Wasserbilanzgrößen. Eine ausführliche Dokumentation findet sich im HAÖ (BMLFUW, 2007) und in Fürst et al. (2007). Die Modellergebnisse wurden für die Trendanalyse zunächst für 1044 Einzugsgebiete (mittlere Größe von ca. 86 km²) aggregiert, sodass für jedes dieser Einzugsgebiete und jede der Bilanzgrößen eine Zeitreihe in Monatsschritten entstand. Auf diese Zeitreihen wurden die beschriebenen Verfahren zur Trendanalyse angewandt. Für die Ermittlung der Steigung der Kendall-Theil-Trendgeraden erfolgte eine Umskalierung der Zeitreihen in Prozent des mittleren Jahresniederschlages im jeweiligen Gebiet.

4.1 Trendanalyse der beobachteten Stationszeitreihen

Trends im Niederschlag und in den Abflüssen

Die stationsbezogenen Trendanalysen wurden jahresweise und für Sommer- und Winterhalbjahr ausgewertet. Die Kartendarstellungen stellen saisonale Trends in den angegebenen Wasserbilanzgrößen dar. Die ausgewiesenen Trendkoeffizienten geben bei allen Karten die jährliche Änderung der Monatswerte in Prozent des mittleren Jahresniederschlages an. Durch den Farbton wird die Größe des Trendkoeffizienten ausgedrückt. Die Klassifikation beschränkt sich auf fünf Klassen, eine neutrale Klasse, sowie je zwei Klassen für positive bzw. negative Trends.

Ein in der Karte ausgewiesener Wert von 0.025 %/Jahr bedeutet, dass die Monatswerte des dargestellten Zeitraumes in 50 Jahren um $50 \times 0.025 = 1.25$ % der Jahresniederschlagshöhe zugenommen haben. Würden die Zeitreihen für alle Monate den gleichen Trend aufweisen, entspräche das seit 1951 einer Zunahme dieser Bilanzgröße um etwa 15 % der Jahresniederschlagshöhe!

Sommer- und Winterhalbjahr

In *Abb. 1* werden die Trendkoeffizienten für Niederschlag und Abflüsse während des Sommerhalbjahres dargestellt. Bei Betrachtung der Sommermonate wird deutlich, dass ein negativer Trend in weiten Teilen Ober- und Niederösterreichs, dem Burgenland und im Klagenfurter Becken vorliegt, sowohl in den Niederschlägen, als auch im Abfluss. Im Gebiet des Alpenhauptkammes hingegen sind die Trendanteile vorwiegend positiv, vereinzelte Messstellen weisen jedoch auch hier einen negativen Trend auf. An den Flüssen Gail und Salzach liegt ein negativer Trend in den Abflüssen vor, obwohl der Trend in den Niederschlägen positiv ist.

Die Trends für die Wintermonate sind in *Abb. 2* dargestellt. Hier ist eine wesentlich deutlichere räumliche Gliederung in Gebiete mit positiven und negativen Trends erkennbar. Während positive Trends vor allem in den Alpen und nördlich des Alpenhauptkammes zu verzeichnen sind, ist das Gebiet südlich und östlich der Alpen von negativen Trends geprägt. Auch hier sind die beiden Pegel Wald i. Pzg. (203026) und Mittersill (203075) im oberen Salzachgebiet von negativen Trends in den Abflüssen gekennzeichnet, während jedoch positive Trends in den Niederschlägen vorliegen. Der negative Trend der Abflüsse im Gailtal in den Sommermonaten lässt sich jedoch durch die fehlenden Winterniederschläge erklären, die erst ab dem Frühjahr zum Abfluss gelangen.

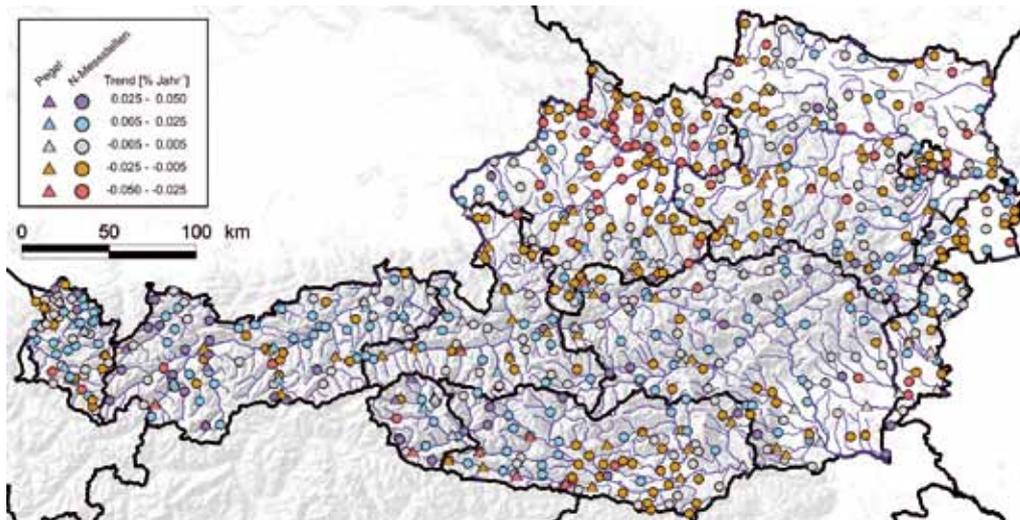


Abb. 1: Trends an den Niederschlags- und Abflussmessstellen für das Sommerhalbjahr.

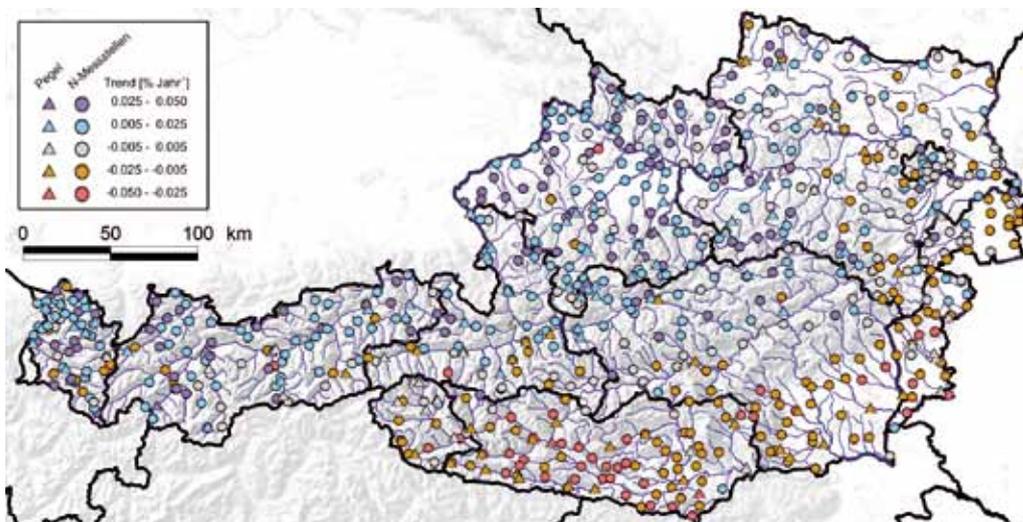


Abb. 2: Trends an den Niederschlags- und Abflussmessstellen für das Winterhalbjahr.

Beeinflussung der Abflüsse durch Speicher, Zu- und Ableitungen

Während Trends im Niederschlag nicht unmittelbar in einen Zusammenhang mit lokalen wasserwirtschaftlichen und anderen anthropogenen Beeinflussungen zu setzen sind, können Trends in den Abflüssen sowohl Folge von Trends in den Niederschlägen als auch von wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Maßnahmen im Einzugsgebiet sein. Von besonderer Bedeutung sind hier Zu- und Ableitungen sowie Speicher.

Zur Beurteilung des Einflusses von Zu- und Ableitungen und Speichern auf Trend und Varianz der Abflüsse sind die während des Auswertungszeitraumes errichteten Zu- und Ableitungen und Speicher zu betrachten. Bei den vor dem Auswertungszeitraum errichteten Anlagen wurde angenommen, dass die Betriebsweise zeitlich unverändert blieb. Die Informationen darüber wurden dem Hydrographischen Jahrbuch 2002 entnommen.

Die Beurteilung der Beeinflussung an den ausgewählten Pegel erfolgte anhand der zu- bzw. abgeleiteten Fläche im Verhältnis zur Einzugsgebietsfläche des jeweiligen Pegels. Es ist deutlich die intensive Nutzung durch Wasserkraftwerke in Westösterreich erkennbar. Beispielsweise ergibt sich beim Pegel Vandans/III (VIW) (200055) ein Wert von 106 % ausgeleiteter Einzugsgebietsfläche. Dies lässt sich durch die Einleitungen aus dem Rosanna- und Trisannagebiet erklären, welche das Wasserdargebot am Pegel Vandans erhöhen. Beim flussabwärts gelegenen Pegel Gisingen/III (200147) mit einem Einzugsgebiet von 1281 km² ist diese Zuleitung nur noch mit einem Wert von 7,4 % der Einzugsgebietsfläche zu erkennen.

4.2 Flächenhafte Auswertung der Trends anhand der Ergebnisse des Wasserbilanzmodells

Jahresauswertung der Trends in den monatlichen Niederschlägen und Abflusshöhen

Im ersten Schritt wurde eine Jahresauswertung der Trends in Niederschlag und Abflusshöhe durchgeführt. Sie zeigt ein deutliches räumliches Muster mit abnehmenden Niederschlägen südlich des Alpenhauptkammes. Nördlich des Alpenhauptkammes sind sowohl Gebiete mit Zunahmen als auch Abnahmen ausgewiesen. Einschränkend ist allerdings festzustellen, dass die Trends nur in einem kleinen Teil der Gebiete statistisch signifikant sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 10 %). Die Trends in den Abflusshöhen zeigen ein ähnliches räumliches Muster, sind aber in einem größeren Gebiet (ca. 55 % der Staatsfläche) statistisch abgesichert.

Auswertung von Winter- und Sommerhalbjahr

Eine saisonale Trendanalyse wurde getrennt für die Monate des Winterhalbjahres (November bis April) und die Monate des Sommerhalbjahres (Mai bis Oktober) durchgeführt. Es wird ein jahreszeitlich und geografisch deutlich unterschiedliches Trendverhalten sichtbar, das in weiten Bereichen statistisch abgesichert ist. Sehr markant tritt in den Wintermonaten ein positiver Trend der Niederschläge nördlich des Alpenhauptkammes hervor, dem ein ebenso deutlicher negativer Trend im Süden gegenübersteht, insbesondere in einem großen Teil Kärntens. Dieses räumliche Muster tritt in abgeschwächter Form auch in den Abflusshöhen auf.

In den Sommermonaten ist die räumliche Trennung durch den Alpenhauptkamm weniger stark ausgeprägt. Die Niederschläge weisen vor allem im Norden (Alpenvorland, Mühlviertel) stark negative Trends auf, aber auch im Süden ist der Trend großteils negativ, wenn auch statistisch nicht signifikant. Auffällig ist eine ausgedehnte Zone positiver Niederschlagstrends, die sich vom Mürztal über das Wiener Becken und das nördliche Burgenland erstreckt. Das räumliche Muster der Niederschlagstrends tritt im Wesentlichen auch in den Abflusshöhen auf, mit den Schwerpunkten stark negativer Trends im oberösterreichischen Alpenvorland und in Südkärnten.

Auswertung von Jahreszeiten (Vierteljahren)

Die geografischen Unterschiede in den Trends verstärken sich noch, wenn die Auswertungen auf vier Jahreszeiten bezogen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit und Lesbarkeit sind die Kartendarstellungen im Anschluss an die Beschreibung zusammengefasst, so dass für jede Jahreszeit die Trends im Niederschlag und in den Abflusshöhen einander leicht gegenübergestellt werden können.

Saisonale Trends im Niederschlag

Die Trends im Niederschlag zeigen deutliche Unterschiede, sogar gegenläufige Trends, in den vier Jahreszeiten und eine ausgeprägte räumliche Trennung durch den Alpenhauptkamm.

Besonders prägnant ist das gegensätzliche Trendverhalten von Herbst- und Sommermonaten. In den Herbstmonaten ist das Gebiet nördlich der Alpen durch stark positive, statistisch signifikante Trends gekennzeichnet (*Abb. 4*). Auf etwa 32 % der Staatsfläche zeigen die Monatsniederschläge einen Trend von 0.025–0.05 Prozent des mittleren Jahresniederschlages. Innerhalb der letzten 50 Jahre erbringen hier die drei Herbstmonate eine Zunahme von 3.75–7.5 % des Jahresniederschlages, das sind bei einem mittleren Gebietsniederschlag von etwa 1200 mm zusätzliche Niederschlagshöhen von 45 bis 90 mm. Bemerkenswert ist, dass diese zusätzlichen Niederschläge nicht in den Herbstmonaten zu einem entsprechenden Trend in den Abflusshöhen führen (*Abb. 5*), sondern gespeichert werden. Südlich des Alpenhauptkammes zeigen die Herbstmonate keine oder nur geringe, in Kärnten, Osttirol und im südlichen Teil Tirols leicht negative Trends.

Die Winterniederschläge (*Abb. 6*) zeigen auf 58 % des Bundesgebietes einen leicht negativen, statistisch nicht signifikanten Trend. Der östliche Teil Kärntens bildet hingegen ein größeres Gebiet mit signifikanten negativen Trends. Keinen Trend bzw. leicht positiven Trend zeigen große Teile Oberösterreichs und das westliche Niederösterreich, sowie das Wiener Becken.

Während der Frühjahrsmonate ist kein ausgeprägtes räumliches Muster in den Trends erkennbar (*Abb. 8*). Insgesamt überwiegen leicht positive Trends. Das östliche Kärnten und die südliche Steiermark bilden einen Bereich mit teilweise deutlich negativem Trend. Teile des oberen Enns- und Murgebiets, bis hin zu Schwarza- und Leithagebiet weisen positive Trends auf, allerdings nur teilweise signifikant.

Die Karte der Trends in den Sommermonaten (*Abb. 10*) zeigt schließlich nördlich der Alpen ein zu den Herbsttrends gegenläufiges Bild. Ober- und Niederösterreich zeigen stark negative Trends, die zu einem großen Teil auch statistisch signifikant sind. Das Salzachgebiet weist hingegen nur einen schwach negativen Trend auf. Auffällig ist ferner ein Bereich leicht positiver Trends im westlichen Tirol bis etwa zur Ötztaler Ache.

Saisonale Trends im Abfluss

Die Karten für die Trends in den Abflusshöhen weisen durchwegs größere Flächenanteile mit statistisch signifikanten Trends aus als die Niederschläge, auch wenn die Größe des Trends geringer ist.

Die Abflusshöhen in den Herbstmonaten (*Abb. 5*) zeigen den geringsten Trend. Ein größeres zusammenhängendes Gebiet mit negativem Trend gibt es südlich des Alpenhauptkammes, beginnend im Ötztal bis in das südliche Burgenland. Die nördlichen Alpen sind durch neutrale bis schwach positive Trends gekennzeichnet, im oberen Ennsgebiet sind auch deutlich positive Trends festzustellen. Das Nördliche Alpenvorland und die Gebiete nördlich der Donau zeigen keine oder schwach negative Trends.

Vergleicht man die Karte mit den Trends in den Herbstniederschlägen (Abb. 4), so fällt auf, dass die deutlich positiven Trends der Niederschläge nicht zu entsprechenden Trends im Abfluss führen. Der zusätzliche Herbstniederschlag wird verstärkt im Boden- und Grundwasser gespeichert.

Die Karte der Trends des Abflusses in den Wintermonaten (Abb. 7) spiegelt weitgehend das räumliche Muster der Trends in den Niederschlagshöhen der Herbstmonate wider: Deutlich positive Trends treten nördlich des Alpenhauptkammes auf, während schwach negative Trends südlich davon zu beobachten sind.

Die Abflusstrends der Frühlingsmonate (Abb. 9) zeigen ein ähnliches räumliches Muster wie in den Herbstmonaten, allerdings sind die negativen Trends von Osttirol über Kärnten bis ins südliche Burgenland als auch die positiven Trends vom Ennsgebiet bis zum Wiener Becken stärker ausgeprägt. Ebenso fallen positive Trends im unteren Mühlviertel auf.

In den Sommermonaten (Abb. 11) weisen 80 % des Staatsgebietes einen negativen Trend auf, der nördlich des Alpenhauptkammes sehr gut mit den Trends im Niederschlag übereinstimmt, im Süden aber deutlich stärker als der Trend im Niederschlag ausgeprägt ist.

Die zeitliche Entwicklung der saisonalen Niederschläge ist gut in einer Darstellung der kumulierten Abweichung vom Mittelwert erkennbar. In Abb. 3 ist der Verlauf für je ein Gebiet nördlich (Rodl) und südlich der Alpen (Obere Gail) dargestellt.

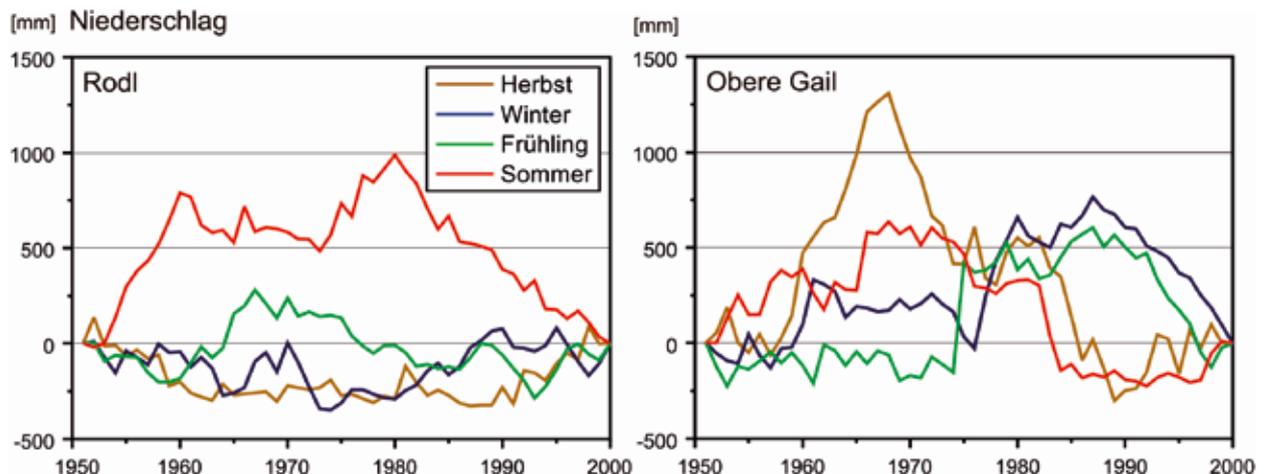


Abb. 3: Kumulierte Abweichung vom Mittelwert der Niederschläge in den Einzugsgebieten der Rodl (Oberes Mühlviertel) und der Oberen Gail (Kärnten) von 1951–2000.

Im Gebiet der Rodl ist ein weitgehend monotoner positiver Trend der Herbstniederschläge über den gesamten Zeitraum erkennbar. Die Sommerniederschläge sind dagegen durch einen deutlich negativen Trend gekennzeichnet. Im oberen Gailgebiet überwiegen die negativen Trends, wobei ein besonders deutlicher negativer Trend ab etwa 1975 im Winter und Frühling auffällt. Die Sommer- und Herbstniederschläge weisen dagegen den stärksten negativen Trend bereits in der Zeit bis 1980 auf.

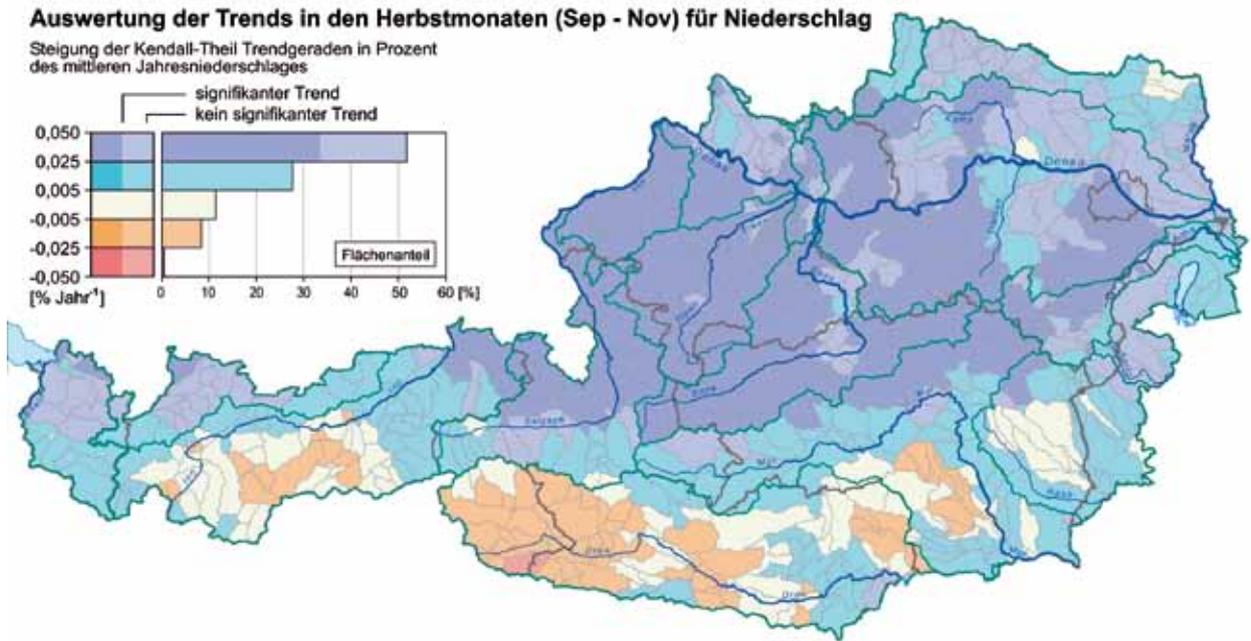


Abb. 4: Auswertung der Trends in den Herbstmonaten für Niederschlag.

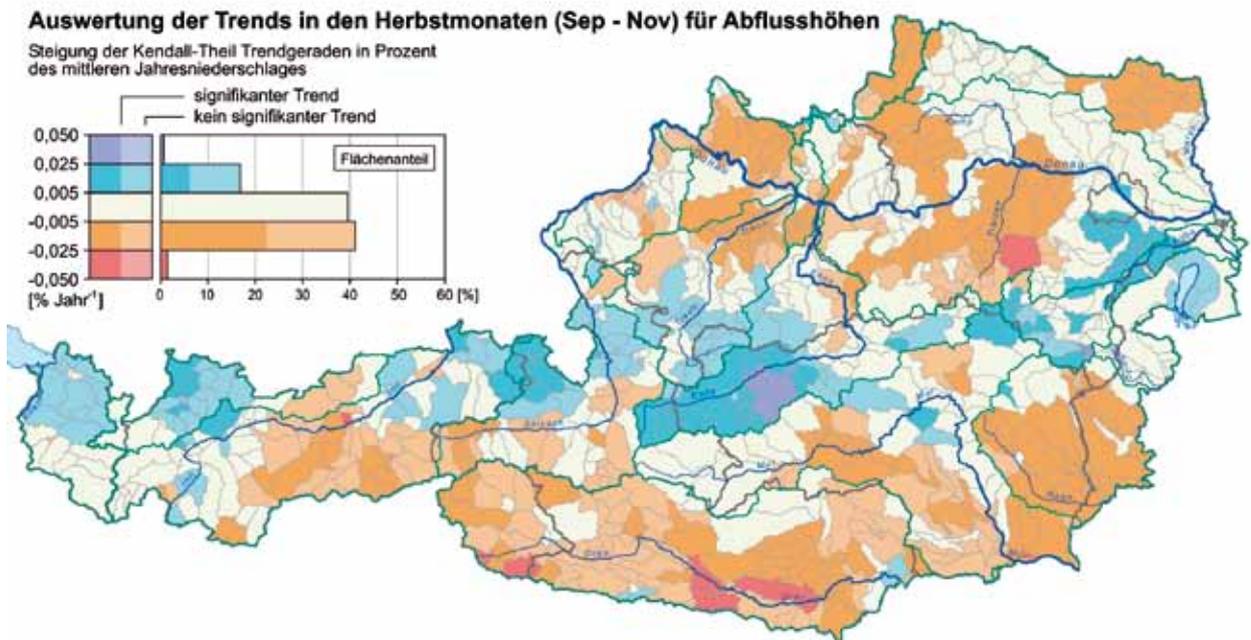


Abb. 5: Auswertung der Trends in den Herbstmonaten für Abflusshöhen.

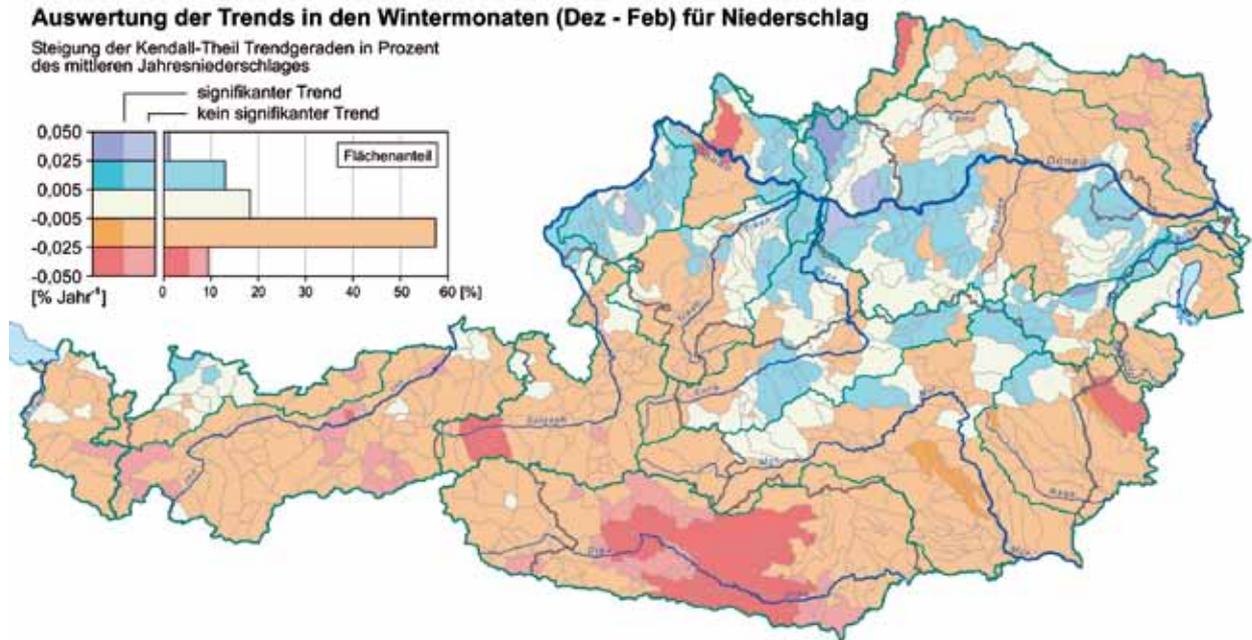


Abb. 6: Auswertung der Trends in den Wintermonaten für Niederschlag.

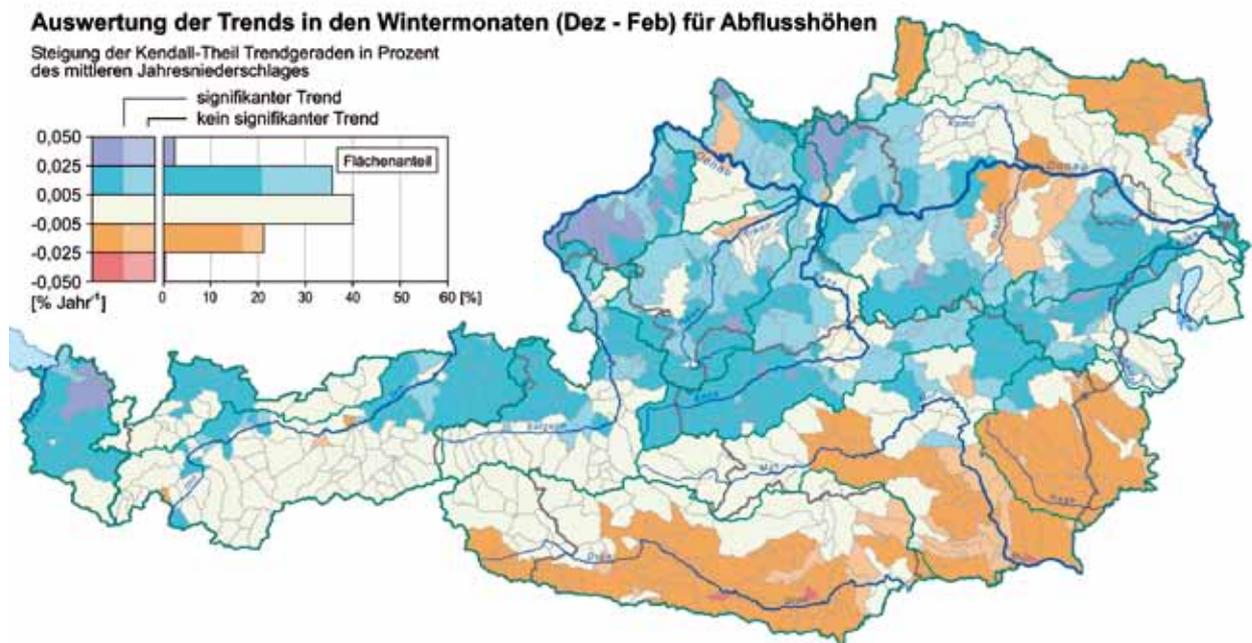


Abb. 7: Auswertung der Trends in den Wintermonaten für Abflusshöhen.

Beobachtete Veränderungen in der Wasserbilanz Österreichs

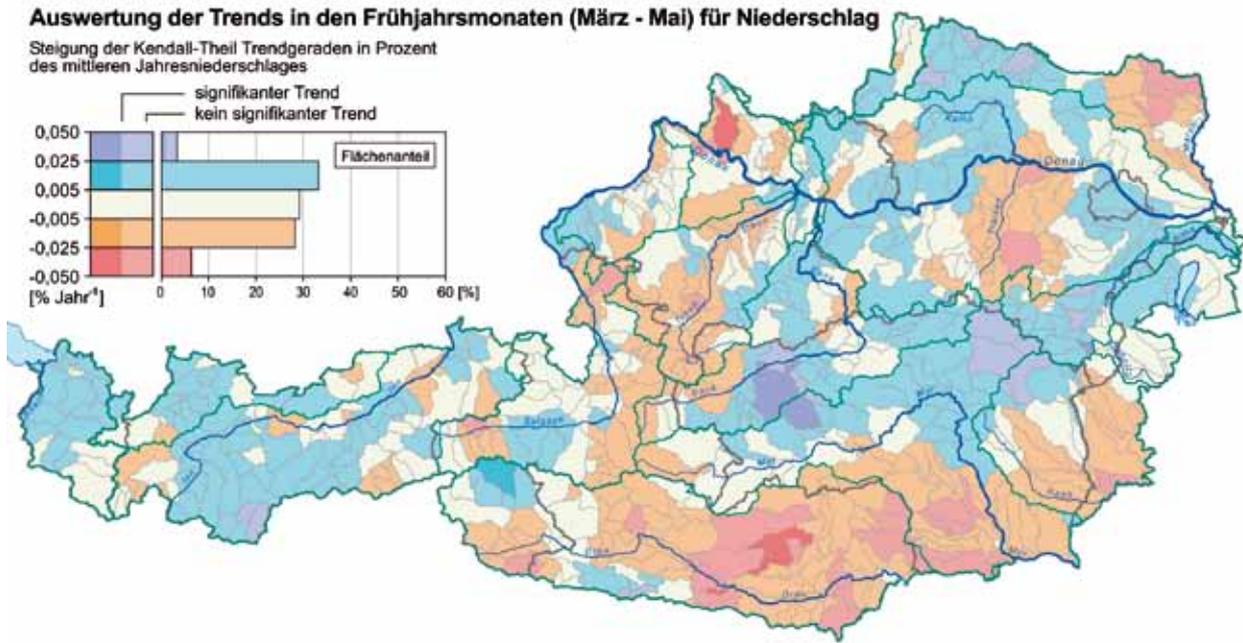


Abb. 8: Auswertung der Trends in den Frühjahrsmonaten für Niederschlag.

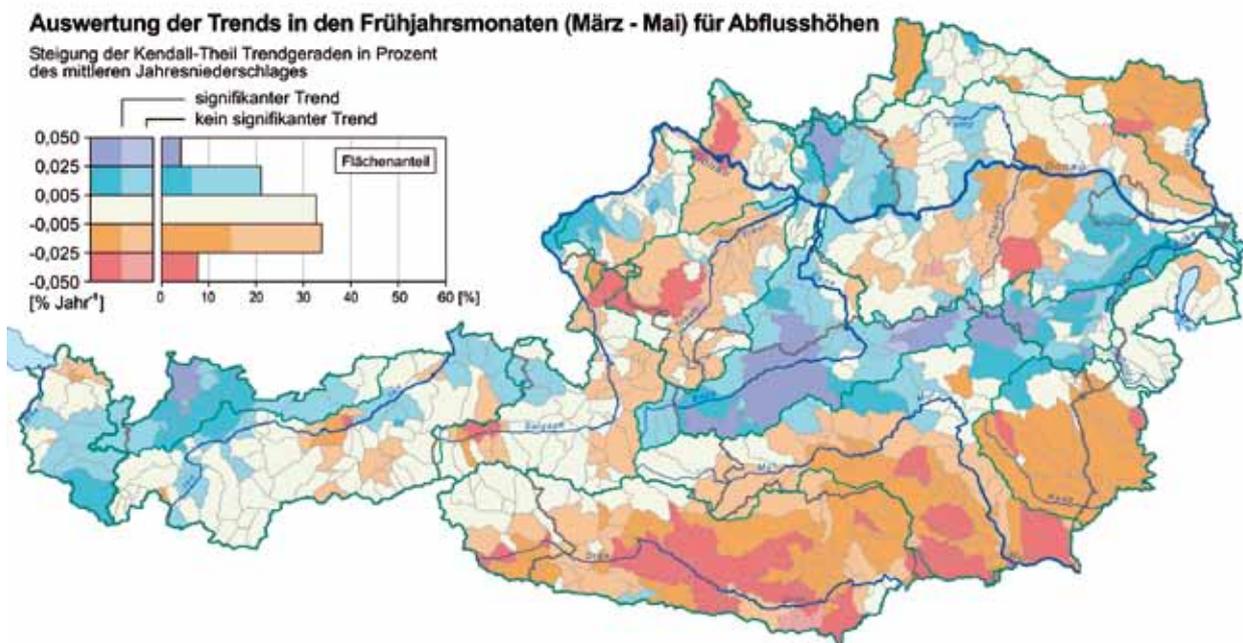


Abb. 9: Auswertung der Trends in den Frühjahrsmonaten für Abflusshöhen.

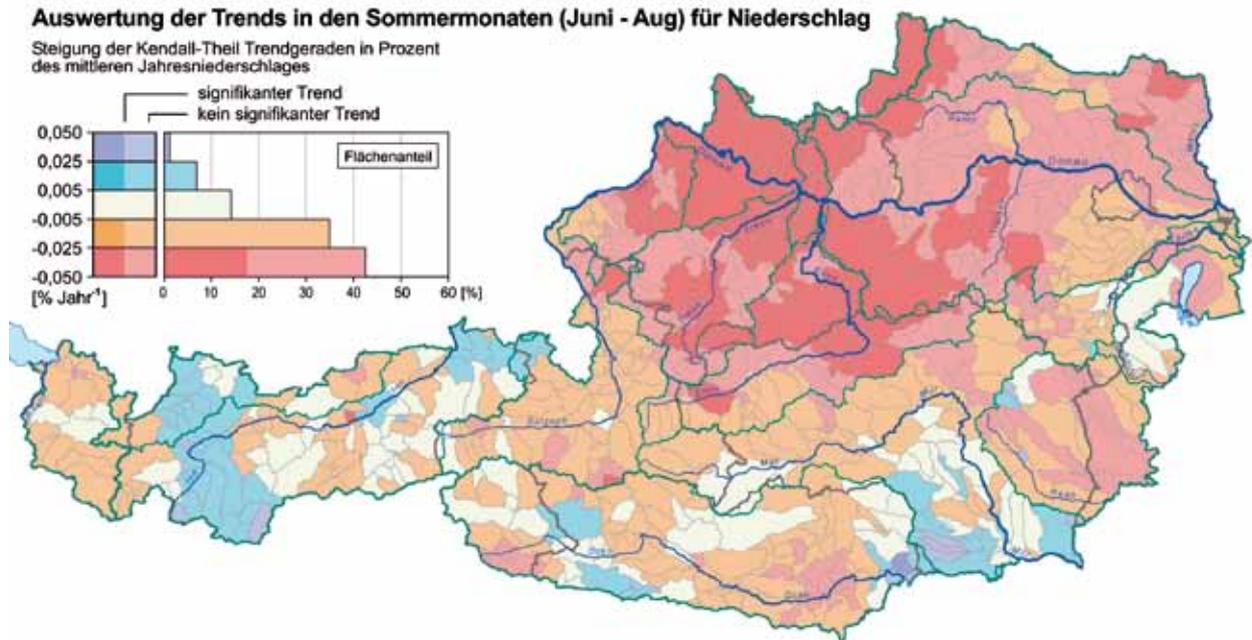


Abb. 10: Auswertung der Trends in den Sommermonaten für Niederschlag.

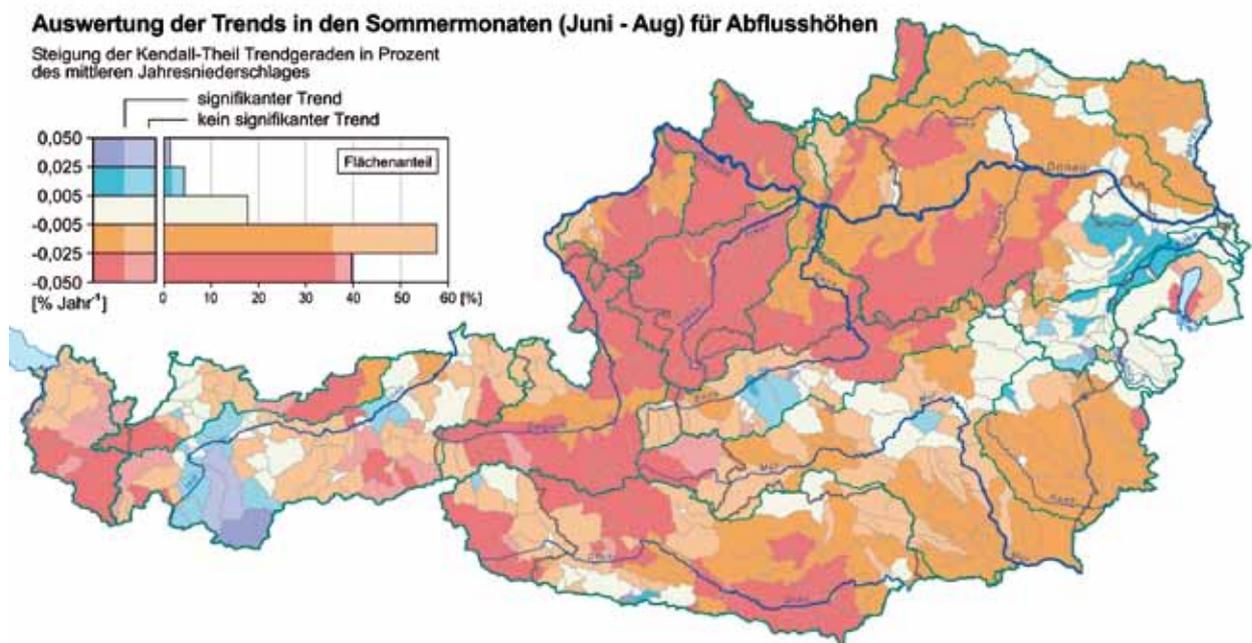


Abb. 11: Auswertung der Trends in den Sommermonaten für Abflusshöhen.

5 Zusammenfassung

Die Trendanalyse anhand der Ergebnisse des Wasserbilanzmodells zeigt eine gute Übereinstimmung mit der messstellenbezogenen Analyse. Der wesentliche inhaltliche Unterschied ist, dass die Abflusshöhen aus dem Wasserbilanzmodell einer von Zu- und Ableitungen und anderen wasserbaulichen Maßnahmen unbeeinflussten hydrologischen Situation entsprechen.

- In einer Ganzjahresbetrachtung sind Trends in Niederschlag und Abflusshöhen nur schwach und statistisch kaum signifikant ausgeprägt.
- Erst bei zeitlich differenzierter Analyse für Halb- bzw. Vierteljahre ergeben sich deutliche Trends, die zeitlich und räumlich stark unterschiedlich sind.
- Die räumlichen Muster der Trends von Niederschlag und Abflusshöhen sind für eine Jahreszeit im Allgemeinen ähnlich. Nur die stark positiven Trends des Niederschlags im Herbst kommen nicht in den Abflusshöhentrends des Herbstes zum Ausdruck.
- Der Alpenhauptkamm bildet eine klare räumliche Grenze. Eindeutig positiven Trends im Herbst/Winter nördlich des Alpenhauptkammes stehen negative Trends im Süden gegenüber.
- Das Gebiet südlich des Alpenhauptkammes – speziell Kärnten – ist ganzjährig durch negative Trends geprägt, die am stärksten in den Frühjahrs- und Sommermonaten ausgeprägt sind.

Literatur

- Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P. & Pfandler, M. (2005) Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology* 314, 312-329.
- BMLFUW (Ed.) (2007) *Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Burn, D. H. & Hag Elnur, M. A. (2002) Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* 255, 107-122.
- Dore, M. H. I. (2005) Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International* 31, 1167-1181.
- Eder, G., Fuchs, M., Nachtnebel, H. P. & Loibl, W. (2005) Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. *Hydrological Processes* 19(12), 2339-2360.
- Fürst, J., Nachtnebel, H. P., Kling, H. & Hörhan, T. (2007) Trends in Niederschlag und Abfluss. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich* 85, 1-43.
- Fürst, J., Kling, H., Nachtnebel, H. P. & Hörhan, T. (2008) Trends in hydrologischen Variablen und in der Wasserbilanz Österreichs. in BMLFUW and ÖWAV (Eds.) *Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft*. 105-115, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft & Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien.
- Helsel, D. R. & Hirsch, R. M. (1992) *Statistical methods in water resources*, Elsevier, Amsterdam.
- Kling, H. (2006) Spatio-temporal modelling of the water balance of Austria. Dissertation, 234 pp, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Kling, H., Fürst, J. & Nachtnebel, H. P. (2006) Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large-basin water balance model. *Hydrological Processes* 20(10), 2141-2156.

- Kundzewicz, Z. W., Graczyk, D., Maurer, T., Przymusinska, I., Radziejewski, M., Svensson, C. & Szwed, M. (2004) *Detection of change in world-wide hydrological time series of maximum annual flow*, BFG (Federal Institute of Hydrology), Koblenz, Germany.
- Nobilis, F. & Lorenz, P. (1997) Flood trends in Austria. in G. H. Leavesley, et al. (Eds.) *Destructive Water: Water-caused Natural Disasters, their Abatement and Control*, IAHS, UK: Wallingford.
- Skoda, G. & Lorenz, P. (2003) Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten (Mean annual precipitation – Modelled with uncorrected data). in BMLFUW (Ed.) *Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung*. Karte 2.2, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Svensson, C., Kundzewicz, Z. W. & Maurer, T. (2004) *Trends in flood and low flow series*, 56 pp., BFG (Federal Institute of Hydrology), Koblenz, Germany.
- Xu, Z. X., Takeuchi, K. & Ishidaira, H. (2003) Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal of Hydrology* 279, 14-150.

Anschrift der Autoren:

ao.Univ.-Prof. DI Dr. Josef Fürst

DI Dr. Harald Kling

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans Peter Nachtnebel

DI Thomas Hörhan

Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW)

Muthgasse 18, 1190 Wien

E-Mail: josef.fuerst@boku.ac.at

Internet: www.wau.boku.ac.at/iwhw.html

Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und Extremwerte

Hans Peter Nachtnebel und Philipp Stanzel

Abstract

In diesem Beitrag werden die möglichen hydrologischen Klimafolgen auf Einzugsgebietsebene bis zum Ende dieses Jahrhunderts analysiert. Korrigierte Niederschlags- und Temperaturdaten aus dem regionalen Klimamodell REMO-UBA des Hamburger Max-Planck-Institutes für Meteorologie lagen für ganz Österreich mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km vor. Es wurden drei verschiedene Szenarien entsprechend den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der UNO berücksichtigt. Mit diesen Daten wurden hydrologische Szenarien unter Anwendung eines konzeptionellen Wasserbilanzmodells auf Monatsbasis für alle Einzugsgebiete Österreichs berechnet. Die simulierten Abflüsse wurden für die Kontrollperiode 1961–1990 mit den Beobachtungen verglichen. Die Veränderungen aufgrund des Klimawandels wurden für drei 30-jährige Perioden um 2025, 2050 und 2075 analysiert. Der Beitrag der Gletscher wurde berücksichtigt.

Im österreichischen Mittel zeigen sich tendenzielle Abnahmen in der Jahreswasserfracht. Im räumlichen Muster zeigt sich eine Abnahme des Abflusses im Westen und Süden Österreichs und eine leichte Zunahme im Norden und Nordosten. Im saisonalen Verlauf ergibt sich ein Abflussrückgang im Sommerhalbjahr und ein Anstieg im Winterhalbjahr, wobei diese jahreszeitlichen Veränderungen in den alpinen Gebieten am stärksten ausgeprägt sind. Niederwasserperioden verschieben sich im Vergleich zum 20. Jahrhundert von Winter und Herbst zu Herbst und Spätsommer.

Um den Einfluss des Klimawandels auf Hochwasserereignisse zu prüfen, wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen dem gleichzeitigen Auftreten von bestimmten Wetterlagen und Extremereignissen untersucht. Auf der Grundlage der Prognosen der globalen Klimamodelle ECHAM5 und HADCM3C konnten keine deutlichen Veränderungen in den großräumigen Druckmustern über Mitteleuropa gefunden werden. Übereinstimmende Trends wurden nur für die nordwestlichen Regionen Österreichs ermittelt: Die Zunahme von Nordwest- und Westwetterlagen in Winter und Frühling, die hier häufig Hochwasserereignisse auslösen, deuten auf eine mögliche Zunahme der Hochwasserhäufigkeit in diesen Jahreszeiten hin. Für die übrigen Regionen Österreichs ergab sich kein einheitliches Bild.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die bereits beobachtbare und zunehmende Erwärmung des globalen Klimas gilt mittlerweile als unbestrittene wissenschaftliche Tatsache. Bis zum Jahr 2100 wird je nach Szenario und Klimamodell ein Temperaturanstieg von 1,1 bis 6,4 °C im globalen Mittel prognostiziert (IPCC, 2007). Die Veränderungen in den atmosphärischen Klimabedingungen wirken sich auf den Wasserkreislauf und damit auf den Abfluss aus. Diese Auswirkungen sind gerade in alpinen Regionen sehr komplex, da die räumliche Variabilität der klimatischen Prozesse sehr groß ist und die Hydrologie von saisonalen Niederschlagsumlagerungen beeinflusst wird (Böhm et al., 2008). Projektionen verschiedener Modelle stimmen in Bezug auf die zukünftige Temperaturentwicklung weitgehend

überein (Böhm et al., 2008). Für Österreich wird bis 2050 eine mittlere Temperaturerhöhung von 2 bis 2,5 °C erwartet (Loibl et al., 2009). Simulationsergebnisse zu regionalen Veränderungen im Niederschlag weisen deutlich höhere Unsicherheiten auf (Gobiet und Truhetz, 2008).

Zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen für einzelne Regionen (Kuhn et al., 1992; Nachtnebel, 1999; Nachtnebel et al., 1999; Hebenstreit, 2000; Nachtnebel und Fuchs, 2004; Fürst et al., 2008; Holzmann et al., 2010). Die Interaktion zwischen Veränderungen aufgrund von Klimaänderungen und von direkten menschlichen Eingriffen in den Wasserhaushalt analysierte Nachtnebel (2009).

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der untersuchten Einzugsgebiete, aber auch wegen den unterschiedlichen methodischen Vorgangsweisen und unterschiedlichen Eingangsdaten lassen sich die Ergebnisse dieser auf einzelne Einzugsgebiete bezogenen Studien nicht direkt vergleichen. Viele grundsätzliche Aussagen über die wesentlichen Klimafolgen für die Hydrologie Österreichs stimmen aber zwischen den genannten Untersuchungen und auch mit den wesentlichen Ergebnissen der vorliegenden Studie überein. Eine zusammenfassende Darstellung bisheriger Erkenntnisse zu den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft liegt als Publikation des Lebensministeriums vor (BMLFUW, 2008).

In der vorliegenden Untersuchung, die im Rahmen von KlimAdapt (Kranzl et al., 2010) durchgeführt wurde, konnte nun das gesamte Bundesgebiet Österreichs bei der Beurteilung von hydrologischen Klimafolgen berücksichtigt werden. Eingangsdaten aus dem regionalen Klimamodell REMO-UBA des Hamburger Max-Planck-Institutes für Meteorologie (Jacob et al., 2008) mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km wurden vom Institut für Meteorologie der BOKU validiert, korrigiert und für die Verwendung bei der hydrologischen Modellierung aufbereitet. Dabei wurden drei verschiedene Szenarien entsprechend den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der UNO berücksichtigt. Mit diesen Daten wurden hydrologische Szenarien unter Anwendung eines konzeptionellen Wasserbilanzmodells für alle Einzugsgebiete Österreichs berechnet, wobei auf die Arbeiten von Kling et al. (2005) Bezug genommen wurde. Als Ergebnis konnten für ganz Österreich Karten zu erwartbaren Änderungen der wesentlichen Wasserbilanzgrößen erstellt werden. Für die großen Flüsse wurden auf Pegel bezogenen Änderungen im Abflussverhalten untersucht. Dabei wurden saisonale Verschiebungen im Abflussgang sowie die Abflussführung bei Niederwasser und das zeitliche Auftreten von Niederwasserperioden analysiert.

Bezüglich der Veränderung in den Extremwerten können die REMO-UBA Daten nicht direkt herangezogen werden, weil die Niederschlagsdaten aus dem Modell für den Kontrolllauf deutliche Abweichungen von den Beobachtungen aufweisen. Außerdem wurde das hydrologische Modell mit Monatswerten des Niederschlages und der Temperatur betrieben. Daher wurde ein anderer Ansatz gewählt, bei dem mögliche Veränderungen in hydrologischen Extremereignissen mit Veränderungen auslösender Wetterlagen verbunden wurden. Prognostizierte Veränderungen in der Häufigkeit dieser Wetterlagen im Zusammenhang mit dem Klimawandel, der durch die Klimamodelle beschrieben wird, sollte dann eine Aussage zu Veränderungen der hydrologischen Extreme ermöglichen. Die Wetterlagen wurden dabei mit einer Methode klassifiziert, die im Rahmen des EU-Forschungsprojekts COST733 für die Anwendung in Österreich entwickelt wurde (Philipp

et al., 2010). Vergleichbare Analysen auf der Basis von COST733-Klassifikationen werden derzeit von Prudhomme und Geneviev (2009) für Hochwasser in ganz Europa und von Fleig et al. (2009) für Niederwasser in Nordwesteuropa durchgeführt. Die prognostizierten Veränderungen der Wetterlagenhäufigkeiten wurden auf der Grundlage von Klimaszenarien aus den globalen Klimamodellen ECHAM5 und HADCM3 ermittelt.

2 Methodik zur Erstellung einer Wasserbilanz

Die regionalen Simulationsläufe des REMO-UBA Modells liefern mit 10 x 10 km Rastergröße die derzeit beste räumliche Auflösung für Österreich. Die Simulationen beziehen sich auf drei Emissionsszenarien A1B, A2, B1 und decken den Zeitraum von 2000–2100 ab. Die Daten zeigen für die Kontrollperiode 1961–1990 große Abweichungen zu den Beobachtungen und können daher nicht direkt für hydrologische Simulationen verwendet werden. Erst nach einer Bias-Korrektur und nach Aggregation auf Monatswerte wurde ein hydrologisches Modell mit einer Auflösung von 1 x 1 km betrieben, dessen simulierte Abflüsse für 188 Einzugsgebiete an 140 Pegelstellen überprüft werden konnten. Mit dem hydrologischen Modell wurde dann der Zeitraum von 1950 bis 2100 simuliert, wobei ab 2000 drei unterschiedliche Szenarien des REMO-UBA verwendet wurden.

2.1 Klimadaten

Der Vergleich zwischen den jährlichen und saisonalen Mittelwerten für 1961–1990 aus den Beobachtungen und aus dem Kontrolllauf des REMO-UBA-Modells wies auf grundsätzliche Defizite in der regionalen Klimamodellierung hin. Das großräumige Muster der Temperatur- und Niederschlagsverteilung in Österreich wurde durch das Klimamodell grundsätzlich gut abgebildet. Im Niederschlag kommt es aber durch räumliche Abweichungen der lokalen Niederschlagsmuster zu deutlichen Differenzen. In weiten Bereichen des Alpenraumes zeigen sich starke Überschätzungen zwischen 500 und 2000 mm im Jahresniederschlag. In einigen Gebieten Westösterreichs entspricht das einer Abweichung von 100 % bis zu 200 %. Im Osten wird der Niederschlag eher unterschätzt. Bei der Analyse lokaler räumlicher Verteilungen der hydrologischen Veränderungen muss daher mitberücksichtigt werden, dass zwar regionale Unterschiede in der Niederschlagsverteilung im REMO-UBA-Modell repräsentiert werden, lokale Muster aber trotz der hohen räumlichen Auflösung von 10 x 10 km falsch abgebildet werden.

Auch bei der Lufttemperatur gibt es deutliche Abweichungen zwischen Klimamodell-Ergebnissen und Beobachtungen. Insgesamt zeigen sich eine Unterschätzung der Temperatur in den alpinen Gebieten und eine Überschätzung in den tieferen Lagen, vor allem im Süden. In weiten Teilen Österreichs liegt die Überschätzung im Mittel zwischen 2 und 3 °C.

Aufgrund dieser beträchtlichen Unterschiede zwischen dem REMO-UBA-Kontrolllauf und den Beobachtungen können die Eingangsdaten für die Wasserbilanzsimulation nicht direkt aus dem Modell übernommen werden, sondern wurden mit einem „delta-change“-Ansatz ermittelt. Dabei werden aus den Differenzen zwischen dem langjährigen Monatsmittel des Kontrolllaufs und den Werten des Szenariolaufs Klimaänderungssignale für jeden Monat des 21. Jahrhunderts ermittelt. Die meteorologischen Inputdaten für die Wasserbilanzsimulation werden dann durch Korrektur der Klimaänderungssignale mit den Monatsmittelwerten der Beobachtungen ermittelt. Diese

Arbeiten wurden von H. Formayer vom BOKU-MET durchgeführt. Die langfristige Entwicklung der Jahresmittelwerte der drei Szenarien ist in *Abb. 1* dargestellt. Auffallend sind die hohen Schwankungen im Niederschlag, insbesondere die Maxima um die Mitte dieses Jahrhunderts. Die Temperaturentwicklung zeigt hingegen in allen drei Läufen einen ähnlichen Verlauf.

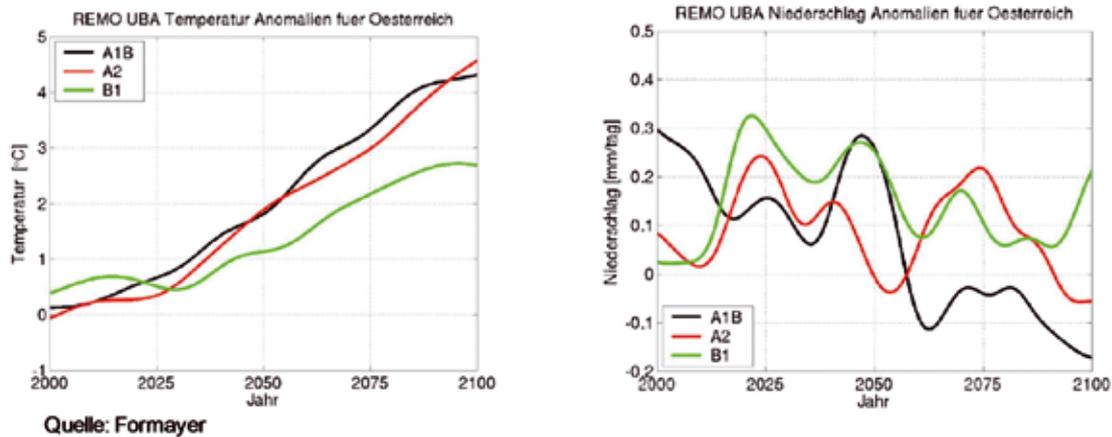


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung in Temperatur und Niederschlag für Österreich.

2.2 Hydrologisches Modell

Für die Berechnung der Referenzwerte der Wasserbilanzkomponenten wurde das kontinuierliche hydrologische Konzept-Modell COSERO herangezogen. COSERO ist ein in Anlehnung an das HBV-Modell (Bergström, 1992) am IWHW entwickeltes kontinuierliches, halbverteilt, deterministisches N/A-Modell (Nachtnebel et al., 1993; Fuchs, 1998; Kling, 2002; Eder et al. 2005; u. a.). Die berücksichtigten Prozesse umfassen Schneeschmelze und -akkumulation, Interzeption, Evapotranspiration, Speicherung im Boden und die Aufteilung des Abflusses in zwei Abflusskomponenten (einem rascheren Abflussanteil und einem langsamen Abflussanteil, der dem Basisabfluss entspricht). *Abb. 2* zeigt ein Schema des Modellkonzepts mit den einzelnen Modulen und Speichern. Das zu simulierende Einzugsgebiet wird in einzelne Berechnungszonen unterteilt; für jede einzelne Zone werden die dargestellten Rechenmodule ausgeführt. Gebietsabfluss und Pegelabfluss ergeben sich aus der Addition des zugehörigen Zonenabflusses.

Es wurde jenes Modell für das gesamte Staatsgebiet Österreichs angewendet, das bereits für die Erstellung von Karten des Hydrologischen Atlas Österreich erstellt und kalibriert wurde (Kling et al. 2005). Die mit diesem Modell ermittelten Abflusshöhen für 1961 bis 1990 dienen als Referenz für die Veränderungen in den Szenariensimulationen.

Aus den Klimaänderungssignalen für Niederschlag und Temperatur wurden Inputdaten für hydrologische Szenarienrechnungen erstellt. Damit konnten langjährige und saisonale Mittelwerte der Wasserbilanzkomponenten der Perioden 2011–2040 (30-jährige Periode um 2025), 2036–2065 (um 2050) und 2061–2090 (um 2075) ermittelt werden. Die Auswirkungen prognostizierter Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Österreich konnten dann durch den Vergleich mit den Simulationsergebnissen der Referenzperiode ermittelt werden.

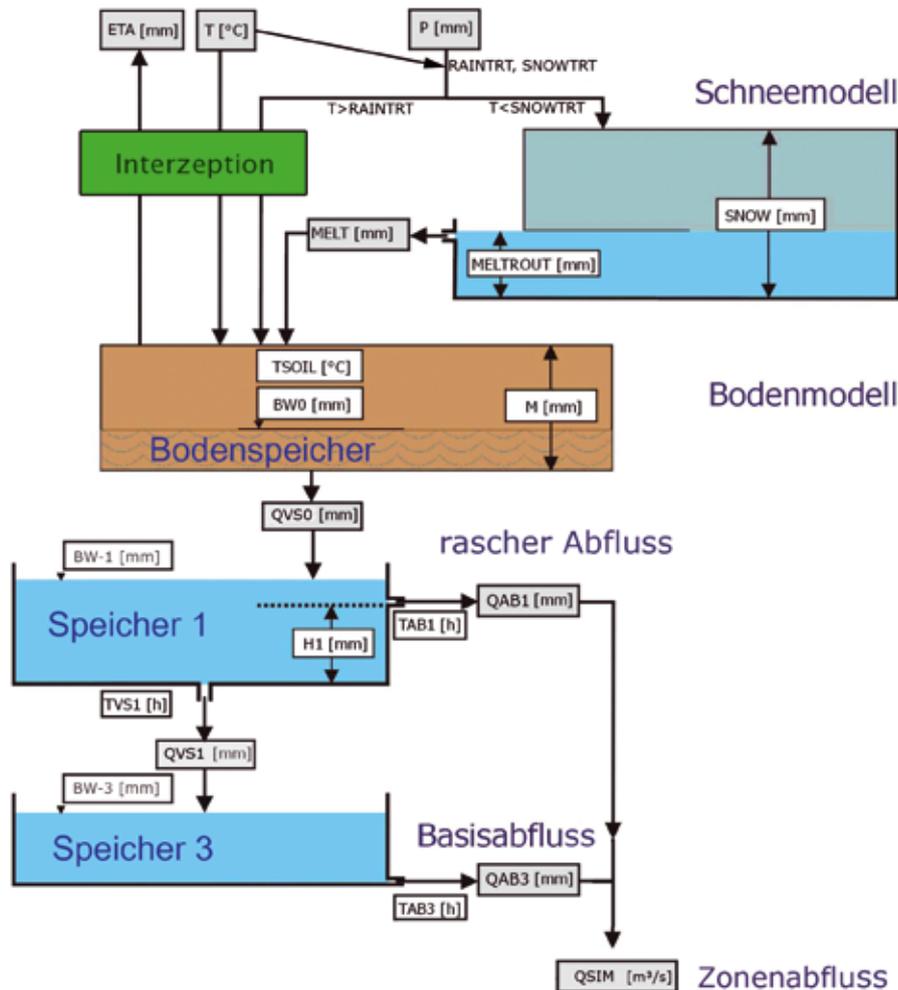


Abb. 2: Schema des hydrologischen Konzept-Modells COSERO.

2.3 Gletscher

Als Gletscherzonen wurden jene Zonen definiert, die in der Referenzrechnung 1961–1990 im Mittel des Monats August zumindest zu 90 % schneebedeckt waren. Die resultierenden Flächen sind etwas kleiner als die im HAÖ als Gletscher ausgewiesenen Flächen (Kuhn und Lambrecht, 2007; Kuhn, 2008), doch besteht grundsätzlich eine gute Übereinstimmung bezüglich der räumlichen Verortung. Die Berechnung des Gletscherabflusses erfolgte für die Einzugsgebiete des Inn, der Salzach und der Drau. Die relativ kleinen Gletscherflächen in Vorarlberg und Oberösterreich wurden vernachlässigt. Zur Festlegung der Eisdicke am Beginn des 21. Jahrhunderts wurden Daten aus Span et al. (2005) herangezogen. Aus den vorliegenden Messergebnissen von Eisdicken und Gletschervolumina einzelner Gletscher wurde die mittlere Eisdicke geschätzt bzw., wenn Volumina vorhanden waren, berechnet und jeweils auf die gesamte Gletschergruppe umgelegt. Dabei wurde in jeder Gletschergruppe ein mittleres Eisvolumen für niedriger gelegene Gletscherflächen und eines für höher gelegene Gletscherflächen festgelegt. Die Gletscherschmelze wurde, sobald eine Gletscherzone nur noch teilweise schneebedeckt war, vereinfacht mit dem Grad-Tag-Verfahren berechnet.

2.4 Hydrologische Extremereignisse

Für Analysen in Bezug auf hydrologische Extremereignisse konnten die hydrologischen Simulationen auf der Basis der REMO-UBA-Daten nicht herangezogen werden, da die Niederschlagsdaten aus dem Klimamodell nicht als ausreichend zuverlässig angesehen wurden, um eine Berechnung in Tagesschritten zur Analyse von Extremereignissen darauf aufzubauen.

Als wesentlich zuverlässiger wird die Repräsentation von großräumigen Druckmustern in den Klimamodellen angesehen. Zur Klassifizierung in Wetterlagen wurden Druckverteilungen und Windrichtungen verwendet. Dann wurde festgestellt, ob ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Wetterlagen und hydrologischer Extremereignisse besteht. Schließlich wurde analysiert, ob bestimmte auslösende Wetterlagen zukünftig häufiger zu erwarten sind.

Die Auswertung erfolgte für Zeitreihen beobachteter Abflüsse von 554 Pegeln, die jeweils einer von sieben Klimaregionen zugeteilt wurden. Aufbauend auf einer partiellen Reihe wurden der Tag der Abflussspitze und die zwei vorangegangenen Tage als die das Hochwasser auslösende Periode betrachtet.

Die Auswahl der Niedrigwasserperioden erfolgte über den Schwellenwert der 5-%-Unterschreitungswahrscheinlichkeit jedes Pegels. Für die Auswertung wurden Niedrigwasserperioden mit einer minimalen Dauer von 3 Tagen herangezogen. Als auslösende Periode wurde ein Zeitraum von 5 Tagen vor Beginn bis 3 Tage vor Ende der Unterschreitung des Schwellenwertes angesehen.

Für die Klassifizierung der Wetterlagen wurde eine Methode verwendet, die im Rahmen des EU-Forschungsprojekts COST733 (Philipp et al. 2010) für die Anwendung in Österreich entwickelt wurde. Die Geopotentialhöhen auf 500 hPa und 925 hPa und der Wind auf 700 hPa, jeweils um 12:00 UTC, dienen als Eingangsdaten und werden entsprechend ihrer Lage in der Domäne gewichtet (Abb. 3).

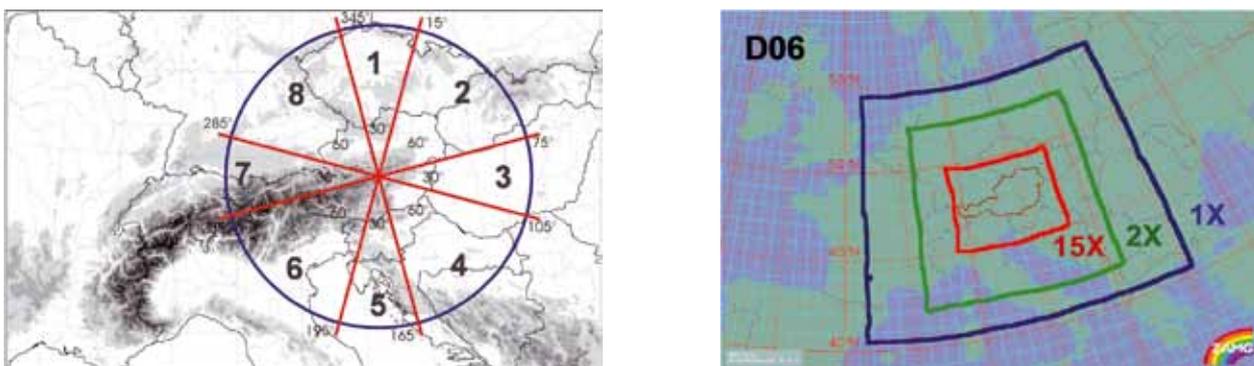


Abb. 3: Windrichtungsklassen (links, 0 = unbestimmt) und Domäne (rechts, mit relativer Gewichtung) (Quelle: T. Krennert).

Die Berechnungen erfolgten auf der Grundlage von Variablen der ERA40-Reanalysen für das 20. Jahrhundert und der Globalen Klimamodelle ECHAM5 (Szenarien A1B und B1; Roeckner et al. 2003) und HADCM3C (Szenario A1B; ENSEMBLES 2006) für das 20. und das 21. Jahrhundert. Die Daten der Klimamodelle wurden vom CERA-Internetportal des World Data Center for Climate (WDCC) heruntergeladen.

Für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die gesamten Auftretenshäufigkeiten der Wetterlagen aus ERA40-Daten (Beobachtungen) einerseits und den Kontrollläufen der Klimamodelle andererseits berechnet und miteinander verglichen. Für einzelne Wetterlagen ergaben sich deutliche Abweichungen (Abb. 4), die Verteilungen der dominanten Windrichtungen zeigten aber eine relativ gute Übereinstimmung (Abb. 5). Die Unterschiede zwischen ERA40 und den Kontrollläufen waren aber größer als die Änderung zwischen Kontrollläufen und Klimaszenarien (Abb. 5). Aufgrund dieser großen Unsicherheiten wurden rein qualitative Beurteilungen möglicher Veränderungen durchgeführt.

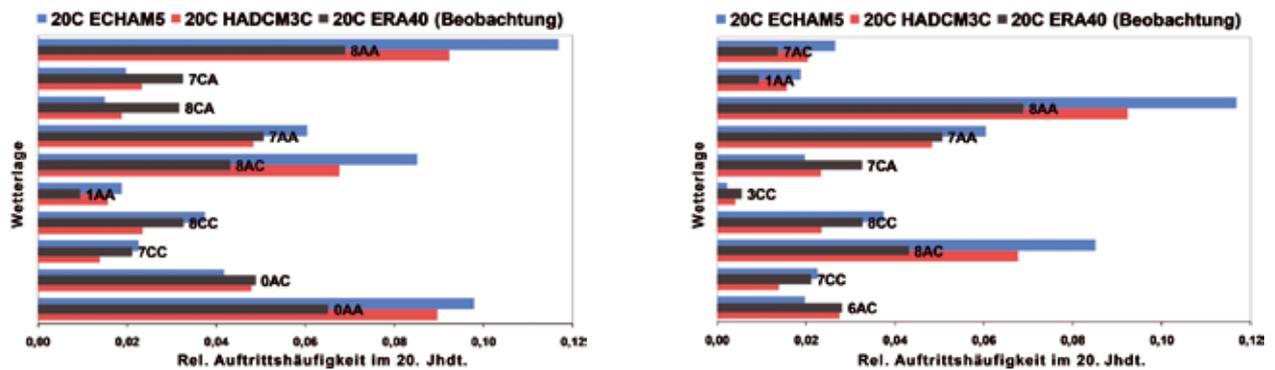


Abb. 4: Wetterlagenhäufigkeiten auf der Basis von Beobachtungen (ERA40) und GCM-Kontrollläufen für ausgewählte Wetterlagen.

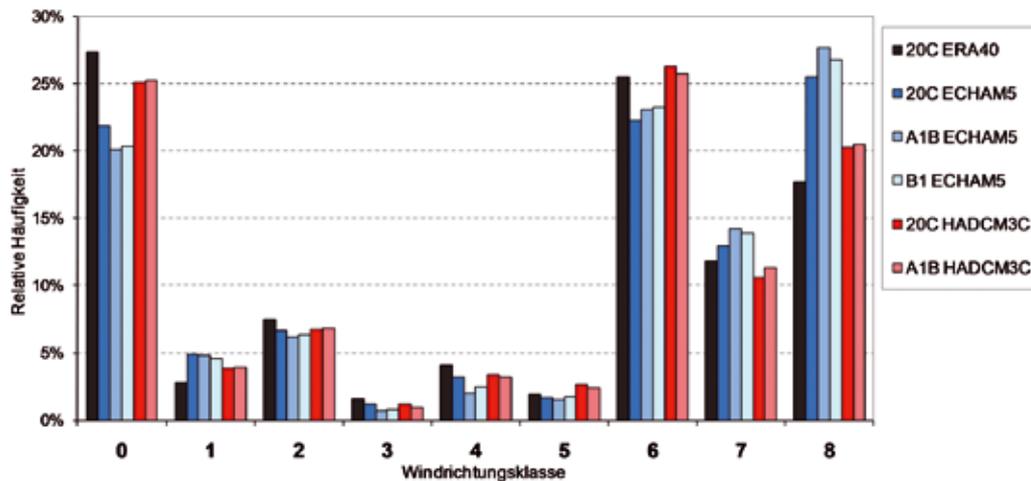


Abb. 5: Relative Häufigkeiten von dominanten Windrichtungen auf der Basis von Beobachtungen (ERA40), GCM-Kontrollläufen und GCM-Szenarien.

3. Anwendung und Ergebnisse zum Wasserhaushalt

3.1 Niederschlag und Temperatur

Die räumliche Verteilung der Niederschlagsänderungen zeigt beispielhaft Abb. 6 (rechts, Szenario A1B, Periode um 2050). Das generelle Muster der Niederschlagsinputs aus dem REMO-UBA-Modell zeigt sich deutlich: für den Norden und Nordosten Österreichs werden Zunahmen des

Niederschlags prognostiziert. Für den Süden und Westen werden nur sehr geringe Zunahmen oder keine Veränderungen, für den Südosten geringfügige Abnahmen des Niederschlags berechnet. Der Temperaturanstieg (links in *Abb. 6*) ist im Süden und Westen Österreichs höher als im Norden und Osten.

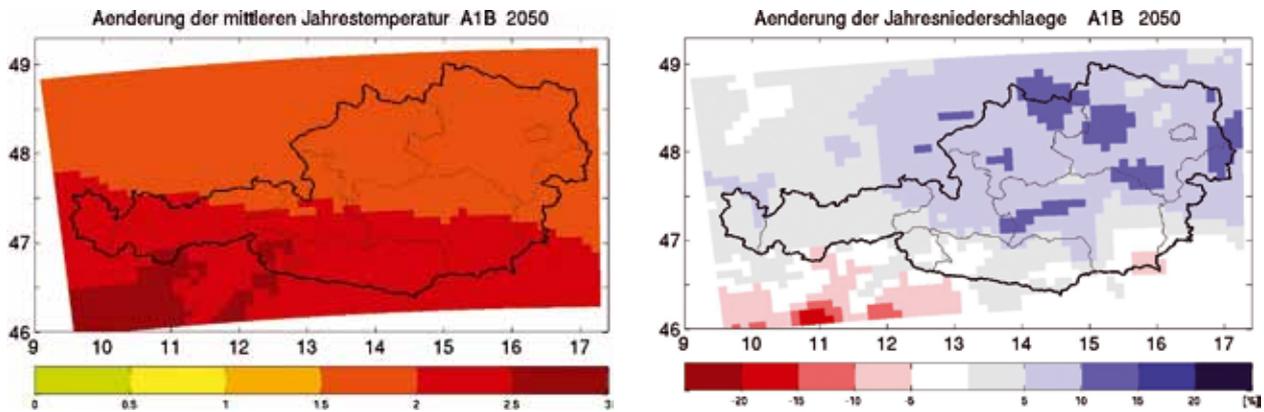


Abb. 6: Klimaänderungssignale gegenüber 1961–1990 für Lufttemperatur (links) und Niederschlag (rechts), Szenario A1B, Mittelwert Periode 2036–2065 (Quelle: H. Formayer).

3.2 Komponenten des Wasserhaushaltes

Die Güte der hydrologischen Simulation für die Referenzperiode 1961–1990 wurde für Einzugsgebiete, die keine wesentlichen anthropogenen Abflussbeeinflussungen aufweisen und über verlässliche Abflussaufzeichnungen verfügen, ermittelt. Die Simulation der langjährigen Mittelwerte des saisonalen Abflusses wurde über die Korrelation zwischen beobachteten und simulierten Werte beurteilt. Bei der gemeinsamen Beurteilung aller Jahreszeiten konnte ein R^2 von 0,983 erzielt werden, d. h. das Modell erklärt mehr als 98 Prozent der geografischen Variabilität des saisonalen Abflusses. Die Beurteilung der Güte der kontinuierlichen monatlichen Simulation mit der Nash-Sutcliffe-Efficiency ergab als Median aller berücksichtigten Einzugsgebiete 0,72, die schlechtesten 25 % der Gebiete wiesen einen Wert kleiner oder gleich 0,6 auf, die besten 25 % einen Wert größer als 0,88. Bei beiden Beurteilungen konnten schlechtere Ergebnisse für Gebiete mit niedrigen Abflüssen, d. h. vor allem in flacheren Regionen Österreichs beobachtet werden, die besten Simulationsgüten wurden in alpinen Gebieten mit hohem Niederschlag und hohem Abfluss erzielt (vgl. auch Kling 2006).

Abb. 7 zeigt die zeitliche Entwicklung der simulierten Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Abfluss und Verdunstung im jeweils 30-jährigen Mittel für ganz Österreich für die Referenzperiode 1961–1990 sowie alle betrachteten Szenarien. Der Niederschlag, der durch die Gesamthöhe der Balken angezeigt wird, liegt in den Szenarien fast im gesamten 21. Jahrhundert über jenem der Referenzperiode. Dies ist eine Eigenheit des Klimamodells REMO-UBA in der angewendeten Realisierung. Außerdem werden, vor allem im Szenario A2, relativ starke zyklische Schwankungen im Niederschlag deutlich. Insgesamt zeigt sich innerhalb des 21. Jahrhunderts aber in allen Szenarien eine Tendenz abnehmender Niederschläge. Der Trend zu einem Rückgang des Abflusses im Verlauf des 21. Jahrhunderts ist noch stärker als im Niederschlag (dunkler Teilbalken). Die Abnahme zwischen 2025 und 2075 beträgt zwischen 7 % (A2), 9 % (B1) und 16 % (A1B). Dies ist auf den deutlichen Anstieg der Verdunstung zurückzuführen (heller Teilbalken).

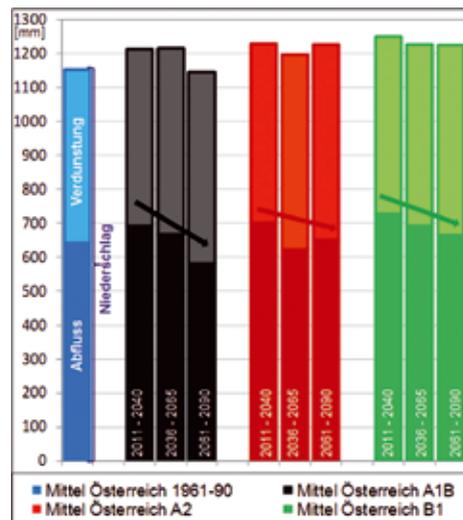


Abb. 7: Veränderungen in den Wasserbilanzkomponenten im Mittel für ganz Österreich.

Für die Analyse der räumlichen Muster der Veränderungen sind in *Abb. 8* die relativen Änderungen im Jahresabfluss 2061–2090 im Vergleich zu 1961–1990 für die Szenarien A1B (oben) und A2 (unten) dargestellt. Diese Szenarien weisen eine ähnliche Entwicklung der Temperatur auf, unterscheiden sich aber deutlich in Bezug auf den Niederschlag in der betrachteten Periode, der im A2-Szenario wesentlich höher ist als im A1B. Für das A1B-Szenario wurde eine Abnahme des Abflusses für den Großteil des österreichischen Staatsgebiets errechnet. Für große Bereiche im Westen und Süden ergaben sich dabei Abnahmen von 10–20 %. Die räumliche Verteilung der Änderungen im Abflussverhalten stimmt im A2-Szenario weitgehend mit A1B überein (und auch mit dem nicht dargestellten B1-Szenario). Im Westen und Süden Österreichs ist demnach mit einer Abnahme des Abflusses zu rechnen, im Norden und Nordosten mit einer Zunahme. Im Zentrum sowie im Südosten ergaben die Szenarien im Vergleich mit dem 20. Jahrhundert unterschiedliche Vorzeichen bei geringen relativen Änderungen.

Auch die Veränderungen im saisonalen Verlauf des Abflusses stimmen in ihrer Tendenz zwischen den einzelnen Szenarien gut überein. Im Allgemeinen zeigt sich hier das folgende Muster: Die Abflüsse im Sommerhalbjahr gehen zurück und jene im Winterhalbjahr steigen an. Die saisonalen Änderungen werden nicht nur vom schwankenden Wetter- und Niederschlagsgeschehen im Klimamodell, sondern auch sehr stark von den Veränderungen bei Schneeakkumulation und Schneeschmelze aufgrund der steigenden Temperatur beeinflusst. Die Auswirkungen sind daher in den alpinen Regionen, deren Abflussgeschehen stärker von diesen Prozessen bestimmt wird, besonders ausgeprägt.

3.3 Veränderungen in Extremwerten

Niederwässer

Auswirkungen auf Niederwasser wurden auf der Grundlage der bisher beschriebenen Simulationen für das Szenario A1B und die Flüsse Salzach und Ager analysiert. Veränderungen im Auftrittszeitpunkt wurden untersucht, wobei die Auftrittszeiten der niedrigsten Monatsabflüsse erfasst wurden. Hier zeigte sich bis 2075 eine deutlich Verschiebung hin zu früheren Monaten. In alpinen

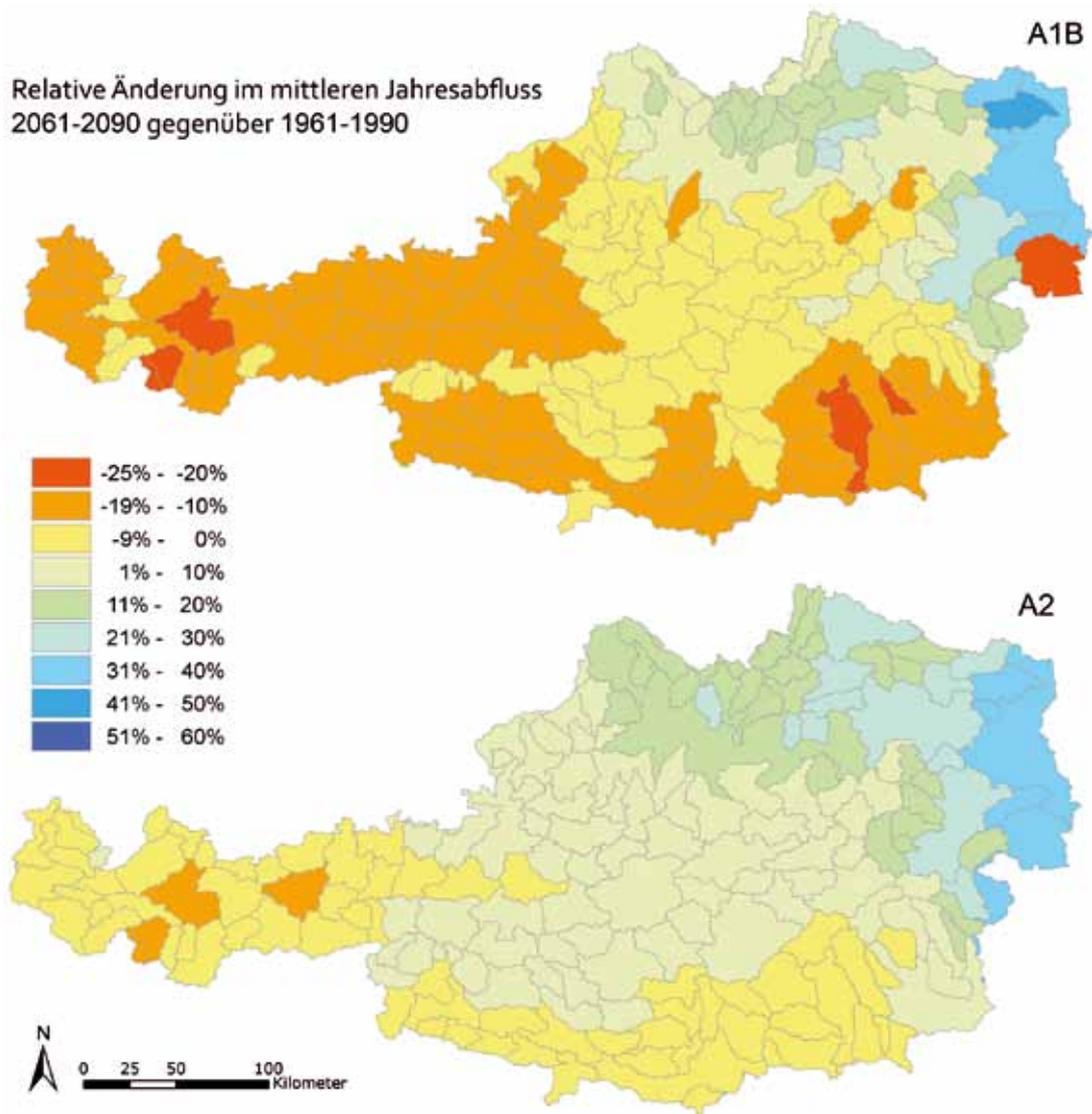


Abb. 8: Relative Änderungen des langjährigen mittleren Jahresabflusses 2061–2090 der Szenarien A2 (unten) und A1B (oben) gegenüber 1961–1990.

Gebieten wie an der Salzach, in denen die Niederwasserphasen derzeit im Winter auftreten, ergab sich eine teilweise Verschiebung in den Herbst. In Vorlandgebieten wie an der Ager mit derzeit im Herbst und Winter auftretenden Niederwasserperioden, ergab sich eine Verschiebung in den Herbst und Sommer, wobei hier kaum mehr Niederwasser im Winter auftreten. In der Abflussführung bei Niederwasser zeigte sich für diese beiden Gebiete eine gegenläufige Entwicklung. Während der Q95% an der Salzach bis 2075 leicht ansteigt, nimmt er an der Ager ab.

Wetterlagen und Hochwässer

Für Hochwasserereignisse wurden die Häufigkeiten des Auftretens der einzelnen Wetterlagen während der auslösenden Perioden getrennt für die vier Jahreszeiten ermittelt. Die 10 Wetterlagen mit der höchsten relativen Auftrittshäufigkeit in Hochwasserperioden wurden als auslösende Druckmuster der jeweiligen Region und Jahreszeit angesehen (Abb. 9) und für die Analyse der Veränderungen bei Klimawandel herangezogen.

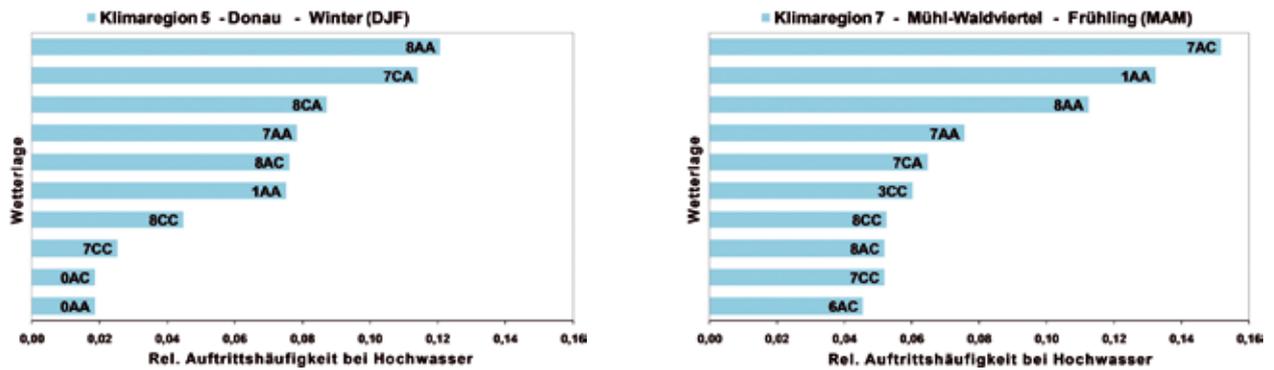


Abb. 9: Hochwasser auslösende Wetterlagen.

Veränderungen aufgrund des Klimawandels wurden ermittelt, indem die mittlere Auftrittshäufigkeit der Hochwasser auslösenden Wetterlagen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (Kontrolllauf) mit jenen der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (Szenario) verglichen wurde.

Die prognostizierten Veränderungen verschiedener Modellen und Szenarien wichen in den meisten Klimaregionen und Jahreszeiten voneinander ab. Übereinstimmende Trends wurden für Winter und Frühling in nordwestlichen Regionen Österreichs festgestellt: Häufigeres Auftreten von Nord-West- und West-Wetterlagen, die in diesen Regionen und Jahreszeiten häufig zu Hochwasser führen, deuten auf einen Anstieg der Hochwasserhäufigkeit hin.

Für Niederwasserereignisse ergab sich kein aussagekräftiger Zusammenhang mit Wetterlagen nach COST733.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die räumlich hochaufgelösten Klimadaten des REMO-UBA-Modells zeigten für die Kontrollperiode vor allem im Niederschlag deutliche Abweichungen von den Beobachtungen. Für die hydrologische Simulation wurden daher korrigierte Szenariendaten in monatlichen Zeitschritten verwendet. In allen drei betrachteten Szenarien zeigten sich hohe Niederschläge im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990, die im Verlauf des 21. Jahrhunderts aber einen abnehmenden Trend aufweisen. Daraus ergibt sich ein noch stärkerer abnehmender Trend im Abfluss, da die Verdunstung aufgrund des Temperaturanstiegs zunimmt. Im Jahresabfluss für ganz Österreich beträgt der Rückgang zwischen 2025 und 2075 je nach Szenario 7 % bis 16 %. Die räumlichen Muster stimmen bei allen Szenarien weitgehend überein: im Westen und Süden Österreichs ist mit einer Abnahme des Abflusses zu rechnen, im Norden und Nordosten mit einer Zunahme. Bei den saisonalen Veränderungen zeigt sich ebenfalls eine starke Übereinstimmung: die Abflüsse im Sommerhalbjahr gehen zurück und jene im Winterhalbjahr steigen an, wobei diese Veränderung in den alpinen Gebieten am stärksten ausgeprägt ist.

Niederwasserperioden verschieben sich tendenziell von Winter und Herbst zu Herbst und Sommer, wobei die Abflussführung bei Niederwasser in alpin geprägten Gebieten eher zunimmt und in Vorlandgebieten eher abnimmt.

Die Analysen von Wetterlagen, die nach der COST733-Methode klassifiziert wurden, ergaben keine drastischen Veränderungen der Druckmuster über Mitteleuropa in den Klimaszenarien der globalen Klimamodelle ECHAM5 und HADCM3C. Die Klassifizierungen für das 20. Jahrhundert auf der Basis der GCM-Kontrollläufe zeigten zum Teil deutliche Abweichungen von jenen, die auf Beobachtungen (ERA40) basierten. In den Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert wichen die Ergebnisse verschiedener Modelle und Szenarien zumeist voneinander ab. Übereinstimmende Trends einer Zunahme ergaben sich für jene Wetterlagen, die in Winter und Frühling Hochwasser im Nord-Westen Österreichs auslösen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der Projekte „KlimAdapt – Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Anpassung des Energiesystems an den Klimawandel“ und „Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremwerten“ durchgeführt, die vom Klima- und Energiefonds gefördert werden.

„KlimAdapt“ wird im Rahmen des Programms „Energie der Zukunft“ gefördert (Nr. 816 665). Das Projekt wird vom Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Energy Economics Group, der Technische Universität Wien koordiniert. Klimadaten wurden vom Institut für Meteorologie der BOKU zur Verfügung gestellt.

Die Förderung des Projektes A760456. „Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremwerten“ (H.P. Nachtnebel, E. Rudel, R. Steinacker) erfolgte durch den Klima- und Energiefonds des Bundes. Abflussdaten wurden vom Hydrographischen Zentralbüro (HZB) zur Verfügung gestellt. Die Wetterlagenklassifizierung wurde von T.Krennert von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt.

Literatur

- Bergström, S. 1992. The HBV Model - its structure and applications; SMHI Reports Hydrology, No. 4.
- BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P. und Pirker, O. 2008. Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich. In: BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Eder, G., Fuchs, M., Nachtnebel, H.-P. und Loibl, W. 2005. Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. *Hydrological Processes* 19, 2339–2360
- ENSEMBLES 2006. RT1 ENSEMBLES Periodic Activity Report –1Sep05-31Aug06. http://www.ecmwf.int/research/EU_projects/ENSEMBLES/gen_info/deliverables/index.html
- Fleig A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Stahl, K., Hannah D.M. 2009. Inter-comparison of weather and circulation type classifications for hydrological drought development, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, In Press.
- Fuchs, M. 1998. Modeling Snowmelt Runoff in an Alpine Watershed. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- Fürst, J., Nachtnebel, H. P., Kling, H., Hörhan, T. 2008. Trends in Niederschlag und Abfluss. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 85, 1-43, Wien.

- Gobiet, A. und Truhetz, H. 2008. Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich. In: BMLFUW (Hrsg.). Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Hebenstreit, K. 2000. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete. Wiener Mitteilungen 160.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P. 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62/1-2, 7-14.
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K. 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg.
- Kling, H. 2002. Development of tools for a semi-distributed runoff model (COSERO). Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- Kling H., Nachtnebel H.P., Fürst J. 2005. Mittlere jährliche Abflusshöhe aus der Wasserbilanz. In: BMLFUW (Hrsg.), Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Kartentafel 5.7 Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Kling, H. 2006. Spatio-Temporal Modelling of the Water Balance of Austria. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien.
- Kranzl, L., Kalt, G., Müller, A., Redl, C., Haas, R., Formayer, H. Haas, P., Stanzel, P. Nachtnebel, H.P., Schoerghuber, S., Kindermann, G, Seidl, R., Rammer, W., Lexer, M.J. 2010. Auswirkungen des Klimawandels auf das Energiesystem und notwendige Adaptationsmaßnahmen. 11. Österreichischer Klimatag, 11.-12.3. 2010, Wien.
- Kuhn M., Nachtnebel H.P., Obleitner F., Reichel G. 1992. Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserkreislauf Österreichs. Anthropogene Klimaänderung, chapter 4., ÖAW, und BMfWF, Wien.
- Kuhn, M. und Lambrecht, A. 2007. Änderung von Gletschern im 20. Jahrhundert. In: BMLFUW (Hrsg.), Hydrologischer Atlas Österreichs, 3. Lieferung, Kartentafel 4.3. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Kuhn, M. 2008. Klimawandel und Gletscherschwund. In: BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Loibl, W., Züger, J. und Köstl, M. 2009 Reclip:more – Kleinräumige Klimaszenarien für Österreich. Standort – Zeitschrift für Angewandte Geographie 33, 94–100.
- Nachtnebel, H.P., Baumung, S., Lettl, W. 1993. Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr (Handbuch). IWHW, BOKU, Wien.
- Nachtnebel, H.P., Hebenstreit, K., Diernhofer, W., Fuchs, M. 1999. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 51/9-10, 262-275
- Nachtnebel H.P. 1999. Possible consequences of climate change on river basin management. RIBAMOD, p. 5-22. EUR 18287 EN, European commission, Brussels.
- Nachtnebel, H.P. und Fuchs, M. 2004. Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56/7-8, 79-92

- Nachtnebel, H.P. 2009. Possible Consequences of Global Change on Water Management and Hydraulic Structures. Proceedings of the Eleventh International Symposium on field of Water Management and Hydraulic Engineering, Sept 1-5, 2009, Ohrid, Macedonia.
- Philipp A., J. Bartholy, C. Beck, M. Erpicum, P. Esteban, X. Fettweis, R. Huth, P. James, S. Jourdain, F. Kreienkamp, T. Krennert, S. Lykoudis, S. Michalides, K. Pianko, P. Post, D. Rassilla Álvarez, R. Schiemann, A. Spekat, F. S. Tymvios 2009. Cost733cat - A database of weather and circulation type classifications, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, In Press.
- Prudhomme, C. and Geneviev, M. 2009. Are flood occurrences in Europe linked to specific atmospheric circulation types? Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-3068
- Roeckner, E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornbluh L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A. 2003. The atmospheric general simulation model ECHAM5 – Part 1. Model description. Max Planck Institute for Meteorology Report nr. 349.
- Span, N., Fischer, A., Kuhn, M., Massimo, M., Butschek, M. 2005. Radarmessungen der Eisdicke österreichischer Gletscher. Band 1: Messungen 1995 bis 1998. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien.

Anschrift der Autoren:

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans Peter Nachtnebel
DI Philipp Stanzel
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
Muthgasse 18, 1190 Wien
E-Mail: hans_peter.nachtnebel@boku.ac.at
Internet: www.wau.boku.ac.at/iwhw.html

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft

Wolfgang Schöner, Ingeborg Auer, Reinhard Böhm, Klaus Haslinger, Günter Blöschl, Alfred Paul Blaschke, Ralf Merz, Helmut Kroiß, Norbert Kreuzinger und Gregori Stanzer

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ werden der aktuelle Stand des Wissens über Klimaänderung in Österreich mit wasserwirtschaftlichen Fokus, die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft sowie notwendige Anpassungsmaßnahmen untersucht. Dazu wird das Wissen aus vorliegenden Untersuchungen aggregiert und durch Zusatzuntersuchungen erweitert sowie auch die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus anderen Ländern gezeigt. Das dargestellte Wissen über Klimaänderung und Wasserwirtschaft wird entsprechend der Unsicherheit der Aussagen in harte – mittelharte – weiche – keine Aussagen bewertet. Die Bewertung dieser Unsicherheit erfolgt in einem interdisziplinären Prozess bei dem Klimatologen gemeinsam mit Hydrologen bzw. Wasserwirtschaftlern diese Bewertung im Diskurs erarbeiten. Alle Aussagen über wasserwirtschaftliche Änderungen durch Klimaänderung in dieser Studie sind daher auf beidseitige Plausibilität (Klima-Wasserwirtschaft) geprüft. Die Studie wird im Auftrag des BM für Land und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft durchgeführt und bis zur Jahresmitte 2010 fertig gestellt.

Teilbereiche der Studie

Das Grundkonzept der Studie ist aus *Abb. 1* ableitbar. Es werden in Phase 1 der Stand der Forschung über Klimaänderung in Österreich zusammengefasst und dann anschließend in Phase 2 insbesondere die Veränderungen der hydrometeorologischen Bedingungen beschrieben. In Phase 3 werden die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft durch die Kompetenzbündelung von Klimatologie und Wasserwirtschaft erarbeitet und schließlich in Phase 4 Anpassungsstrategien bzw. Vermeidungs-/Verminderungsstrategien gezeigt.

Grundlagen zum Klimawandel in Österreich mit hydrologischer Relevanz aus Messreihen

Die aus Messreihen bekannten Informationen über Klimaänderung mit hydrologischem Fokus werden zusammenfassend dargestellt. Dabei werden insbesondere die Klimaparameter Strahlung, Lufttemperatur, Niederschlag, Verdunstung und Schneedecke dargestellt. Zusätzlich wird auch der Stand des Wissens über die klimabedingte Veränderung der hydrologisch relevanten Größen Gletscher und Permafrost aufgezeigt. Wie für alle anderen Teilbereiche der Studie wird die unterschiedliche Aussagekraft der Daten (hart-weiche Fakten) angegeben.

Szenarien des Klimawandels in Österreich mit besonderer Berücksichtigung der Hydrologie

Dabei wird der Stand des Wissens zur regionalen Klimamodellierung für Österreich zusammengefasst, wobei die Ergebnisse aus Studien österreichischer Forschungsprojekte (reclip:more,

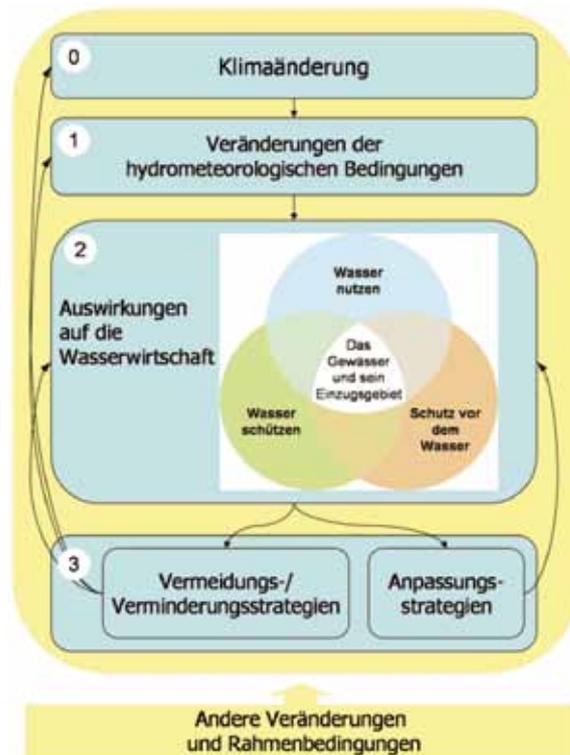


Abb. 1: Das Klimaänderung – Wasserwirtschaftssystem (Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz, www.bafu.admin.ch).

reclip:century) internationalen Studien, die das Gebiet von Österreich abdecken, gegenübergestellt werden (z. B.: CECILIA, RRUDENCE). Zusätzlich wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus regionalen Klimamodellierungen benachbarter Länder auf Österreich gezeigt. Besonderes Schwergewicht wird auf Klimagrundlagen mit Einfluss auf hydrologische/wasserwirtschaftliche Fragestellungen gelegt. Dabei werden Szenarien aus Klimamodellläufen und deren Unsicherheiten beschrieben und in einfach verständliche Darstellungen zusammengeführt (nach Vorbild „Die Schweiz 2050“). Besonderes Augenmerk wird dem Klimaelement Niederschlag, aufgrund seiner umfangreichen Bedeutung für Hydrologie/Wasserwirtschaft geschenkt. Weiters werden die Klimaelemente Strahlung, Lufttemperatur, Schneedecke und Verdunstung sowie die Speichergrößen Gletscher und Permafrost behandelt.

Wissensstand der Auswirkungen des Klimawandels auf die Teilgebiete der Wasserwirtschaft

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf die Wasserwirtschaft auf Basis von drei Arten existierender Untersuchungen in Österreich.

Die erste Art der Untersuchung sind Trendanalysen beobachteter Daten. Die bestehenden Trenduntersuchungen werden beurteilt in Hinblick auf die Signifikanz von Trends und deren regionale Unterschiede. Trendanalysen hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Kenngrößen werden dann argumentativ in Beziehung gesetzt mit Trends meteorologischer Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur. Daraus lassen sich Schlüsse über weiche bis harte Fakten aus wasserwirtschaftlicher Perspektive ziehen.

Die zweite Art von Beurteilung von Klimaauswirkungen beruht auf Szenarienrechnungen. Es existieren zahlreiche Studien, bei denen die Ergebnisse von Klimamodellen mit hydrologischen Modellen gekoppelt werden, um dadurch die möglichen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft zu erschließen. Der Vorteil solcher Untersuchungen besteht darin, die Effekte einzelner Komponenten des Systems analysieren zu können, allerdings sind die Ergebnisse nur so zuverlässig, wie es die verwendeten Modelle und Eingangsgrößen erlauben.

Bei der dritten Art von existierenden Einschätzungen werden keine Berechnungen durchgeführt, sondern Schlüsse auf Basis allgemeiner Überlegungen gezogen. Dabei werden die wichtigsten Prozesse sehr vereinfacht gedanklich abgebildet. Es handelt sich dabei um Varianten der Causal Loop Method.

1. Hochwasser

Die meteorologischen und hydrologischen Prozesse, die Hochwasserabflüsse auslösen können, sind sehr vielseitig und komplex. Gleichzeitig sind die vorhandenen Beobachtungszeitreihen von Hochwasserereignissen relativ kurz, so dass durch statistische Trendanalysen der Hochwasserscheitel oft keine signifikanten Trends in der Änderung des Hochwasserregimes zu erkennen sind. Ein alternativer Weg ist die Analyse der Änderungen der Hochwasserabflussprozesse, die sich z. B. durch eine Verschiebung der Saisonalität von Hochwasserereignissen ausdrücken kann. Neben den traditionellen Trendanalysen von Hochwasserabflüssen erfolgt in diesem Projekt auch die Analyse der Änderung der Saisonalität von Hochwasserereignissen. Diese Untersuchungen erlauben Rückschlüsse auf zukünftige veränderte Hochwasserprozesse wie z. B. Hochwässer zufolge konvektiver Ereignisse oder Schneeschmelzhochwässer. Es ist zu erwarten, dass Aussagen über kleine Hochwässer härten sind, also solche über große Hochwässer.

2. Geschiebepotenzial von alpinen Gewässern

Beim Geschiebepotenzial sind vor allem zwei klimarelevante Faktoren zu betrachten. Der erste Faktor ist im Zusammenhang zu sehen mit einer möglichen Zunahme von Starkniederschlägen und damit verbundener erhöhter Erosion und Materialanfall in Einzugsgebieten. Der zweite Faktor hängt mit einer Verkleinerung der Permafrostregion zusammen, wodurch vermehrt Geschiebe in die Wildbäche und größeren Vorfluter gelangen könnten. Diese Mechanismen werden unter Verwendung der existierenden Literatur in Österreich und der Schweiz beurteilt.

3. Wasserbedarf

Hier werden die Literatur bzw. Studien ausgewertet in Hinblick auf den Wasserbedarf in Österreich. Änderungen des Wasserbedarfs zufolge Bevölkerungsdynamik, Wassernutzungsgewohnheiten, und wirtschaftlichen Strukturveränderungen werden ausgeklammert. Der Fokus ist auf einer Abschätzung der Änderung des Wasserbedarfes zufolge Klimaänderung. Es ist anzunehmen, dass die Lufttemperatur einen starken Einfluss auf den Wasserbedarf besitzt (z. B. Kühlwasser, Landwirtschaft, Beschneigung).

4. Wasserdargebot Grundwasser – Menge

Wie bei anderen Teilgebieten der Wasserwirtschaft werden existierende Untersuchungen zusammengefasst und bewertet in Hinblick auf Trendanalysen und Szenarienanalysen. Die Fakten werden wieder gereiht in Hinblick auf ihre Aussagekraft. Dabei wird insbesondere das Augenmerk der Grundwasserneubildung gewidmet (z. B. Reduktion der Grundwasserneubildung durch erhöhte Verdunstung, oder Erhöhung der Grundwasserneubildung durch erhöhte Winterniederschläge). Die Flurabstände könnten sich im Winter erhöhen. Der Bezug zu Bereich Grundwasserqualität wird gesetzt. Außerdem wird der Zusammenhang mit klimabedingten Änderungen im Wasserbedarf diskutiert.

5. Wasserdargebot Grundwasser – Qualität

Hier liegt der Schwerpunkt auf einer Analyse der Daten und deren Trends. Da die Messnetzdichte nicht der räumlichen Struktur der Grundwasserquantität entspricht, sind weniger harte Fakten in diesem Arbeitspaket zu erwarten. Im Bereich der Grundwassertemperatur sind allerdings wesentlich härtere Aussagen zu erwarten. Es ist zwar anzunehmen, dass sie lokal stark differenziert sind, doch ist im Grundwasser das klimabedingte Lufttemperatursignal meist gut wieder zu erkennen.

6. Wasserdargebot Oberflächenwasser

Die Veränderung des jahreszeitlichen Verlaufes des Abflussgeschehens ist sicherlich eine charakteristische Klimafolge im Bereich der Wasserwirtschaft. Wieder wird hier auf existierende Studien in Österreich zurückgegriffen, die solche Veränderungen sowohl in Hinblick auf die Trends als auch in Hinblick auf Szenarienanalysen auswerten. Die Ergebnisse werden zueinander in Beziehung gesetzt und gewertet. Der Einfluss der Schnee- und der Gletscherschmelze und deren Änderungen können aus bestehenden Studien sehr gut abgeschätzt werden. Dabei werden Bilanzüberlegungen angestellt, um prozentmäßige Änderungen im Vergleich zur Ist-Situation angeben zu können. Wiederum wird der Zusammenhang mit klimabedingten Änderungen im Wasserbedarf bzw. Nutzung diskutiert und entsprechende Bilanzierungen durchgeführt.

7. Niederwasser – Menge

Wie bei dem Abflussregime werden auch für die Niederwassersituation existierende Studien zur Veränderung der Niederwasserverhältnisse ausgewertet. Dabei liegt das Schergewicht auf der jahreszeitlichen Verteilung der Niederwässer und deren Veränderungen. Die Lufttemperatur hat durch Schneeprozesse und Verdunstung einen starken Einfluss auf die Niederwasserverhältnisse, darum sind hier harte Fakten zu erwarten. Auch hier spielen die Gletscher herein, deren Bedeutung aus bestehenden Studien gut aufgezeigt werden kann. Der Bezug zu Nutzungen wie etwa Kühlwasser wird hergestellt.

8. Niederwasser – Qualität

Bei der Niederwasserqualität spielen die Verdünnungsverhältnisse eine wesentliche Rolle, deshalb existiert ein starker Konnex zur Niederwassermenge. Mögliche Änderungen in der Niederwasser-

qualität werden abgeschätzt, wobei jeweils die Zuverlässigkeit solcher Aussagen angegeben wird. Mögliche Änderungen sind chemischer (z. B. Sauerstoffgehalt, Abbauverhalten) und ökologischer (z. B. Gewässertypen) Natur. Ein wesentlicher Zusammenhang besteht mit der Einleitung von gereinigtem Abwasser aus Abwasserreinigungsanlagen. Diese Effekte werden ebenfalls eingeschätzt

9. Wasserkraft

Zum Thema Wasserkraft ist der Ausgangspunkt das Wasserkraftpotenzial in Österreich. Derzeit wird eine von KliEn (Klima- und Energiefonds) finanzierte Studie von den Antragstellern durchgeführt, die die Klimafolgen auf die Wasserkraft in Österreich abschätzt. Die Ergebnisse dieser Studie fließen in das vorliegende Projekt ein. Wegen Änderungen in der Saisonalität des Wasserdargebots ist eine Verschiebung des Wasserkraftpotenzials zwischen Sommer und Winter zu erwarten. Außerdem sind gewisse Änderungen im Strombedarf zu erwarten, insbesondere wegen des erhöhten Strombedarfs von Klimalanlagen im Sommer.

Vorschläge für Anpassungsstrategien in Österreich

Aufbauend auf den zuvor festgestellten Wissensstand werden Vorschläge für mögliche Anpassungsmaßnahmen erarbeitet. Dabei werden die Klimafolgen und mögliche Anpassungsmaßnahmen im Kontext zu den anderen Bereichen, Einflussgrößen und Zielen der Wasserwirtschaft dargestellt. Die Wasserwirtschaft ist ein Sektoren übergreifendes Feld, dies wird in diesem Projekt durch eine entsprechende Perspektive berücksichtigt.

Die Vorschläge werden gereiht nach den Prioritäten die sich ergeben aus:

- der Einschätzung der Fakten von weich bis hart,
- der Effizienz der möglichen Anpassungsmaßnahmen.

Die Vorschläge werden diskutiert gegen den Hintergrund anderer wasserwirtschaftlichen Prioritäten.

Die vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen werden in Bezug gesetzt zu Anpassungsmaßnahmen in Österreichs Nachbarländern. Dabei wird auch eine Einschätzung der Effizienz, Datenbasis bzw. Entscheidungsfindung dieser Maßnahmen versucht.

Anschrift der AutorInnen:

Dr. Wolfgang Schöner
Dr. Ingeborg Auer
Dr. Reinhard Böhm
Mag. Klaus Haslinger
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Abteilung Klimaforschung
Hohe Warte 38, 1190 Wien
E-Mail: wolfgang.schoener@zamg.ac.at

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft

Univ.-Prof. DI Dr. Günter Blöschl
Ass.-Prof. DI Dr. Alfred Paul Blaschke
PD DI Dr. Ralf Merz
Technische Universität Wien
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Karlsplatz 13, 1040 Wien

o.Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. Helmut Kroiß
Ass.-Prof. Mag. Dr. Norbert Kreuzinger
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Karlsplatz 13, 1040 Wien

Mag. Gregori Stanzer
ÖIR – Österreichisches Institut für Raumplanung
Franz-Josefs-Kai 27, 1010 Wien

Fischfauna und Klimaänderung

Andreas Melcher, Florian Pletterbauer und Stefan Schmutz

Abstract

Water temperature is amongst other factors a driver of fish community composition in rivers. Climate change and human pressures can influence temperature regime and cause alterations of the fish fauna. This article describes the possible effects of climate change to fish communities especially on cold water fishes in Austrian rivers and focuses on brown trout (*Salmo trutta fario*) and European grayling (*Thymallus thymallus*). Life stages of these fishes require different habitats and water temperatures. Consequently, anthropogenic alterations and climate change will also affect them.

Climate change will alter abiotic parameters in Austrian rivers. The most obvious alteration will be increased water temperature due to higher air temperatures. Additionally, there will be also a shift of the discharge regimes. Analyses of water temperature time series showed a warming trend over the last 30 years in Austrian rivers.

Coldwater species will suffer first from increasing water temperatures. Several international case studies show lowered densities, biomass and a shift of fish species composition due to the change of water temperature. Cold water species have to move river upstream to find adequate habitats. This migration is often limited by artificial or natural barriers as well as by river dimension.

The knowledge concerning habitat quality requirements and in particular water temperature preferences of fishes should be considered for planning of future restoration and mitigation measures in hydromorphologically impacted rivers under the respect of climate change.

Einleitung

Der Klimawandel ist auch im Bereich der Gewässerökologie eine der zentralen Forschungsfragen der letzten Jahre. Eine Veränderung des Klimas steht in Wissenschaftskreisen nicht mehr zur Diskussion. So ist zum Beispiel zwischen 1976 und 2000 die Lufttemperatur in der nördlichen Hemisphäre durchschnittlich um 0,24 °C pro Jahrzehnt angestiegen (Hari et al. 2006). Ziel zukünftiger Studien wird freilich nicht mehr die Beweisführung der Existenz des Klimawandels, sondern die Abschätzung der Intensität sowie die Entwicklung möglicher Anpassungsstrategien sein.

Fische sind von der räumlichen Struktur ihres Lebensraumes abhängig. Dadurch sind sie gut geeignet, um Auswirkungen des Klimawandels aufzuzeigen. In alpin geprägten Gewässern, den Ober- und Mittelläufen, sind die Bachforelle (*Salmo trutta fario*) und die Äsche (*Thymallus thymallus*) als kaltwasserliebende Fischarten charakteristisch (Forellen- und Äschenregion). Diese Leitfischarten werden in Folge näher betrachtet, da ihre Lebensräume durch die Auswirkungen des Klimawandels besonders stark betroffen sein werden. Dabei sollen unter anderem folgende fischökologischen Fragestellungen diskutiert werden:

- Wie werden sich die Fließgewässer Österreichs aus fischökologischer Sicht durch den Klimawandel verändern?
- In welchem Umfang kann es zu Veränderungen der Artenzusammensetzung kommen?
- Wie können sich Fischpopulationen anpassen?

Bachforelle, Äsche und die Wassertemperatur

Grundsätzlich hängt das Temperaturregime eines Gewässers von vier Faktorengruppen ab: (1) den atmosphärischen Bedingungen, (2) der Topografie, (3) der Hydrologie und (4) der Beschaffenheit des Gewässerbettes (Caissie 2006). Durch das Zusammenspiel dieser Faktoren entsteht eine natürliche Variabilität des Wassertemperaturhaushaltes auf räumlicher und zeitlicher Ebene. In direkter Verbindung mit der Wassertemperatur steht der Sauerstoffgehalt des Wassers. Mit steigender Temperatur nimmt die Sauerstoffsättigung ab. Im Gegensatz dazu steigt allerdings der Bedarf und Verbrauch von Sauerstoff für Wasserlebewesen nach der Van't-Hoffschen-Regel. Diese besagt, dass eine Temperaturerhöhung von 10 °C eine Stoffwechselzunahme um das Zwei- bis Vierfache bedingt (Jungwirth et al. 2003). Eine erhöhte Stoffwechselrate ist mit direkt wirksamen Prozessen, wie schnellerem Wachstum und erhöhter Atemfrequenz, sowie mit indirekten Auswirkungen, wie einer verstärkten Entwicklung von Krankheitserregern und einem veränderten Nahrungsangebot, verbunden (Burkhardt-Holm 2006, Hari et al. 2006).

Die Wassertemperatur prägt Fische in allen Lebensstadien. Fische durchwandern in ihrer Entwicklung einen Zyklus vom Ei zur Larve, von der Larve zum juvenilen, und schließlich vom juvenilen zum adulten Fisch. Als wechselwarme Lebewesen nutzen Fische unterschiedliche, für die Art und das Entwicklungsstadium passende Temperaturbereiche und Habitate, die für eine erfolgreiche Entwicklung von Populationen essentiell sind (Melcher & Schmutz 2010, Scheurer et al. 2009).

Die bevorzugten Habitate der Bachforelle befinden sich in den Oberläufen der Gewässer, die sich über hohe Fließgeschwindigkeiten, Sauerstoffreichtum und kühle Sommertemperaturen auszeichnen. Bachforellen sind Herbstlaicher (Oktober bis Dezember). Neben der Tageslänge wird der Beginn des Laichens v.a. über die Wassertemperatur gesteuert. Die Laichhabitate befinden sich meist flussauf (oft in Zubringern) der Adultfisch-Lebensräume. Ein geeigneter Laichplatz charakterisiert sich über geeignete Schotterstrukturen, passende Wasserqualität und Wassertemperatur (Burkhardt-Holm 2006, Baran et al. 1995). Die Eier werden in einer Laichgrube im Substrat der Gewässersohle vergraben. Das erfolgreiche Brüten der Embryonen ist eng an chemisch-physikalische Wasserparameter (Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert) gebunden (Jungwirth et al. 2003). Außerdem können mechanische Belastungen und Sedimentation an der Gewässersohle, die zu einer schlechteren Durchströmung des Laichplatzes führen, die Entwicklung der Eier beeinflussen (Scheurer et al. 2009). Die Durchströmung des Laichplatzes ist insofern von Bedeutung, weil dadurch eine ausreichende Sauerstoffversorgung und der Abtransport von Stoffwechselprodukten garantiert werden. Das Schlüpfen der Larven erfolgt zwischen März und April. Der Zeitpunkt des Schlüpfens wird ebenfalls über die Wassertemperatur gesteuert. Die Larven verbleiben im Sohlsubstrat bis der Dottersack, eine erste Nahrungsreserve, aufgebraucht ist und mit der Nahrungsaufnahme begonnen wird. Damit setzt auch das Territorialverhalten der Bachforellen ein. Die Größe des Territoriums wird über Strömungsgeschwindigkeit, Lichtintensität, Wassertemperatur und Futtermenge gesteuert. Eine vielseitige Gewässerstruktur sorgt für ausreichend viele Territorien. Mit zunehmender Körpergröße wächst auch der Flächenanspruch, den der Fisch an

sein Territorium stellt. Junge Bachforellen bevorzugen schnell durchströmte, gute strukturierte Habitats, die im Sommer kühl bleiben. Adulte Fische bevorzugen zudem tiefere Stellen (Maki-Petäys et al. 1997).

Wie in *Abb. 1* gezeigt wird, findet die Fortpflanzung der Bachforelle in einem Temperaturbereich von 1 bis 10 °C statt. Die Eientwicklung erfolgt zwischen 1 und 13 °C. Mortalitätsraten nehmen allerdings zu, wenn die Temperatur 7 °C unterschreitet und 12 °C überschreitet (Küttel et al. 2002). Ab 15 °C sterben alle Eier ab. Juvenile Bachforellen bevorzugen einen Temperaturbereich von 8-13 °C. Die adulte Bachforelle zeigt ein optimales Wachstum in einem Bereich von 4 bis 19 °C. Ober- und unterhalb dieses Spektrums gelegene Temperaturen verursachen beim Fisch Stress. Dieser äußert sich in einer geringeren Wachstumsrate sowie einer reduzierten Nahrungsaufnahme und kann bis zum Tod führen (Burkhardt-Holm 2009).

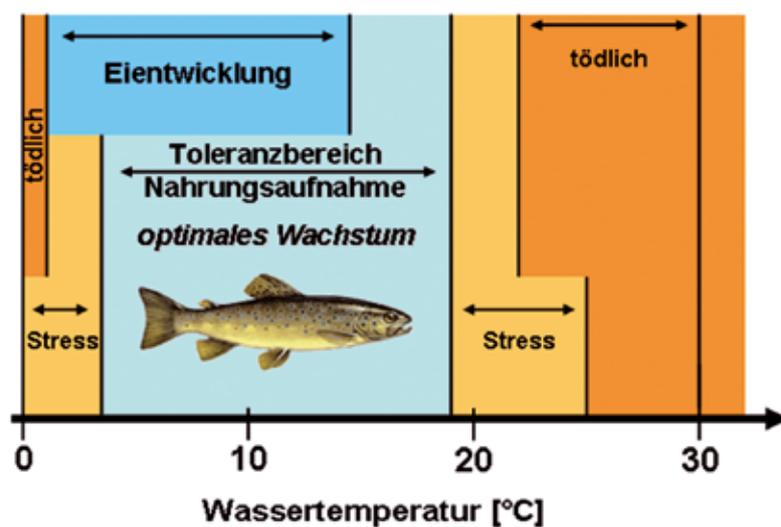


Abb. 1: Temperaturansprüche der Bachforelle (verändert nach Elliot 1981).

Im Längsverlauf der Fließgewässer schließt der Lebensraum der Äsche an jenem der Bachforelle an. Sie bevorzugt ebenso schnellfließende, sauerstoffreiche, kühle Gewässer. Mit zunehmendem Alter benötigt die Äsche tieferes und stärker strömendes Wasser, das sie in größeren Fließgewässern findet. Die Vorzugstemperaturen für Adulte liegen zwischen 4 und 18 °C. Äschen laichen im Frühjahr zwischen März und Mai. Das Ablachen findet bei Wassertemperaturen zwischen 6 und 10 °C statt. Die optimale Temperatur für die Eientwicklung liegt zwischen 6 und 14 °C. Bei Wassertemperaturen über 14 °C sterben die Eier ab (Küttel et al. 2002, Elliot 1981). Adulte Individuen verfügen über einen optimalen Temperaturbereich von 4 bis 18 °C. Steigt die Wassertemperatur über 25 °C, ist mit letalen Auswirkungen zu rechnen.

Klimawandel in Österreich

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Österreich werden einerseits eine Veränderung des Niederschlagsregimes und andererseits ein Anstieg der Lufttemperatur sein, welcher im Alpenraum stärker ausgeprägt sein wird (Nachtnebel et al. 2001, Formayer et al. 2004). Beide Faktoren bedingen, dass sich die Schneedecke in den Alpen nicht mehr so stark ausprägen kann und auch früher abschmilzt (Jasper et al. 2004, Horton et al. 2004).

Diese Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse führen zu einer Vergleichmäßigung des Abflussregimes. Verstärkte Abflüsse im Winter durch mehr Regen statt Schnee, sowie rückläufige Abflussraten in Frühjahr, Sommer und Herbst ergänzen diesen Trend (Nachtnebel et al. 2001). Der geringere Niederschlag im Sommerhalbjahr führt zu früheren Niederwassersituationen im Herbst. Bei gleichzeitig höheren Lufttemperaturen kommt es somit zu einer Erhöhung der Wassertemperatur.

Nationale und internationale Studien belegen eine Zunahme der Wassertemperatur innerhalb der letzten 30 Jahre (Prinz et al. 2009, Matulla et al. 2007, Hari et al. 2006, Schmutz et al. 2004, Fischnetz 2004, Hari et al. 2006). Im Zuge der Studie „Wärmelastplan Traun Ager“ im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung (Melcher et al. 2009) wurden unter anderem auch die Temperaturverläufe für verschiedene Fischregionen in ausgewählten Flüssen in Österreich untersucht. *Abb. 2* zeigt die Analyse einer 30-jährigen Zeitreihe von Wassertemperaturen, sowohl an Ober- als auch an Unterläufen für unterschiedliche Fischregionen. Die Jahressummengrade der Wassertemperatur nehmen tendenziell in allen Regionen zu – speziell in Flussabschnitten, die von einem oberhalb liegenden See beeinflusst werden. Dieser Trend spiegelt sich vor allem auch in den mittleren Sommertemperaturen wider. Auch hier zeigt sich ein steigender Trend mit einer durchschnittlichen Zunahme um 2,5°C von 1976 bis 2005. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass es zu einer weiteren Erwärmung der Gewässer in Österreich kommen wird. An einigen Flüssen ist ein umgekehrter Trend zu erkennen. Gletscherschmelzwasser und Tiefenwasser aus Speicherseen senken die Wassertemperatur in den unterliegenden Gewässern und entkoppeln diese von regionalen Klimaeinflüssen (Scheurer et al. 2009).

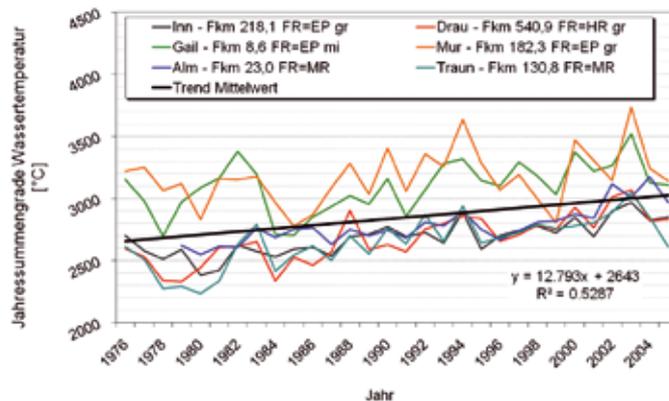


Abb. 2: Jahressummengrade der Wassertemperatur für den Zeitraum 1976-2005 an ausgewählten Flüssen Österreichs (aus Melcher et al. 2009); FR=Fischregion, MR = Metarhithral, HR gr = Hyporhithral groß, EP mi = Epipotamal mittel, EP gr = Epipotamal groß.

Klimawandel und Auswirkungen auf Fischbestände

Wie oben beschrieben wird nach Stand des Wissens der Klimawandel zu einer Veränderung der abiotischen Kenngrößen an Gewässern führen (Melcher et al. 2009, Hari et al. 2006; Mohseni & Stefan 1999,). Eine Veränderung dieser Parameter wie der Temperatur wirkt sich unmittelbar auf Fische aus. Zwar können sie bei kurzzeitigen Erhöhungen der Wassertemperatur in kühlere, oft flussauf gelegene, Habitate ausweichen und sich dabei in tiefere Stellen oder in Bereiche mit Grundwasserzuström zurückziehen, doch setzt dies eine intakte laterale und longitudinale Vernet-

zung der Fließgewässer voraus. Bei einer anhaltenden Erwärmung ist daher davon auszugehen, dass sich kälteliebende Fischarten wie die Bachforelle und Äsche verstärkt in die Oberläufe der Flüsse zurückziehen (Scheurer et al. 2009, Matulla et al. 2007, Hari et al. 2006, Schmutz et al. 2004).

Fische werden in ihrer längszonalen Verteilung jedoch nicht nur durch den Faktor Wassertemperatur gesteuert. Die Äsche bevorzugt z. B. Gewässer größerer Dimension. Ihrem temperaturbedingten flussaufgerichteten Ausweichen sind daher Grenzen gesetzt. Des Weiteren wird die Verlagerung der Fischpopulation durch Verbauungen oder natürliche Barrieren in der Praxis erheblich behindert (Matulla et al. 2007, Meili et al. 2004). Somit bedeutet die Verschiebung der geeigneten Habitate eine Lebensraumreduktion für forellenartige Fische. Letztendlich würde dies zu einer geringeren Ausdehnung der Bachforellen- und Äschenregion führen. In diesem Zusammenhang ist der Einfluss der Wassertemperatur vor allem in anthropogen beeinträchtigten Gewässern (Querbauwerke, Stau, Schwall, Ausleitungen) hervorzuheben, bei denen die natürliche Hydrologie gestört ist (Wolter 2007, Schmutz et al. 2004).

Aufgrund des veränderten Abflussgeschehens und der höheren Lufttemperaturen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass in den Sommer- und Herbstmonaten die Wassertemperaturen zunehmen und kritische Werte für Fische überschreiten (Melcher et al. 2009, Hari et al. 2006). Besteht keine Vernetzung zu anderen, kühleren Habitaten, bleiben die Fische dem Temperaturstress über einen längeren Zeitraum ausgesetzt. Insofern ist auch die zeitliche Variabilität der Wassertemperatur ein prägender Faktor für Fischpopulationen.

Wie eingangs erklärt, wird die Reproduktion durch eine höhere Wassertemperatur ebenso negativ beeinflusst. Meist weist vor allem das Eistadium, im Vergleich zu den Adultstadien, einen engeren Temperaturtoleranzbereich auf. Die Toleranzbereiche für die Wassertemperatur unterscheiden sich zudem zwischen den verschiedenen Fischarten beträchtlich.

Überleben die Eier, führen wärmere Gewässer zu einem verfrühten Schlüpfen von Larven. Über die parallele Entwicklung des geeigneten Futterangebotes für die Larven gibt es keine ausreichenden Untersuchungen. Es ist davon auszugehen, dass diese ebenfalls temperaturgesteuert stattfindet, da die Larven nach dem Aufbrauchen des Dottersackes Futter vorfinden müssen (Burkhardt-Holm 2009).

Ein früheres Schlüpfen der Larven setzt diese jedoch weiteren Risiken aus. Kommt es durch den Klimawandel zu vermehrten Hochwässern im Winter und Frühjahr, so betrifft dies die ersten Entwicklungsstadien (Ei und Larve) besonders. Diese sind sehr sensibel gegenüber Hochwassersituationen. Bei starken Abflussereignissen kann die Gewässersohle aufreißen und dies die Laichgruben zerstören, was ein Absterben der Eier zur Folge hat (Burkhardt-Holm 2009). Die geschlüpften Bachforellenbrütlinge verfügen über eine eingeschränkte Schwimmfähigkeit und ein wenig ausgeprägtes Fluchtvermögen. In Verbindung mit einem geringen Angebot von Rückzugsmöglichkeiten in anthropogen beeinflussten Gewässern stellt ein Hochwasser eine akute Gefährdung dar.

Mit der Zunahme des Abflusses im Frühjahr sind die empfindlichen Lebensstadien einer größeren Fracht an Schwebstoffen ausgesetzt. Höhere Schwebstoffkonzentrationen beeinflussen Fische direkt durch Verletzungen und Verstopfungen an den Kiemen. Bei geringeren Schwebstoff-

konzentrationen können auch Stresssymptome wie ein veränderter Blutchemismus oder höhere Aggressivität auftreten (Scheurer et al. 2009). Intensive Landwirtschaft in gewässernahen Bereichen begünstigt zusätzlich das Einschwemmen von Feinsedimenten, die bei erhöhten Abflüssen als Schwebstoffe transportiert werden. Mit Aufforstungen und Fruchtfolgenmanagement im Ackerbau kann diesem Effekt gegengesteuert werden.

Ein weiterer Einflussfaktor, der mit höheren Wassertemperaturen in Hand geht, ist das verstärkte Auftreten der Krankheit „Proliferative Nierenkrankheit“ („proliferative kidney disease“, PKD). Zum Ausbruch der Krankheit kommt es, wenn die mittlere Tagestemperatur des Wassers für einen Zeitraum von zwei bis vier Wochen über 15 °C liegt (Meili et al. 2004). Der Krankheitsverlauf weist eine hohe Mortalitätsrate auf, insbesondere bei Jungfischen. Ist der Gesundheitszustand des Fisches aufgrund anderer Stresseinwirkungen (Wassertemperatur, Schwebstoffe, Wasserqualität) beeinträchtigt, verstärken sich die Auswirkungen der Krankheit. Gesundheitsveränderungen ohne spezifischen Krankheitserreger, wie sie durch Stressoren verursacht werden, sind schwierig zu bewerten. Zudem können Umweltfaktoren die Auswirkungen eines Krankheitserregers positiv oder negativ beeinflussen.

Zukünftige Entwicklung des Fischvorkommens

Unter Berücksichtigung der möglichen Veränderungen des Lebensraumes Fließgewässer, rückt das Interesse für das zukünftige Vorkommen einzelner Arten sowie die Veränderung der Artenzusammensetzung in den Vordergrund. Das natürliche Vorkommen heimischer Fischarten kann mittels einer Reihe abiotischer Kenngrößen, wie Gewässertyp, Gewässerdimension, Gefälle, Seehöhe und Wassertemperatur, erklärt werden. Gerade Letztere prägt, wie bereits erwähnt, den Lebenszyklus der wechselwarmen Fische. Melcher et al. (2009) zeigten, dass die mittlere sommerliche Wassertemperatur anhand der Kenngrößen Seehöhe, Lufttemperatur, monatlicher Durchfluss, und Entfernung zur Quelle mittels Regressionsanalyse vorhergesagt werden kann. Die Berechnung der Wassertemperatur für jeden beliebigen, möglichst unbelasteten Gewässerabschnitt, an denen auch Befischungsdaten und somit Informationen zum Fischbestand vorlagen, war somit möglich. Die prognostizierte Wassertemperatur zeigte einen hohen Zusammenhang mit den jeweils vorkommenden Fischzönosen. Eine Beziehung zwischen Fließgewässertypen, ausgedrückt über die vorherrschende Fischregion, und Wassertemperatur konnte hergestellt werden. Eine Fischregion charakterisiert sich über ein bestimmtes Artenspektrum, das sich unter natürlichen Bedingungen entsprechend einer bestimmten Längszonierung einstellt. Der Oberlauf des Gewässers stellt, wie bereits erwähnt, die Forellenregion dar, die sich in einen oberen und unteren Teil (Epi- & Metarhithral) gliedert. Daran schließt die Äschenregion (Hyporhithral, unterer Teil des Oberlaufes) an. Der Unterlauf gliedert sich in Barbenregion (Epipotamal) und Brachsenregion (Metapotamal).

Jede Fischart findet in einem bestimmten Abschnitt des Fließgewässers ihren Lebensraum bzw. weist klare Präferenzen für bestimmte Abschnitte auf. Dementsprechend kann über die Fischzönose der Fischregionsindex (FRI) berechnet werden. Der FRI selbst steht wiederum mit einer Reihe von gewässerspezifischen Faktoren in Zusammenhang. So zeigt sich eine lineare Zunahme des FRI mit abnehmender Seehöhe, zunehmender Entfernung von der Quelle, zunehmender Lufttemperatur und letztlich zunehmender Wassertemperatur (Melcher et al. 2009, Mattula et al. 2007, Schmutz et al. 2004).

Wie in *Abb. 3* gezeigt wird, war es möglich, für jede Fischregion eindeutige Temperaturbereiche für die Sommermonate festzulegen. Für die Forellenregion ergab die Berechnung für den Monat August eine durchschnittliche Wassertemperatur von 12,8 °C. In der Äschenregion liegt diese bei 13,5 °C und in der Barbenregion bei 16,8 °C. Die Brachsenregion erreicht im August durchschnittlich 18,8 °C.

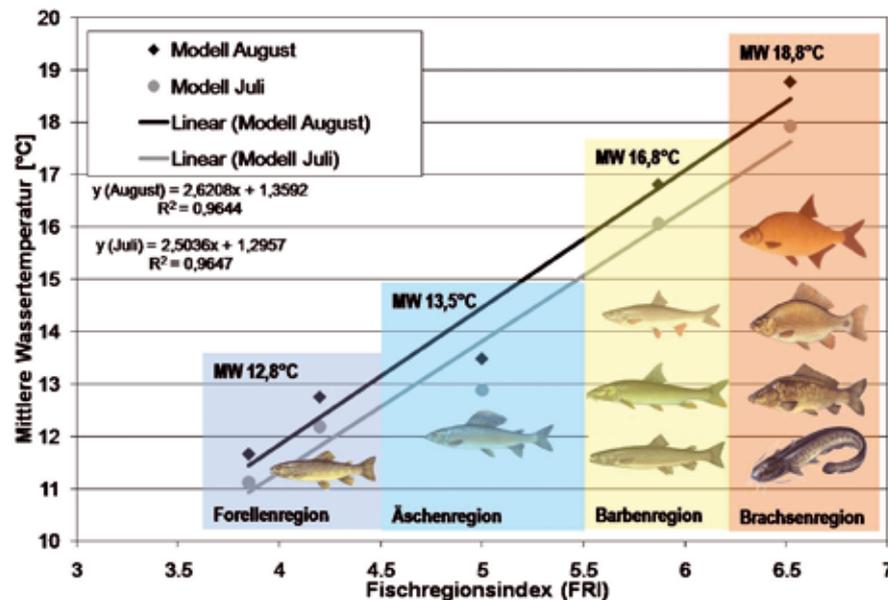


Abb. 3: Zusammenhang Fischregionsindex und mittlere Wassertemperatur (aus Melcher et al. 2009).

Die Anpassung der Fischfauna an prognostizierte Klimaentwicklungen und den damit verbundenen, höheren Wassertemperaturen kann zu einer längszonalen Verschiebung der Fischregionen führen. Dies äußert sich in einer Änderung der Artenzusammensetzung. Der verfügbare Lebensraum für forellenartige Fische geht zurück. Am unteren Ende des Verbreitungsspektrums werden die Wassertemperaturen für Forellenartige zu hoch (Schmutz et al. 2004).

Bei der Betrachtung großer räumlicher Ebenen (Einzugsgebiete) ist eine Verschiebung der Artenzusammensetzung bereits zu beobachten (Melcher et al. 2009). In *Abb. 4* wird der prozentuale Anteil der häufigsten Fischarten an der Traun unterhalb des Traunsees bis Lambach dargestellt. Die Entwicklung der letzten 30 Jahre zeigte, dass das Vorkommen der Kälte liebenden Äsche (*Thymallus thymallus*) stark zurückging und im Gegensatz dazu der Wärme liebende Aitel (*Squalis cephalus*) stark zugenommen hat.

Aktuelle Studien aus Frankreich belegen (Buissonet al. 2009, Daufresne & Boël 2007), dass die Veränderung der Artenzusammensetzung zunächst zu einer größeren Artendiversität führt, weil es zu einer Koexistenz der „alten“ und „neuen“ Zönose kommt. Dieser Prozess passiert zunächst kontinuierlich. Durch ein Extremereignis, wie einer extremen Hitzeperiode, in Verbindung mit einer fehlenden Konnektivität der Habitate kann es zur plötzlichen Verschiebung hin zur „neuen“ Zönose kommen. Veränderungen der Artenzusammensetzung in den Mittel- und Unterläufen der Gewässer fallen geringer aus, weil in diesen Bereichen bereits temperaturtolerante Arten vorkommen. Begünstigt werden generell karpfenartige Fische sowie kleinwüchsige Fischarten (Daufresne et al. 2009). Barbe (*Barbus barbus*) und Aitel (*Leuciscus squalis*) kommen mit höheren Wassertem-

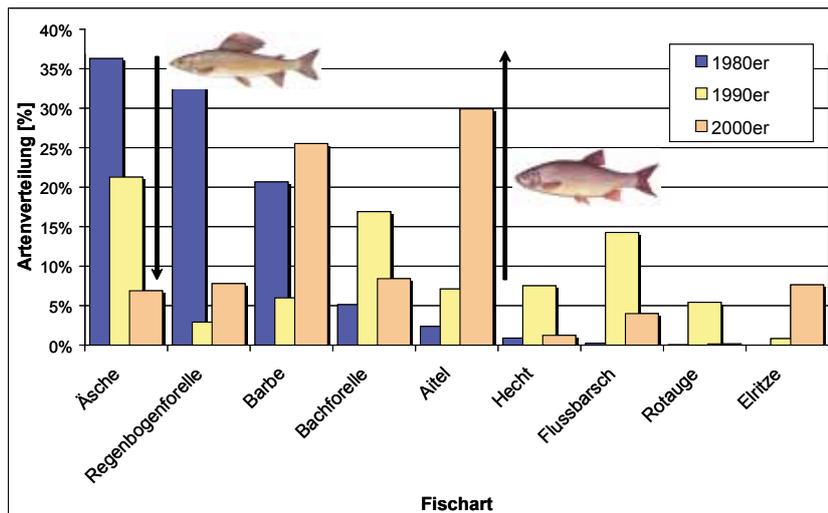


Abb. 4: Veränderung der Artenvergesellschaftung von 1980 bis 2010 an der Traun unterhalb des Traunsees anhand der häufigsten Fischarten.

peraturen wesentlich besser zurecht als forellenartige Fische. Mit zunehmender Wassertemperatur finden sie mehr geeignete Habitate vor (Melcher et al. 2009).

Die langfristige Entwicklung der Artenzusammensetzung deutet auf eine Homogenisierung der Zönosen in Gewässern hin. Darunter ist zu verstehen, dass sich die Fischpopulationen in den unterschiedlichen Gewässerabschnitten in ihrer Artenzusammensetzung stärker ähneln werden. (Buisson et al. 2009). Da die Veränderung auch auf großen räumlichen Einheiten, wie Einzugsgebieten, zu beobachten ist, kann von einem gemeinsamen Störfaktor, wie ihn der Klimawandel darstellt, ausgegangen werden. Demnach darf der Einfluss nichtklimatischer, anthropogener Störfaktoren ausgeschlossen werden (Buisson et al. 2009, Daufresne & Boël 2007).

Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt sind Fische in vielfältiger Weise vom Klimawandel betroffen. Arten, wie z.B. die Äsche, sind derzeit infolge menschlicher Eingriffe an Flüssen in ihrem Bestand schon so stark gefährdet (Spindler 1997), dass klimabedingte Beeinträchtigungen sie an den Rand des Aussterbens bringen könnten. Die Wassertemperatur beeinflusst bei Fischen, als wechselwarme Lebewesen, unter anderem physiologische Prozesse und die Habitatselektion. Fische weisen zudem eine starke Präferenz für thermische Nischen auf. Kaltwasser liebende Arten sehen sich angesichts steigender Wassertemperaturen mit einer Degradierung ihres Lebensraumes konfrontiert. Die Folgen einer Wassertemperaturerhöhung für die Fischfauna schlagen sich in einer prognostizierbaren Verschiebung der Artenzusammensetzung nieder. Dies bedeutet für die einzelnen Gewässerabschnitte eine Abnahme kälteliebender (v.a. Salmoniden) und eine Zunahme wärmeliebender Arten (v. a. Cypriniden). Studien über die Auswirkung der Klimaerwärmung an österreichischen und anderen europäischen Flüssen zeigen eine signifikante Veränderung der Fischartenzusammensetzung in Richtung wärmeliebender Fischarten. So haben etwa die Barbe und das Aitel eine klare Affinität zu warmen Wasser. Veränderungen können bedeuten, dass die Äschenregion sich zukünftig in eine Barbenregion umwandelt. Damit würde die dominierende Äsche von anderen Arten abgelöst werden.

Für zukünftige fischökologische Fragestellungen, sei es in der Forschung oder im Management, müssen verstärkt Temperatureinflüsse berücksichtigt werden. Das gilt vor allem für stark anthropogen beeinträchtigte Gewässer, da es durch die zusätzlich veränderten Temperaturverhältnisse zu Mehrfachbelastungen für die Fischfauna kommt. Weiterführende Studien, in denen verschiedene Anpassungsstrategien (wie z.B. Einfluss von Beschattung oder Adaption des Fischereimanagements) zu analysieren und zu prüfen wären, sollten in Angriff genommen werden.

Literatur

- Buisson L., Grenouillet G. (2009) Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient, *Diversity and Distributions*, 15(4), pp 613-626
- Daufresne M., Lengfellner K., Sommer U. (2009) Global warming benefits the small in aquatic ecosystems, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(31), pp 12788-93
- Daufresne M., Boët P. (2007) Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers, *Global Change Biology*, 13(12), pp 2467-2478
- Elliott, J.M. (1981) Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts; In *Stress and fish* (ed. A.D. Pickering), pp 209-45, Academic press, London
- Formayer H., Haas P., Matulla C., Seibert P. (2004) StartClim2004.B Untersuchung regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitz- und Trockenperioden in Österreich, Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien
- Horton P., Schaepli B., Mezghani A., Hingray B., Musy A. (2006) Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty, *Hydrological Processes*, 20(10), pp 2091-2109
- Jasper K., Calanca P., Gyalistras D., Fuhrer J. (2004) Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research*, 26, pp 113-129
- Jungwirth M., Haidvogel G., Moog O., Muhar S., Schmutz S. (2003) *Angewandte Fischökologie an Fließgewässern*, Facultas Universitätsverlag, Wien
- Küttel, S., Peter, A., & Wüest, A. (2002) Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer, Rhône Revitalisierung, Publikation 1
- Maki-Petäys A., Muotka T., Huusko A., Tikkanen P., Kreivi P. (1997) Seasonal changes in habitat use and preference by juvenile brown trout *Salmo trutta* in a northern boreal river, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Nr. 54(3), pp 520-530
- Melcher A. & Schmutz S. (2010) The importance of structural features for spawning habitat of nase *Cochonostoma nasus* (L.) and barbel *Barbus barbus* (L.) in a pre-Alpine river. *River Syst.* Vol. 19/1, Stuttgart, in print.
- Matulla C., Schmutz S., Melcher A., Gerersdorfer T., Haas P. (2007) Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River, *International journal of biometeorology*, 52(2), pp 127-37
- Melcher A., Huber J., Pletterbauer F., Walder C., Schmutz S. (2009) Wärmelastplan Traun- und Ager system. Bewertung des fischökologischen Zustands der Traun und Ager unter besonderer Berücksichtigung thermischer Belastungen, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Linz
- Meili M., Scheurer K., Schipper O., Holm P. (2004) Dem Fischrückgang auf der Spur - Schlussbericht des Projektes Netzwerk Fischrückgang Schweiz - „Fischnetz“, Basel
- Mohseni O., Stefan H. G. (1999) Stream temperature / air temperature relationship: a physical interpretation, *Journal of Hydrology*, 218, pp 128-141
- Nachtnebel H. P., Fuchs M., (2001) Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluß von Szenarien einer möglichen Klimaänderung (Hydklima) - Zusammenfassung und Schlussfolgerungen, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Ingenieurbau, Wien

- Peter A (1998) Interruption of the river continuum by barriers and the consequences for migratory fish, In: Jungwirth M, Schmutz S, Weiss S (eds) Fish migration and fish bypasses, Fishing News Books, Oxford, pp 99 –112
- Prinz H., Lahnsteiner F., Haunschmid R., Jagsch A., Sasano B., Schay G. (2009) Reaktion ausgewählter Fischarten auf verschiedene Wassertemperaturen in OÖ Fließgewässern, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Gewässerökologie, Fischereibiologie und Seenkunde, Scharfling, Im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung
- Schmutz S., Melcher A., Matulla C., Gerersdorfer T., Haas P., Formayer H. (2004) Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer (GZ 54 3895/163-V/4/03), Studie im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Abteilung V/4, Immissions- und Klimaschutz, Wien
- Schmutz S., Melcher A., Muhar S., Zitek A., Poppe M., Trautwein C., Jungwirth M. (2007) MIRR-Model-based instrument for River Restoration - Entwicklung eines strategischen Instruments zur integrativen Bewertung ökologischer Restaurationsmaßnahmen an Fließgewässern, Studie im Auftrag von Lebensministerium und Land Niederösterreich, Wien
- Spindler, T. (1997) Fischfauna in Österreich Ökologie - Gefährdung - Bioindikation- Fischerei – Gesetzgebung, Umweltbundesamt, Wien
- Wolter, C. (2007) Temperature influence on the fish assemblage structure in a large lowland river, the lower Oder River, Germany, Ecology of Freshwater Fish, 16(4), pp 493-503

Anschrift der Autoren:

DI Dr. Andreas Melcher
DI Florian Pletterbauer
Univ.-Prof. DI Dr. Stefan Schmutz
Universität für Bodenkultur Wien
Department Wasser, Atmosphäre, Umwelt (WAU)
IHG – Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement
Max-Emanuel-Straße 17, 1190 Wien
E-Mail: andreas.melcher@boku.ac.at

Ein neues Risikotransfersystem für Naturgefahren in Österreich? Zur Beurteilung des vom Versicherungsverband vorgeschlagenen NatKat-Modells.¹

Franz Prettenthaler

Schäden aus Hochwasserereignissen und anderen Naturkatastrophen wie Lawinen, Vermurungen oder Erdbeben wird man trotz umfangreicher Präventionsmaßnahmen auch in Zukunft nicht verhindern können. Vielmehr muss bei einem Anhalten der gegenwärtigen Trends mit einem weiteren Anstieg extremer Überschwemmungsereignisse und der damit verbundenen Schadenszahlen gerechnet werden. Vor diesem Hintergrund wird die Frage, wie sich potenziell Geschädigte gegen das finanzielle Risiko wirkungsvoll absichern können, immer bedeutender. In Österreich und anderen Ländern wird nach wie vor nur ein relativ kleiner Teil der entstehenden Schäden durch die Versicherungswirtschaft gedeckt. Große Teile der finanziellen Last müssen von den Betroffenen selbst getragen werden. Insbesondere das Risiko Hochwasser weist sowohl angebots- als auch nachfrageseitige Besonderheiten auf, die zu diesem zumindest teilweisen Marktversagen beitragen.

In Österreich werden Schäden aus extremen Wetterereignissen und Naturkatastrophen einerseits durch den privaten Versicherungsmarkt und andererseits durch ein staatliches Instrument – den Österreichischen Katastrophenfonds – abgedeckt. Der Abschluss einer Elementarschadenversicherung erfolgt sowohl seitens der Versicherungsunternehmen als auch seitens der Versicherungsnehmer grundsätzlich auf freiwilliger Basis. Versicherungsschutz für Gebäude und Inventar ist dabei grundsätzlich für alle Gebiete erhältlich, in (hochwasser-)gefährdeten Regionen allerdings nur in begrenztem Umfang. Der Österreichische Katastrophenfonds zählt sowohl die Beseitigung von Schäden im Vermögen der Gebietskörperschaften, die in der Regel keinen Versicherungsschutz erwerben, als auch die Deckung außergewöhnlicher Erfordernisse, die einem Land durch finanzielle Hilfe zur Beseitigung von Schäden im Vermögen von Privathaushalten und Betrieben entstehen, zu seinen Aufgaben. Dem Katastrophenfonds kommt demnach, auch auf Grund der relativ geringen Versicherungsdichte und der begrenzten Deckung, bei der Kompensation von Schäden nach Naturkatastrophen eine wichtige Rolle zu.

Vor allem nach den Hochwasserkatastrophen der Jahre 2002, aber auch 2005, bei denen Betroffene große Teile der finanziellen Last selbst zu tragen hatten, wurden jedoch Mängel des derzeitigen Systems sichtbar. Die Notwendigkeit einer Risikopartnerschaft zwischen Versicherungswirtschaft, Staat und Privaten, einer angepassteren Flächennutzung sowie einer Steigerung des Gefahrenbewusstseins der Bevölkerung zählen zu den Lehren, die aus der Hochwasserkatastrophe des Jahres 2002 gezogen wurden.

¹ Ich bedanke mich bei meinem Kollegen Hansjörg Albrecher, Universität Lausanne, sowie allen weiteren Co-Autoren des Bandes Prettenthaler, Albrecher (Hg.), 2009, auf dem die hiesigen zusammenfassenden Ausführungen beruhen.

1 Ist der Status quo verbesserungsbedürftig?

Derzeitiges Modell – Mängel und Herausforderungen

- Folgende Mängel können im derzeit bestehenden dualen System in Österreich beobachtet werden:
 - Zu geringes Risikokollektiv, geringe Verbreitung von Hochwasserversicherung.
 - Geringe Deckungshöhen vor allem in gefährdeten Gebieten.
 - Hochrisikogebiete nicht versicherbar.
 - Auch Deckung aus dem Katastrophenfonds ist mit hoher Selbstbeteiligung verbunden.
 - Zum Teil mangelndes Gefahrenbewusstsein, mangelnde Informationspolitik.
 - Interaktion von staatlichem und privatem System nicht optimal.
 - Mit den staatlichen Kompensationsmaßnahmen sind diverse Nachteile verbunden, wie
 - Keine verhaltenssteuernde Wirkung durch ex post Charakter.
 - Teilweiser Nachfrageentzug für den privaten Versicherungsmarkt.
 - U. U. wird das Problem der adversen Selektion verstärkt.
 - Großereignisse sind mit Risiken für den Staatshaushalt verbunden.
 - Risikotransfersystem schafft wenig Anreize zu individuellen und kollektiven Präventionsmaßnahmen bzw. risikominimierendem Verhalten.
- Folgende Herausforderungen hat ein reformiertes System zu bewältigen:
 - Optimal abgestimmte Risikopartnerschaft zwischen Versicherern, Staat (inkl. Bundesländern) und BürgerInnen.
 - Schaffung eines ausreichend großen Risikokollektivs, um einen effektiven Risikoausgleich zu ermöglichen.
 - Kontrolle der adversen Selektion und des moralischen Risikos.
 - Umgang mit Objekten mit sehr hoher Schadenfrequenz (beispielsweise mehr als eine Überschwemmung in zehn Jahren).
 - Kontrolle des Kumulrisikos durch korrelierte Risiken, Vorkehrungen/Absicherung für den Fall von Großschadenereignissen.
 - Schaffung eines sozial verträglichen Prämienniveaus bei 100-%-Deckung (abgesehen von Selbstbehalten).
 - Erwünschtes/vertretbares Maß an Quersubventionierung.
 - Schaffung von Anreizen in Richtung kollektiver und individueller Risikovermeidung.
 - Planungssicherheit in Hinblick auf die finanzielle Beteiligung seitens der öffentlichen Hand.
 - Schaffung des rechtlichen Rahmens bei Lösungen mit obligatorischen Elementen.
 - Akzeptanz des neuen Systems.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass das in Österreich bestehende duale System derzeit nur beschränkt in der Lage ist, die gegebenen Herausforderungen in Hinblick auf die finanzielle Absicherung von potenziell Geschädigten gegenüber Schäden aus Naturgefahren, insbesondere Hochwasser, adäquat zu bewältigen. Sowohl angebots- als auch nachfrageseitig kann teilweises Marktversagen diagnostiziert werden, was sich v. a. in der relativ geringen Verbreitung und den geringen Deckungshöhen widerspiegelt.

2 Welche Verbesserungen/Verschlechterungen würde das NatKat-Modell bringen?

Die, zumindest der medial vermittelten Wahrnehmung nach immer häufiger und folgenschwerer werdenden Naturkatastrophen in Österreich haben bei der Wiedererrichtung von katastrophengeschädigten Sachwerten zu finanziellen Engpässen geführt und Experten der Verbandes der Versicherungsunternehmen Österreichs (VVO) dazu veranlasst, ein neues Risikotransfersystem zu konzipieren. In Hinblick auf die Folgen der Überschwemmungen im Jahr 2002 wurden Schadenskompensationen großteils aus öffentlichen Mitteln (Katastrophenfonds, Länderzahlungen und Spenden) finanziert, wobei der Versicherungssektor anteilig mehr beigetragen hat als jede einzelne öffentliche Bezugsquelle per se. Die Entschädigungszahlungen zur Schadensbehebung reichten jedoch bei weitem nicht aus: Die Versicherungsdichte war gering und eine hohe Anzahl der Versicherungsnehmer war unterversichert, insbesondere aufgrund der ungenügenden Möglichkeiten des Abschlusses von Versicherungen gegen Risiken aus Naturkatastrophen durch Eigentümer von Immobilien in Risikogebieten. Weiters war der Anreiz, im derzeitigen Risikotransfersystem eine private Versicherung gegen Naturgefahren abzuschließen, aufgrund der finanziellen Benachteiligung von Versicherungsnehmern hinsichtlich öffentlicher Schadenskompensationen gering.

Faktisch handelt es sich derzeit um eine Quasi-Pflichtversicherung über das Steuersystem mit der Folge von finanziellen Engpässen und Ineffizienzen sowie mangelnder (auch nachfrageinduzierter) Anreize für die private Versicherungswirtschaft, überhaupt Versicherungsschutz gegen Schäden durch Naturkatastrophen anzubieten. Daher sollte eine (partielle) Verschiebung der Risikotragung vom Staat zum privaten Sektor bei Einführung des neuen Versicherungsmodells (NatKat-Modell) insbesondere für den Einzelnen finanziell lediglich eine strukturelle Veränderung darstellen.

Modell „NatKat“ – die wichtigsten Systemmerkmale auf einen Blick

- Obligatorische Deckungserweiterung der (privatwirtschaftlichen) Feuer- bzw. Haushaltsversicherung.
- Risikobündelung folgender Gefahren:
 - Überschwemmung, Hochwasser, Vermurung, Lawinen, Erdbeben (ausgenommen sind: Schneedruck, Sturm, Hagel, Felssturz, Steinschlag).
- Größere kapazitätsgerechte Gefahrengemeinschaft:
 - Versicherungsnehmer.
 - Erstrisikoversicherer (haften bis zur Systemobergrenze).
 - Rückversicherer.
 - NatKat-Pool (eigens zu gründender Verein auf Gegenseitigkeit).
 - Staat als Letztversicherer (durch den Katastrophenfonds nach KatFG 1996).
- Schaffung eines gesetzlichen Rahmens.
 - Haftung durch den Katastrophenfonds geknüpft an privatwirtschaftlichen Vertrag.
 - Wiederaufbauhilfe, Bauverbote sind vorgesehen.
 - Sozial optimale Tarifierung wird angestrebt.
- Möglichkeit der Quantifizierung und Identifizierung von Risiken mittels der Hochwasserisozonierung Austria (HORA) bzw. basierend auf digitalen Gefahrenzonenplänen.
- Versicherung zu 100 % des Neuwerts.
 - VS = € 1.38 Billionen (Gebäude und Inhalt).

- Prämienkalkulation risikodifferenziert nach Zonen:
 - 4 Hochwasserrisikozonen nach HORA.
 - 5 Erdbebenzonen.
- Systemobergrenze (Jahresschadenbedarf): € 3 Mrd.
 - € 300 Millionen im Eigenbehalt finanzierbar (Selbstbehalte: rund 60 Mio. €).
 - Δ € 2.7 Mrd. durch Rückversicherungsmarkt abgedeckt.
- Umverteilende Prämien
 - Reine \emptyset -Risikoprämie für beide Gefahren von 0,25 ‰ (brutto 0,33 ‰).
 - Der Einheitsprämiensatz für Hochwasser & Erdbeben von 0,15 ‰ bzw. 0,10 ‰ wird mittels Gewichtungsfaktoren verteilt.
 - Das Risiko in der risikoreichsten Zone wird relativ günstiger versichert.
 - Selbstbehalt bis zu 2 % der Versicherungssumme (nach oben limitiert & risikodifferenziert).

Positive Aspekte des NatKat-Modells

- Die wichtigste positive Veränderung bei Einführung des NatKat-Modells bestünde sicher in der Tatsache, dass ein bisher als unversicherbar geltendes Risiko versicherbar gemacht wird und stabile und berechenbare Verhältnisse für alle Beteiligten bei der Kompensation von Hochwasserschäden erreicht werden.
- Als grundsätzliche positive strukturelle Änderung ist das zunehmende Engagement des privatwirtschaftlichen Bereiches insgesamt zu erwähnen, wodurch ein Teil der administrativen Kosten, die bisher öffentlich getragen wurden (v.a. Schadenabwicklungskosten) zur Privatwirtschaft wandern. Diese bringt zusätzliches versicherungstechnisches Know-how mit, womit durch die geregelte Koordination der Interaktion von Staat und Privatwirtschaft die Transparenz und Effizienz in Hinblick auf Schadenskompensationen verbessert werden kann.
- Weiters kommt es zu rechtlichen Vorteilen für den Versicherungsnehmer, wie z. B. der Anspruch auf Entschädigungen, der in weiterer Folge z. B. dem Versicherungsnehmer als Mittel zur Kreditsicherung dient (Norman-Audenhove, 2007).
- Aufgrund marktbedingter Anreize für Versicherer (z. B. der betriebswirtschaftlichen Kostensenkung durch effiziente Abwicklung von Bagatellschäden) bzw. klarerer Anreizstrukturen zum Hochwasserschutz durch Privatpersonen, wird es auch zu volkswirtschaftlichen Effizienzzuwächsen kommen. Die Versicherungslösung könnte somit in Hinblick auf die Risikowahrnehmung und Anreize² zur Risikovermeidung auch einen Beitrag zur Risikoprävention leisten (Faure, 2007).
- Der positive Effekt von Versicherungsprogrammen auf Immobilienpreise (Verkehrswerte) wurde durch zahlreiche empirische Studien international nachgewiesen (siehe z. B. MacDonald et al., 1990). Volkswirtschaftliche Effizienzen auf dem Immobilienmarkt basierend auf der Einführung eines Versicherungsobligatoriums sind jedoch ausschließlich bei ausreichender Transparenz der Risiken und Tarifierung abzuleiten (Chivers, 2002).

² Welche durch die gewählte Höhe der Selbstbehalte allerdings nicht allzu stark sind, jedenfalls kleiner als bisher, was jedoch durch die verbesserte Risikowahrnehmung und Transparenz kompensiert werden dürfte.

Kritische Anmerkungen zum neuen Reformvorschlag

- Eine Kehrseite der verpflichtenden Abgabe in ein privatwirtschaftliches System besteht darin, dass für das Funktionieren des Modells die rechtliche Basis erst geschaffen werden muss bzw. ein Eingriff in das bestehende Recht (Versicherungsvertragsgesetz) Bedingung ist. Mit der obligatorischen Anknüpfung des Naturgefahrenpaketes an bestehende Versicherungen wird die bestehende Vertragsfreiheit z. B. in der Feuerversicherung eingeschränkt.
- Obwohl die Risikobündelung mehrerer Gefahren Vorteile hinsichtlich der Versicherbarkeit von Risiken mit sich bringt, bezieht sich die obligatorische Deckungserweiterung grundsätzlich auf diejenigen Versicherungsnehmer, die bereits eine Feuerversicherung abgeschlossen haben, weshalb die Anreizstruktur zur Versicherung des tatsächlichen Risikos verzerrt ist.
- Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird das System Härtefälle von grundsätzlich versicherungsunwilligen Individuen im Rahmen größerer Hochwasserkatastrophen nicht vermeiden können, was unter Umständen wieder ad-hoc-Leistungen zur Folge haben wird.
- Die Bündelung mit dem Erdbebenrisiko, das subjektiv fast gar nicht wahrgenommen wird, macht das System zwar teurer, ob der Nutzen dieser Versicherung bei der Zielgruppe, nämlich den Immobilienbesitzern in der HQ > 200-Zone, aber höher ist als der Preis, den diese Gruppe zu bezahlen hat, muss auch aufgrund der derzeit geringen Nachfrage nach Erdbebenversicherung hinterfragt werden.
- Es bedarf zusätzlicher wettbewerbspolitischer Aufmerksamkeit, um allzu starke Wettbewerbseinschränkungen durch die obligatorische Deckungserweiterung zu verhindern. Diese Einschränkungen können umfassen:
 - Reduktion der Produktdifferenzierung seitens der Versicherer durch die Risikobündelung.
 - Tendenz zu nicht marktgerechten Einheitsprämien in den Versicherungsverträgen, an welche das Naturgefahrenpaket mit Einheitsprämie geknüpft wird. Dieses Wettbewerbshemmnis muss insbesondere in den höheren Risikozonen befürchtet werden und würde volkswirtschaftliche Ineffizienz zur Folge haben.
- Vertragsverletzungen von Österreich im Hinblick auf Widersprüche zu EU Wettbewerbsregeln³ durch die obligatorische Deckungserweiterung können nicht ausgeschlossen werden. Einer güterabwägenden Argumentation unter Hinweis auf das öffentliche Interesse an einem funktionierenden Kompensationsmechanismus aufgrund des relativ großen Bevölkerungsanteils in der Risikozone HQ30 in Österreich werden im Streitfall aber durchaus gute Erfolgsaussichten eingeräumt (Faure, 2007).
- Eine weitreichende zonenspezifische Prämiendifferenzierung, die Anreize für potenzielle Hochwasseropfer schafft, in weniger hochwassergefährdete Zonen zu ziehen, kann laut Verhaltensökonomie zu einem Verteilungsproblem führen, wenn die Möglichkeit des Wegzugs aus den Risikozonen ausschließlich auf die finanzstarke Bevölkerungsschicht beschränkt ist (Faure, 2007).
- Durch mögliche Differenzen zwischen dem Verkehrswert und dem Neubauwert (siehe dazu Darstellung in Abb. 2) können Hochwassergeschädigten im Falle eines Wiederaufbauverbots finanzielle Verluste entstehen, wenn der Verkehrswert in der Risikozone höher ist/war als es der Neubauwert in den Wiederaufbaubetrieben ist. Daher sollte hier u.U. eine zusätzliche staatliche Wiederaufbauhilfe an den privatwirtschaftlichen Versicherungsvertrag anknüpfen, so wie auch derzeit Absiedlungsprojekte aus dem Katastrophenfonds gefördert werden.

³ Verordnung (EG) Nr. 358/2003 der Kommission vom 27. Februar 2003 über die Anwendung von Artikel 81 Absatz 3 EG-Vertrag auf Gruppen von Vereinbarungen, Beschlüssen und aufeinander abgestimmten Verhaltensweisen im Versicherungssektor.

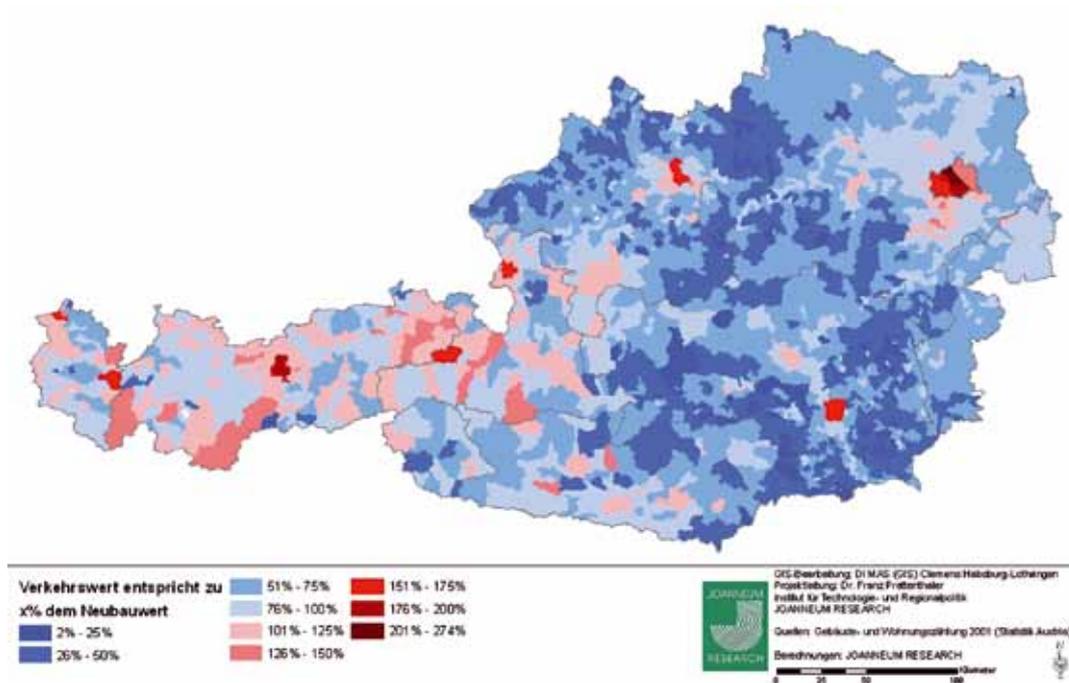


Abb. 2: Prozentuelle Abweichung des Verkehrswertes vom Neubauwert (Quelle: eigene Berechnung JR-InTeReg).

3 Reichen die informationellen Grundlagen der Risiko zonierung für eine obligatorische Lösung aus?

Die detaillierten exemplarischen Analysen zu den unterschiedlichen Hochwasser-risiko zonierungssystemen haben ergeben, dass die HQ30-Zone gemäß HORA nicht in Übereinstimmung mit anderen bestehenden, gesetzlich verankerten Gefahrenzonierungen zu bringen ist, obwohl diese oft die 30-jährige Hochwasseranschlagslinie als Basis haben. Daher muss

- jegliche, auch nur indirekte Rechtswirksamkeit der HORA-Zonierung diese Diskrepanz berücksichtigen, da sonst ein Geltungsstreit der verschiedenen Zonierungen vor den Gerichten droht,
- angedacht werden, das vorgeschlagene Tarifmodell in Richtung Wahlfreiheit zumindest an den Zonengrenzen zu modifizieren.

Abb. 3 visualisiert die Anteile des Dauersiedlungsraumes an Überschwemmungsgebieten für Hochwasserabflüsse mit der Jährlichkeit von 30 (HQ30) nach Definition der HORA.

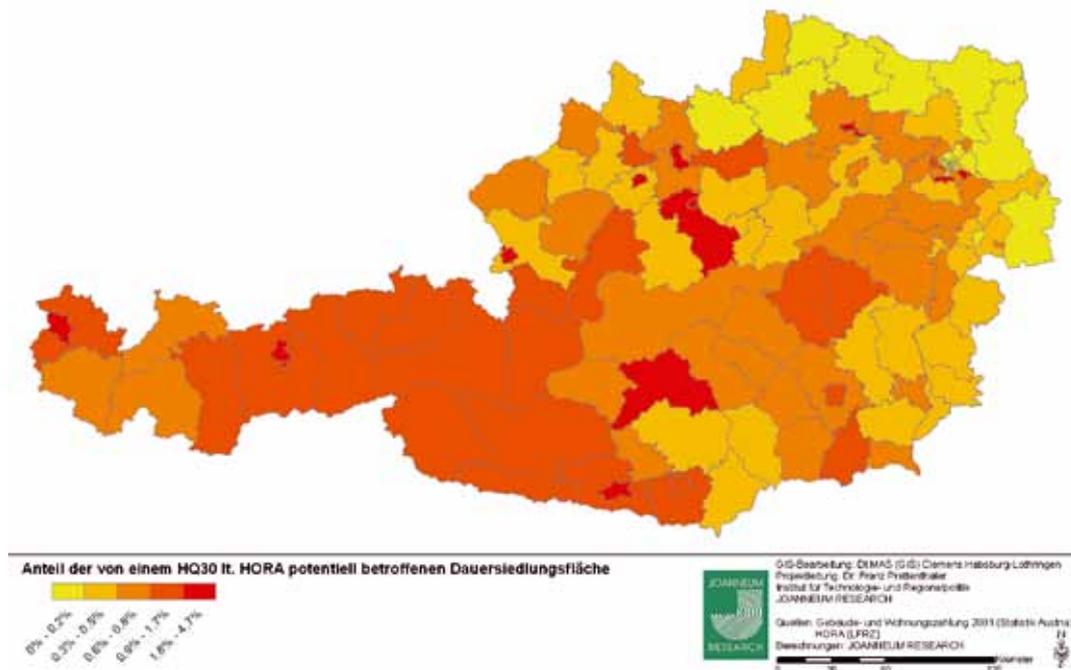


Abb. 3: Anteil des Dauersiedlungsraumes in HQ30 lt. HORA (Quelle: eigene Berechnung JR-InTe-Reg, Daten auf Basis von HORA).

Nimmt man als Höchstschadenspotenzial den gesamten, rastermäßig eindeutig zuordenbaren Gebäudebestand in Österreich, so weicht dieser weder über die Bewertungsmethode des Marktwertes (1.208.686 Mio. €) noch über jene des Neubauwertes (1.221.578 Mio. €) dramatisch von jenem, den Berechnungen des VVÖ zugrundeliegenden, rastermäßig nicht eindeutig zu identifizierenden Gebäudebestand (Versicherungswert 1.382.295 Mio. €) ab. Dennoch kann der Unterschied zwischen Marktwert und Neubauwert regional bedeutsam sein und die Entschädigungspraxis basierend auf einer der beiden Methoden (vermutlich Neubauwert) kann Individuen im Zusammenhang mit Wiederaufbauverböten erhebliche finanzielle Nachteile bringen.

Durch die Einführung der obligatorischen Deckungserweiterung ist mit einem Anstieg der Immobilienpreise in der HQ30-Zone zu rechnen. Die bloße Existenz dieser Regelung hat daher unabhängig von der konkreten Prämien-gestaltung subventionierenden Charakter für die betreffenden Zonen. Insgesamt kann davon eine effizienzsteigernde Wirkung auf den Immobilienmarkt erwartet werden.

4 Sind die kalkulierten Tarife des NatKat-Modells versicherungsmathematisch nachvollziehbar?

Die Berechnungen in Prettenthaler/Albrecher (Hg.) (2009) haben gezeigt, dass der Schadensbedarf, der dem NatKat-Tarifmodell zu Grunde liegt, auf Basis der Schadensdaten für den Katastrophenfonds von 1966–2006 nachvollziehbar ist, wenn man davon ausgeht, dass darin nach unseren Berechnungen bereits ein Sicherheitszuschlag von etwa 30 % enthalten ist.

Weiters zeigt sich, dass der NatKat-Pool je nach Periodenbetrachtung nach Solvency-II-Kriterien und Sicherheitszuschlag nach Solvency-II-Kapital in Höhe von 2,3 bis 3,5 Mrd. € aufbauen

müsste, wenn der jährliche Schaden zur Gänze (d. h. unter 3 Mrd. €) durch den inländisch verwalteten Pool versorgbar sein soll. Wenn der staatliche Katastrophenfonds die darüberliegenden Schäden kompensieren können soll, so ist der dafür benötigte Kapitalbedarf nach Solvency-II-Kriterien nicht wesentlich geringer.

Auch wenn die Kalkulation des Schadenbedarfes basierend auf den Katastrophenfondsdaten mit der Kalkulation des VVÖ in Übereinstimmung gesehen werden kann, sollte darauf hingewiesen werden, dass die in den einzelnen Zonen mit diesen Tarifen lukrierbaren Prämienvolumina womöglich zu optimistisch eingeschätzt wurden. Unsere Werte beruhen auf Gebäudedaten, die eindeutig geografisch zugeordnet sind, und deren Versicherungssumme multipliziert mit den Prämien aus dem VVÖ-Tarifvorschlag nicht das erwünschte Prämienvolumen in Höhe von 204 Mio. € ergeben, was wir auf eine weniger genaue Gebäudezuordnung des VVÖ zurückführen. Allerdings wurde in vielen österreichischen Versicherungen zwischenzeitlich der eigene Versicherungsbestand den HORA-Zonen zugeordnet, sodass das Manko der derzeit ungenaueren Gebäudezuordnung zumindest theoretisch behebbar ist.

5 Ist eine Einführung des NatKat-Modells der Bevölkerung zumutbar und stimmen die Anreize?

Als Schlussfolgerung der anreiztheoretischen Analyse kann festgehalten werden, dass die Unterschiede nach Risikozonen bei Einführung vollkommen risikogerechter Prämien wohl zu groß sind bzw. die Prämien in der Zone HQ30 zu hoch wären und es daher vermutlich zu Widerständen bei der Einführung des Modells kommen würde (siehe dazu Verkehrswert in Zone HQ30 in *Abb. 4*). Wenn man dieser empirischen Tatsachenbehauptung zustimmt, kann man daher der Einführung von quersubventionierenden Tarifen auch aus ökonomischen Effizienzüberlegungen heraus zustimmen.

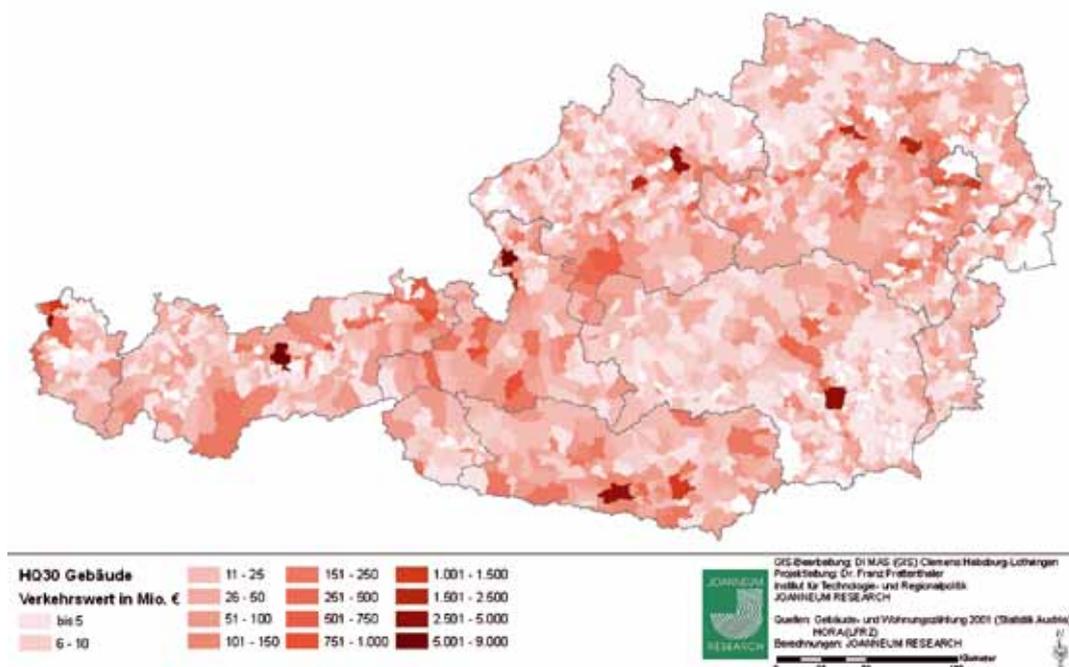


Abb. 4: HQ30-Verkehrswert (Quelle: eigene Berechnung JR-InTeReg).

Wenn das System aber mit quersubventionierenden Tarifen ausgestattet sein soll, so kann nicht auf obligatorische Elemente, wie es z. B. eine obligatorische Deckungserweiterung für bestehende Massenversicherungen darstellt, verzichtet werden. Ein solches Obligatorium erscheint auch nicht als besonderer zusätzlicher Eingriff in die individuellen Freiheitsrechte, da die Quersubventionsvolumina durchaus in einem Bereich angesiedelt sind, die der derzeitigen Praxis des Österreichischen Katastrophenfonds entsprechen. Auch dieser wird derzeit von der gesamten Solidargemeinschaft getragen und als sinnvoll und gerecht anerkannt, auch wenn es berechtigte Kritik an konkreten Abwicklungsmodalitäten gibt, die nach Bundesländern unterschiedlich sind, und auch die Schadendeckungsquote sich für tatsächlich Betroffene oft als überraschend gering erweist.

Als ein Problem, das abschließend aber nur von Juristen beurteilt werden kann, könnte sich die relative Ungenauigkeit, zumindest aber der Unterschied des Zonierungssystems HORA im Vergleich zu den gesetzlich zwingenden Gefahrenzonierungen der BWV bzw. WLV herausstellen. Da letztere nicht flächendeckend und digital für ganz Österreich verfügbar sind, eine solche Verfügbarkeit aber als Voraussetzung zur Behebung informationeller Asymmetrien notwendig ist, kann sie nicht als Basis eines gesetzlich verpflichtenden Tarifsystems dienen. Sollten sich diese Bedenken aus juristischer Sicht verfestigen, so könnte dennoch über die Einführung von gewissen Elementen der Selbstselektionstarifizierung ein Ausweg gefunden werden, der den Zielen der Gerechtigkeit und der Effizienz des Systems unter Erhöhung der Wahlfreiheit der Bürger gerecht werden kann, was sogar eine Verbesserung im Hinblick auf die gesellschaftliche Optimalität der Lösung bewirken würde.

Der Aufschlag für Vertrieb, Regulierung und Administration in Höhe von jährlich 56 Mio. € erscheint für ein Produkt, das lediglich eine Zusatzklausel zu bestehenden Verträgen erfordert, sehr hoch und könnte beispielsweise durch eine pauschale Abgeltung jedes regulierten Schadensfalles aus dem Katastrophenfonds für die Regulierungstätigkeit gesenkt werden. Das Prinzip „Geld gegen Information“ hätte auch den Vorteil, dass die öffentliche Hand für die wichtige Aufgabe der Prävention entsprechende Zeitreihen über Schadensdaten weiterführen kann.

6 In welcher Form profitieren Katastrophenfonds und Länder?

In *Abb. 5* sind jene Mittel im Zeitverlauf (zu laufenden Preisen bzw. angepasst an den Baukostenindex) seit Gründung des Fonds im Jahre 1966 dargestellt, die aus dem Katastrophenfonds an die einzelnen Bundesländer für die von ihnen ausbezahlten Entschädigungen an Private geflossen sind. Zusätzlich ist das Niveau des Gebäudebestands als Referenzwert dargestellt.

Die Einführung des NatKat-Modells würde den Katastrophenfonds durchschnittlich um jährlich rund 47 Mio. € entlasten, wenn man davon ausgeht, dass ähnlich der bisherigen Praxis – in Zukunft aber bundesweit einheitlich – der Katastrophenfonds 30 % des Gesamtschadens, allerdings nur für den, die 3 Mrd. € Jahresschadensgrenze überschreitenden Teil trägt. Die durchschnittlichen jährlichen Einsparungen bei den Ländern würden sich auf zusätzliche rund 78 Mio. € belaufen, dazu kommen noch wesentliche Verwaltungseinsparungen aufgrund der wegfallenden Schadenregulierung bei den Ländern und Gemeinden.

Die eingesparten Mittel sollten zum größeren Teil im Zuge der Steuerreform an die Bürgerinnen und Bürger als Kompensation für die zusätzlichen Prämien rückgeführt werden und zum kleine-

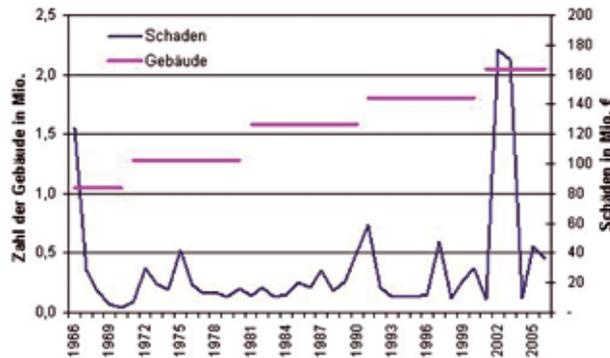


Abb. 5: Zahlungen aus dem Katastrophenfonds an die Länder für Schäden im Vermögen Privater (in Mio. € Baukostenindex angepasst) inkl. Niveau des Gebäudebestands (Datenquelle: Bundesministerium für Finanzen, Unterlagen zum Finanzausgleich; Volkszählungen 1961–2001; eigene Berechnungen InTeReg).

ren Teil zur Reduktion ebendieser Prämien in Form von Fixbeträgen an die Versicherungen für die Dienstleistung der Schadenregulierung ausbezahlt werden. Darüber hinaus könnte ein geringer Anteil für gezielte Präventionsmaßnahmen, die ausschließlich nach den Kriterien der ökonomischen Effizienz der eingesetzten Mittel gesetzt werden, verausgabt werden. Diese Maßnahmen sollten sich vor allem auch auf jene Gebiete konzentrieren, in welchen die deutlichste Zunahme des Schadenspotenzials aufgrund des Klimawandels erwartet wird.

7 Wie liegt das Modell im internationalen Vergleich?

Eine Betrachtung der einzelnen Systeme veranschaulicht, dass diese in ihrer Organisationsstruktur und den jeweiligen Gestaltungselementen teils erheblich voneinander abweichen. Es wurde auch deutlich, dass ein reibungsloses Funktionieren des Risikotransfersystems ohne negative Wechselwirkungen eine von Beginn an klar definierte Partnerschaft zwischen Staat und privater Versicherungswirtschaft, die von beiden Seiten akzeptiert und eingehalten wird, voraussetzt. Grundsätzlich kann zusammenfassend gesagt werden, dass sich in der Regel jene Systeme besser bewährt haben, die eine Form des Obligatoriums gewählt hatten. Durch entsprechende Einbeziehung der Versicherungsträger in Prävention und Raumplanung und einen gut durchdachten Risikoausgleich bei Großschadensereignissen kann, wie das Beispiel Frankreich gezeigt hat, auf diese Weise sogar ein System mit Einheitsprämien, sollte dies politisch erwünscht sein, aufgebaut auf nationaler Solidarität aufrecht erhalten werden. Wichtig erscheint darüber hinaus auch, für Gebietskörperschaften die entsprechenden Anreize zu setzen, damit diese trotz des Bestehens eines Risikotransfersystems nicht auf präventive Maßnahmen verzichten. Schließlich scheinen Überlegungen dahingehend angebracht, ob für Objekte mit sehr hoher Schadenfrequenz der Versicherungsmechanismus ein geeignetes Risikotransferinstrument darstellt.

Aus der Zusammenschau der unterschiedlichen Systeme und Gestaltungselemente ergeben sich zusammengefasst folgende Beobachtungen:

- Als sozial verträglich können in der Regel jene Systeme eingestuft werden, die bei einer allgemein verfügbaren Deckung gleichzeitig leistbare Prämienhöhen auch in Risikozonen gewährleisten.

- Durch die Bündelung mehrerer Naturgefahren ist annähernd jeder Haushalt potenziell betroffen, die bei einer allgemeinen Versicherungspflicht entstehende Quersubventionierung kann gering gehalten werden, womit wiederum die Akzeptanz einer verpflichtenden Lösung gesteigert wird.
- Eine risikogerechte Prämiengestaltung kann neben den Selbsthalten zu einer Verringerung des moralischen Risikos beitragen und beispielsweise die Akzeptanz eines Obligatoriums erhöhen. Zumindest sind mit risikodifferenzierten Prämien und Selbsthalten eine wichtige Signalwirkung und Anreize für Präventionsmaßnahmen verbunden. Dasselbe gilt für Prämienrabatte bei Präventionsmaßnahmen.
- Durch eine obligatorische Deckungserweiterung bzw. eine Pflichtversicherung wird ein Ausgleich über das (annähernd) größtmögliche Risikokollektiv geschaffen. Das Problem der adversen Selektion wird gelöst, auch Risikogebiete werden versicherbar und zudem kann ein leistbares Prämienniveau erreicht werden.
- Durch eine Gleitskala bei den Selbsthalten wie beispielsweise in Frankreich wird auch ein gewisser Druck auf Gemeinden ausgeübt, Risikopräventionspläne zu erstellen bzw. Gefahrenzonenplänen in der Raumplanung größeres Gewicht zu verleihen. Diese Struktur fördert Schadenverhütung und Präventionsmaßnahmen. In der Schweiz hat sich insbesondere das Mitspracherecht der Monopolversicherer in der Raum- und Bauordnung auf kantonaler Ebene bewährt.
- Bestimmungen, denen zufolge letztlich Behörden entscheiden, ob ein Ereignis versichert ist oder nicht, führen zu einer gewissen Intransparenz und Unsicherheit für die Versicherten und haben sich in der Regel nicht bewährt. Außerdem kommt es durch diese Vorgehensweise zu Verzögerungen bei der Kompensation der Schäden.
- Wie das Beispiel Frankreich zeigt, tragen die Rückversicherungsmöglichkeit bei der CCR und deren unbegrenzte Staatsgarantie dazu bei, die Naturkatastrophendeckung für die Erstversicherer tragbar zu machen. Allerdings wurde auch deutlich, dass es genau durchdachter Regelungen bedarf, die alle möglichen Konstellationen berücksichtigen.
- Ein Vorteil des neuen belgischen Systems besteht in der erhöhten Rechtssicherheit für Betroffene und dem verminderten administrativen Aufwand im Zuge der Schadenskompensation.
- Ein Abschluss- und Annahmewang bzw. darüber hinaus gehende Vorkehrungen wie jene im belgischen System helfen ein „Rosinenpicken“ seitens der Versicherungsunternehmen zu verhindern.
- Der Ausschluss von Neubauten in Risikozonen (nach der Veröffentlichung von Gefahrenzonenplänen) ist in der Regel ein wichtiges Gestaltungselement, um Anreize zu individueller und kollektiver Risikovermeidung und Prävention zu setzen. Die verschiedenen oben beschriebenen Ausschlussgründe helfen zudem, moralisches Risiko in Bezug auf die Bauplatzwahl einzudämmen.
- Dienen die privaten Versicherungsgesellschaften lediglich als Intermediär, besteht die Gefahr, dass Schäden „zu großzügig“ reguliert werden.

8 Abschließende Empfehlungen

Das vorgeschlagene NatKat-Modell stellt eine wesentliche Verbesserung des österreichischen Risikotransfermechanismus für Hochwasserschäden im Vergleich zum Status quo dar und sollte nach Klärung der angesprochenen Details und entsprechender kleinerer Modifikationen so schnell

wie möglich umgesetzt werden. So sollte vor allem noch darauf hingearbeitet werden, die Akzeptanz des Systems durch möglichst geringe Prämien, z. B. auch den einstweiligen Ausschluss des Erdbebenrisikos und den Einbau von Selbsttarifikationsaspekten zu erhöhen. Die Reduktion der Prämien durch eine direkte Abgeltung der Schadenabwicklungsleistungen durch den Katastrophenfonds und die Länder soll auch die Datenverfügbarkeit der genauen Schadenssummen und -orte für die öffentlichen, auf die Prävention spezialisierten Institutionen sicherstellen und deren volkswirtschaftliche Effizienz erhöhen.

Im Hinblick auf die gerechtfertigte Systemobergrenze und die Rolle des Staates sollte weniger von der Übernahme einer Staatshaftung denn von einer Fortführung der bisherigen Praxis der öffentlichen Kompensation ab einer Jahresschadenssumme von 3 Mrd. € gesprochen werden. Diese Kompensationsleistung könnte durchaus weiterhin auch unter Beteiligung der Länder stattfinden, um deren Rolle in der Prävention mit entsprechenden Anreizen auszustatten. Allerdings sollte dafür eine klare, einfache und transparente bundesweit einheitliche Regelung gefunden werden, etwa in Form einer einheitlichen Entschädigung der Schadenssumme über 3 Mrd. € in Höhe von 50 %, falls eine höhere Quote als nicht machbar erachtet werden sollte. Diese Summe könnte wie bisher im Verhältnis 60:40 zwischen Katastrophenfonds und betroffenem Bundesland aufgeteilt werden. Der Übergang zu einer derartigen Lösung würde die öffentlichen Haushalte bedeutend entlasten und diese Entlastung sollte auch entsprechend an die Bürgerinnen und Bürger, die ja durch zusätzliche Prämien mit obligatorischem Charakter belastet werden, weitergegeben werden. Insbesondere die Immobilienbesitzer in den Nichtrisikozonengebieten könnten dadurch (nach genauer Analyse der Inzidenz der Pflichtprämien bzw. deren gesetzlicher Regelung) entlastet werden, wobei die zeitliche Koinzidenz mit dem Auslaufen der Erbschaftsteuer hier sicher eine elegante Lösung wäre.

Von der Größenordnung her betrachtet, bleiben zumindest die Quersubventionen, also die Belastungen jener Bevölkerungsteile in den Nichtrisikozonen, im selben Rahmen wie die derzeitigen Beiträge, die für Schadenkompensation in den Katastrophenfonds über Steuern entrichtet werden. Allerdings sollte beachtet werden, dass diese Beiträge derzeit vom Bruttoeinkommen bezahlt werden und psychologisch nicht wahrgenommen werden. Es wäre daher schlüssig, wenn die Prämien aus der obligatorischen Deckungserweiterung von der Steuer absetzbar wären, auch um die Tatsache, dass diese Lösung im öffentlichen Interesse ist und die öffentlichen Haushalte entlastet, zu signalisieren.

Durch die Einführung des NatKat-Modells ist eine Senkung der Steuerquote möglich. Die Chance, diese Reformen zeitgleich mit der nächsten Steuerreform durchzuführen und damit die Gesamtbelastung der Bevölkerung im Auge zu behalten, sollte jedenfalls nicht ungenützt bleiben. Österreich hat, obwohl es geografisch bedingt eine relativ hohe Exposition im Hinblick auf Hochwasserrisiko aufweist, die Möglichkeit, zu jenen europäischen Staaten zu gehören, die dieses im Zusammenhang mit dem Klimawandel virulenter werdende Problem als erste einer ökonomisch effizienten, „wasserdichten“ Lösung zuführen, und sollte diese Möglichkeit jetzt ergreifen.

Literatur

Pretenthaler, F., Albrecher, H., (Hg.), Hochwasser und dessen Versicherung in Österreich, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 2009, ISBN 978-3-7001-6753-2

Ein neues Risikotransfersystem für Naturgefahren in Österreich?

Anschrift des Autors:

Mag. Dr. Franz Prettenthaler, M. Litt.

Joanneum Research GmbH

Institut für Technologie- und Regionalpolitik

Elisabethstraße 20, 8010 Graz

E-Mail: franz.prettenthaler@joanneum.at

Meteorologische Extremwerte: historisch und zukünftig

Reinhold Steinacker

1 Einleitung

Bedingt durch die aktuelle Diskussion des Klimawandels, kommt der Frage nach einer zukünftigen Veränderung der Häufigkeit und Intensität von meteorologischen Extremereignissen ein hoher Stellenwert zu. Nach jedem bemerkenswerten meteorologischen Ereignis, sei es ein Starkniederschlag, eine Dürreperiode, eine winterliche Kältewelle, eine sommerliche Hitzeperiode, ein Sturm- oder Orkantief, ein heftiges Gewitter mit Hagelschlag bis hin zu einem Tornado, werden in den Medien Stimmen laut, die eben dieses Ereignis als Hinweis auf den Klimawandel interpretieren und vor einer Zunahme solcher Ereignisse warnen. Vom wissenschaftlichen Standpunkt ist eine solche Aussage jedoch nicht so leicht zu treffen, da sich seltene Ereignisse (geringe Stichprobengröße) nur mit großer Unsicherheit bezüglich eines statistisch abgesicherten Trends auswerten lassen.

Was kann unternommen werden, um trotz dieser Schwierigkeiten, die Frage nach den zukünftigen Trends wissenschaftlich zu untersuchen? Es bieten sich hierfür mehrere Möglichkeiten an:

A) Klimamodelle, direkter Output

Seit Ende des letzten Jahrhunderts ist die Leistungsfähigkeit von Computern so stark angestiegen, dass globale Klimamodelle, das sind numerische Modelle, die die relevanten hydro-thermodynamischen Gleichungen für die Atmosphäre, gekoppelt mit den Ozeanen und zum Teil mit der Biosphäre, zeitlich integrieren und etliche Jahrzehnte in die Zukunft berechenbar werden. Durch die nicht genau bekannten Randbedingungen – z. B. die zukünftige anthropogene Treibhausgasemission – können, im Gegensatz zu einer deterministischen numerischen Wetterprognose, jedoch lediglich Szenarien berechnet werden. Solche Szenarien sollten in der Lage sein, realistische Sequenzen der großräumigen Strömungskonfiguration und Luftmassenverteilung abzubilden. Sind Extremwetterereignisse mit solchen großräumigen Wetterlagen verknüpft (z. B. großflächige Dürreperioden), so kann aus den Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung eine Abschätzung unternommen werden, ob ein zukünftiger positiver oder negativer Trend in deren Häufigkeit zu erwarten ist.

B) Klimamodelle, indirekter Output

Eine Reihe von meteorologischen Extremereignissen ist in der räumlichen Ausdehnung jedoch so kleinräumig (z. B. konvektive Ereignisse), dass die heutigen Klimamodelle, die einen typischen Gitterpunktabstand in der Größenordnung von 100 oder mehreren 100 km aufweisen, nicht in der Lage, diese deterministisch abzubilden. In einem solchen Fall kann mittels geeigneter Downscalingverfahren versucht werden, trotzdem eine wahrscheinlichkeitsorientierte Aussage über zukünftige Trends zu machen. Bei statistischen Downscalingverfahren wird eine statistische Korrelation zwischen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation und den kleinskaligen Wetterphänomenen hergestellt. Beim dynamischen Downscaling werden mittels eines im globalen Modell eingebetteten (genesteten) hochauflösenden regionalen Klimamodells eine erheblich höhere räumlich und zeitliche Auflösung erzielt.

C) Blick in die Vergangenheit

Da das Klima unserer Erde niemals konstant war oder ist, kann aus den Veränderungen vergangenen Perioden, wo direkte Messungen oder Proxy-Informationen vorliegen, wertvolle Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen großräumigen Zirkulations- und Luftmassenverteilungen und dem Auftreten von meteorologischen Extremereignissen hergeleitet werden. Nicht zuletzt der signifikante Klimawandel der letzten wenigen Jahrzehnte, der in vielen Regionen der Erde (z. B. im Alpenraum) durch ein hervorragendes Beobachtungsmaterial dokumentiert ist, erlaubt es, diesen Zusammenhang zu quantifizieren.

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen und Publikationen der letzten Jahre sind diesem Themenkreis gewidmet und finden Niederschlag in den Aussagen des IPCC Reports, 2007. Allerdings sind konkrete Aussagen zu Trends in Extremereignissen hier mit einem großen Unsicherheitsbereich versehen.

Auch in Österreich wird von relevanten Institutionen an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen dieser Frage eine hohe Priorität eingeräumt, nicht zuletzt, weil Österreich und der gesamte Alpenraum durch den Klimawandel in vieler Hinsicht betroffen sein kann.

In der vorliegenden Darstellung sollen beispielhaft aus mehreren Forschungsprojekten für die Fragestellung relevante Ergebnisse dargestellt und diskutiert werden.

2 Vergangene und mögliche zukünftige Trends von Starkwindereignissen

Will man in naiver Weise die zum Teil recht langen Zeitreihen von Windbeobachtungen von Klima- oder Wetterstationen auswerten, so findet man häufig signifikante Trends – allerdings mit unterschiedlichen Vorzeichen. Dies rührt daher, dass die Windgeschwindigkeit in Bodennähe in hohem Maße von der Rauigkeit der Oberfläche im größeren Umkreis um eine Station abhängt. Selbst ein einzelner, über die Jahre wachsender Baum in Stationsnähe oder die Veränderung der Bebauung kann die Rauigkeit derart verändern, dass solche „künstlichen“ Trends ein eventuell vorhandenes Klimasignal völlig überdecken. Durch die oft schleichenden künstlichen Trends ist eine Homogenisierung von Winddaten äußerst schwierig.

Wenn man weiß, dass die Ursache des Windes im horizontalen Druckgradienten liegt, kann eine Auswertung dieser Messgröße zu wesentlich verlässlicheren Aussagen führen. Der Luftdruck, der als integrale Größe (Gewicht der gesamten über dem Barometer befindlichen Luftsäule) in Erscheinung tritt, ist räumlich wesentlich homogener und mit einer höheren Präzision messbar als alle anderen Zustandsgrößen der Atmosphäre. Für die großräumigen Sturmereignisse in Mitteleuropa, deren Ursache in den atlantischen Sturm- oder Orkantiefs liegt, kann man die Sturmstärke mittels einer großräumigen Druckdifferenz, die seit weit mehr als 100 Jahren über Mitteleuropa beobachtet wird, parametrisieren. Zugleich erlauben auch die Klimaszenarien die geografisch gleichen Druckdifferenzen bezüglich zukünftiger Trends auszuwerten (Matulla et al, 2007). Obwohl Schwankungen der mittleren und extremen Gradienten – entsprechend der mittleren und extremen Windstärke – in den historische Daten über Mitteleuropa zu finden sind, liegt in den historischen Daten kein signifikanter langfristiger Trend vor. Selbst in den Szenarien der Klimaentwicklung der nächsten Jahrzehnte ist diesbezüglich kein eindeutiger Trend vorhanden. Somit sind

die reflexartigen Aussagen in manchen Medien nach den Extremereignissen europäischer Stürme, ob nach Kyrill, Lothar oder Paula, sie seien ein Hinweis auf den anthropogenen Klimawandel, zu relativieren.

Kleinräumige Sturmereignisse in Zusammenhang mit konvektiven Ereignissen können nur über entsprechend kleinräumige horizontale Druckdifferenzen eruiert werden, die erst nach dem Aufbau von meteorologischen Meso-Netzen mit einer Stationsdistanz von deutlich weniger als 50 km verfügbar sind. Konzentriert man sich auf die letzten 30 Jahre, in denen der signifikante Temperaturanstieg im Alpenraum von rund 2 Grad Celsius aufgetreten ist, so zeigt sich auch hier kein abgesicherter Trend (Steinacker et al, 2008). Dies steht auch im Einklang mit der Auswertung der europäischen Blitzortungssysteme, die zwar eine hohe interannuelle Variabilität in der jährlichen Blitzfrequenz aufweisen aber bisher keinen signifikanten langzeitigen Trend.

3 Extreme Temperaturanomalien

Extreme Kälteperioden im Winter als auch extreme Hitzewellen im Sommer bewirken erhebliche Einflüsse auf Mensch und Umwelt bis hin zu signifikant erhöhten Todesfällen. Obwohl längerfristig nach wie vor in Europa und in der gesamten Welt mehr Todesopfer durch Kältewellen als durch Hitzewellen zu beklagen sind, hat vor allem der Hitzesommern 2003 in Europa zu intensiven Untersuchungen geführt, inwieweit in Zukunft solche Extremereignisse häufiger werden könnten. Ein grundsätzliches Problem stellt sich hierbei durch die Tatsache, dass man sich bei Extremwertstatistiken bestimmter Wahrscheinlichkeitsverteilungen bedient, die aus vergangenen Beobachtungsdaten abgeleitet werden. Durch eine Anwendung einer solchen Wahrscheinlichkeitsverteilung auf ein geändertes Klima, das zwar einen Anstieg der Mittelwerte, jedoch keine Änderung der Verteilung zeigt, suggeriert eine markante Änderung der Häufigkeit von Extremereignissen (s. Abb. 1, Bereich oberhalb der historischen „Extremwertlinie“). Durch Rückkoppelungsmechanismen – z. B. geänderter Wasserkreislauf infolge Temperaturerhöhung – muss allerdings bei einer Änderung der Mitteltemperaturen auch mit einer geänderten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gerechnet werden (Schär et al, 2004).

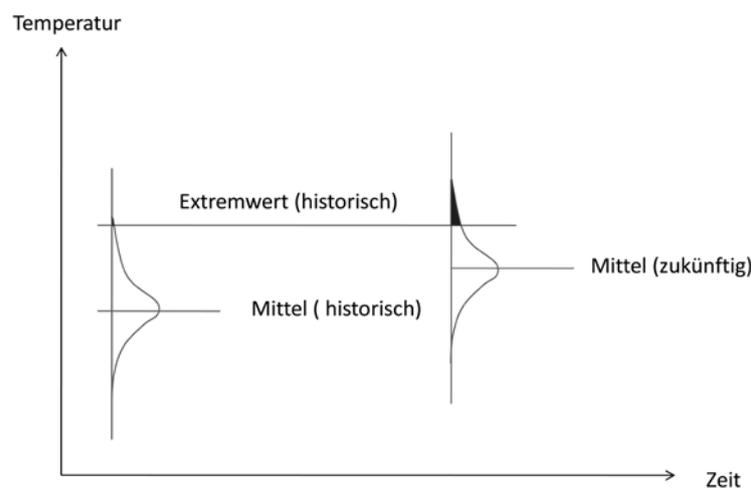


Abb. 1: Anwendung einer historischen Extremwertstatistik auf eine zukünftige gleichförmige, jedoch bezüglich des Mittelwertes verschobene Verteilungsfunktion.

4 Extremniederschläge

Neben den Sturmereignissen stellen Hochwasserereignisse in Mitteleuropa die stärkste Bedrohung der Zivilisation durch Naturgefahren dar. Es vergeht kaum ein Jahr, in dem nicht lokale bis großflächige Überschwemmungen, Vermurungen oder im Winter Lawinenabgänge nach Starkschneefällen den menschlichen Lebensraum bedrohen. Entsprechend sensibel reagieren Bevölkerung und Entscheidungsträger auf Aussagen mancher Wissenschaftler, dass Häufigkeit und Ausmaß von Extremniederschlägen unter den zu erwartenden geänderten Klimabedingungen zunehmen werden. Wie können solche Aussagen wissenschaftlich untermauert werden?

Klimamodelle können durch die immer noch viel zu geringe räumliche Auflösung den lokalen Niederschlag nicht direkt bestimmen. Die Niederschlagsentstehung zählt in solchen Modellen zu den parametrisierten Vorgängen. Deshalb ist eine Auswertung von direkten Modellniederschlägen nicht zielführend. Dynamische Downscalingansätze mittels höher auflösender genesteter Modelle helfen hier, die räumliche und zeitliche Auflösung der Niederschläge zu verbessern. Ein Problem stellt hierbei die große Sensitivität der verschiedenen zum Nesting verwendeten Modelle/Szenarien selbst wenn man saisonalen oder jährlichen Niederschlagsmengen betrachtet. Die Streubreite zwischen den verschiedenen Modellen erweist sich dabei häufig größer als mögliche Trends. Dies gilt umso mehr, wenn Extremereignisse des Niederschlags betrachtet werden.

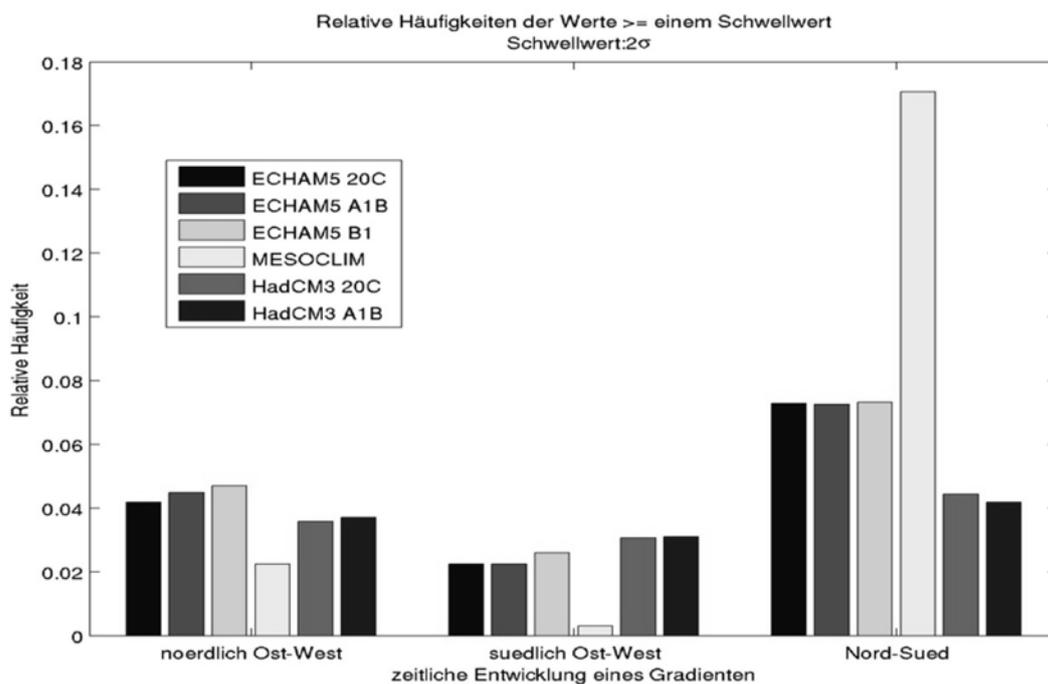


Abb. 2: Vergleich der relativen Häufigkeiten des Überschreitens der 2-fachen Standardabweichung der räumlich-zeitlichen Druckdifferenzen von Klimamodellen aus Vergangenheit und Zukunft, bzw. aus Reanalysedaten (Beobachtungen). ECHAM 20C ... Kontrolllauf des Hamburger Klimamodells des 20. Jahrhunderts, ECHAM A1B/B1 ... Zukunftsszenarien A1B und B1 des Hamburger Klimamodells für die Mitte des laufenden Jahrhunderts, MESOCLIM ... alpine Reanalyse der vergangenen 35 Jahre, HadCM3 20C ... Kontrolllauf des britischen (Hadley Center) Klimamodells des 20. Jahrhunderts, A1B ... Zukunftsszenarien A1B des britischen (Hadley Center) Klimamodells für die Mitte des laufenden Jahrhunderts.

Da im Alpenraum ein erheblicher Teil der Niederschläge und insbesondere der Extremniederschläge orografisch ausgelöst oder zumindest modifiziert werden, erscheint es sinnvoll, nicht die Modellniederschläge für Trenduntersuchungen zu verwenden sondern eine Parametrisierung über die Strömungsverhältnisse (Großwetterlagen) und Luftmassen durchzuführen. Ein solcher Ansatz wurde im Projekt „Trendanalyse von hydrometeorologischen Extremwerten“ des österreichischen Klima- und Energiefonds verfolgt (KLI.EN, 2010). Es wurden Großwetterlagen der vergangenen Jahrzehnte auf ihre „Wirksamkeit“ hin untersucht, in bestimmten Klimaregionen Österreichs zu ergiebigen Niederschlägen und in der Folge zu Hochwässern zu führen. Dabei zeigten sich z. T. deutliche Signale in nachvollziehbarer Weise, dass z. B. eine zyklonale Wetterlage, die eine Stauwirkung im Luv der Alpen verursacht, eine höhere „Wirksamkeit“ bezüglich ergiebigen Niederschlägen aufweist als eine antizyklonale Wetterlage, die im betreffenden Gebiet zu einer Leewirkung führt. Wenn nun diese „Wirksamkeit“ in Bezug auf Starkniederschläge aus der Vergangenheit abgeleitet wird, so kann dieser Zusammenhang ebenso auf die Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung angewandt werden, da Großwetterlagen eine vergleichsweise robuste Modelleigenschaft darstellen sollte.

Neben der Korrelation der klassischen Großwetterlagen wurden auch neuere Ansätze angewandt. Selbst bei ein und derselben Wetterlage fallen Niederschläge besonders konzentriert bei Vorhandensein bzw. dem Durchzug von Luftmassengrenzen (Fronten). Luftmassengrenzen weisen neben einem Temperaturkontrast auch einen charakteristischen räumlich-zeitlichen Luftdruckverlauf. Verwendet man z. B. den zeitlichen Verlauf des alpenparallelen oder alpenquerenden Druckgradienten, so zeigt sich in den meisten Klimaregionen Österreichs ein deutlicher Zusammenhang mit Niederschlagsereignissen bis hin zu den Extremereignissen der (Flächen-)Niederschläge.

Zur Erfassung der Korrelationen zwischen Wetterlagen/Druckverläufen und Extremniederschlägen wurden einerseits die 40 Jahre Reanalysen des EZMW (ERA40) sowie die 35 Jahre der alpinen mesoskaligen (MESOCLIM) Reanalysen des Instituts für Meteorologie der Universität Wien (IMGW) herangezogen. Die gefundenen Häufigkeiten aus den Reanalysen wurden sodann mit den Szenarien verschiedener Klimamodelle verglichen. Dabei zeigen sich erhebliche Unterschiede, die in Richtung einer geänderten zukünftigen Wahrscheinlichkeit von Extremniederschlagsereignissen hinweisen.

Zur Kontrolle wurde die statistische Auszählung der Wetterlagen bzw. Druckkonfigurationen auch auf die Klimamodellläufe der vergangenen Jahrzehnte angewandt, wobei sich erstaunlicherweise ebenfalls eine nicht unbedeutende Differenz in den Häufigkeiten verglichen mit den Reanalysen zeigt (vgl. Abb. 2). Die Häufigkeitsdifferenz zwischen den Vergangenheits- und Zukunftsläufen der Modelle ist dabei geringer als die Differenz zwischen Klimamodellen und Reanalysen der Vergangenheit. Dieses ernüchternde Ergebnis zeigt also, dass die heutigen globalen Klimamodelle nicht nur nicht in der Lage sind, glaubwürdige lokale Niederschlagsklimatologien zu liefern, sondern dass selbst die Abbildung der Großwetterlagen in den Modellen mangelhaft ist.

Durch die bereits stattgefundenen und weiter zu erwartende Zunahme der globalen und regionalen mitteleuropäischen Mitteltemperatur wird häufig ein weiteres Argument in Richtung Zunahme von Extremniederschlägen ins Treffen geführt: Der Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf nimmt exponentiell mit der Temperatur zu. Erhöht sich die Temperatur, so enthält die Luft (exponentiell) mehr Wasserdampf, der durch Kondensation und Niederschlagsbildung in Wolken einen entsprechend höhere Niederschlagsmengen verursacht.

Auch dieser physikalisch durchaus plausibel klingende Zusammenhang muss jedoch relativiert werden. Es stimmt zwar, dass der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur steigt, es ist jedoch keine zwingende Notwendigkeit, dass bei steigender Temperatur der aktuelle Dampfdruck steigt. Falls durch die erhöhte Temperatur eine raschere Austrocknung der Böden (z. B. im Frühsommer) erfolgt, so könnte sogar ein gegenteiliger Trend des Dampfdruckes im Hochsommer eintreten und eine positive Rückkoppelung (geringerer Niederschlag – weitere Bodenabtrocknung) auftreten.

Selbst bei einer Zunahme des Dampfdruckes ist eine Zunahme der Niederschlagsmenge nicht zwingend. Ähnlich wie bei Hurrikanen, die von einer warmen Meeresoberflächentemperatur begünstigt werden ist auch bei starken konvektiven Umlagerungen in der Atmosphäre (Gewitter und kräftige Schauer) eine hohe Feuchte zwar eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung! Es bedarf bei beiden Phänomenen – Hurrikanen und Konvektion – eines Auslösemechanismus. Bei der Konvektion kann die Auslösung entweder durch synoptische Störungen erfolgen (Frontalgewitter), durch starke Einstrahlung mit Anfeuchtung und Überhitzung der bodennahen Luftschichten (Luftmassengewitter) oder durch ein orografisches Forcing (orografische Gewitter). Einige Indizien sprechen tatsächlich dafür, dass im Alpenraum eine selektive Änderung der Häufigkeit bzw. Intensität solcher konvektiver Prozesse in Zukunft erfolgen könnte; etwa dass in den Gebirgsregionen durch die frühere Ausaperung und damit stärkeren Erwärmung im Frühjahr eine Zunahme und Intensivierung erfolgt, in den Flachlandregionen durch die Abtrocknung der Böden jedoch eine Abnahme. Die Verlässlichkeit solcher Aussagen sind jedoch alles andere als gesichert, zu viele komplexe Zusammenhänge und Rückkoppelungen sind wirksam.

5 Veränderung des Verhältnisses flüssiger/fester Niederschlag

Für die Frage, ob ein intensives Niederschlagsereignis in einer Gebirgsgegend zu Hochwasser führt ist nicht nur die Niederschlagsmenge entscheidend sondern auch die Frage, ob der gesamte Flächenniederschlag in flüssiger Form fällt oder ob, bzw. welcher Teil des Niederschlags in fester Form auftritt. Damit stellt die Schneefallgrenze eine sehr wichtige Zusatzbedingung bei der Beurteilung der Auswirkung von Niederschlag auf den Abfluss dar.

Die Schneefallgrenze ist keine direkte Beobachtungsgröße von Wetter oder Klimastationen. Bei Gebirgsstationen wird zwar gelegentlich die Höhe der Neuschneegrenze vermerkt, durch die unzuverlässige Beobachtungsmöglichkeit (Nebel, Wolken), ist diese Information jedoch nicht durchgehend verwertbar. Eine andere Möglichkeit stellt die Beobachtung der Schmelzzone des Niederschlags durch Radar dar („bright band“). Am besten geeignet ist dabei ein „Vertical Pointing Radar“, das jedoch erst seit kurzer Zeit an ausgewählten Stationen in den Alpen verfügbar ist. Eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung der Schneefallgrenze stellt die thermodynamische Methode dar (Steinacker, 1983). Unter Voraussetzung einer einheitlichen Luftmasse, wie sie bei der überwiegenden Niederschlagsereignissen vorliegt, kann die Schneefallgrenze der Höhe der Feuchttemperatur $T_f = 1,5 \text{ °C}$ gleichgesetzt werden, die sich aus der Bodentemperatur und -taupunkttemperatur berechnen lässt. Die Feuchttemperatur liegt an synoptischen Stationen somit seit langer Zeit in 3-stündigen Abständen vor. Damit kann eine zeitlich hochaufgelöste Statistik der Schneefallgrenze mit oder ohne Gewichtung mit der Niederschlagsmenge durchgeführt werden.

Wertet man die Feuchttemperatur unabhängig vom Niederschlag aus, so kann man eine Klimatologie und langfristige Trends der sogenannten „potenziellen“ Schneefallgrenze durchführen. Dies ist gleichbedeutend mit einer Luftmassenklimatologie, da die Feuchttemperatur direkt proportional der Äquivalenttemperatur ist, die gemeinhin als Luftmassenkenngröße gilt. Daneben kann aber die Statistik der Feuchttemperatur gewichtet mit der gemessenen Niederschlagsmenge ausgewertet werden (tatsächliche Schneefallgrenze). Daraus kann z. B. der vom Gesamtniederschlag anfallende Anteil an festem/flüssigem Niederschlag als Funktion der Höhe berechnet werden. Der Vergleich

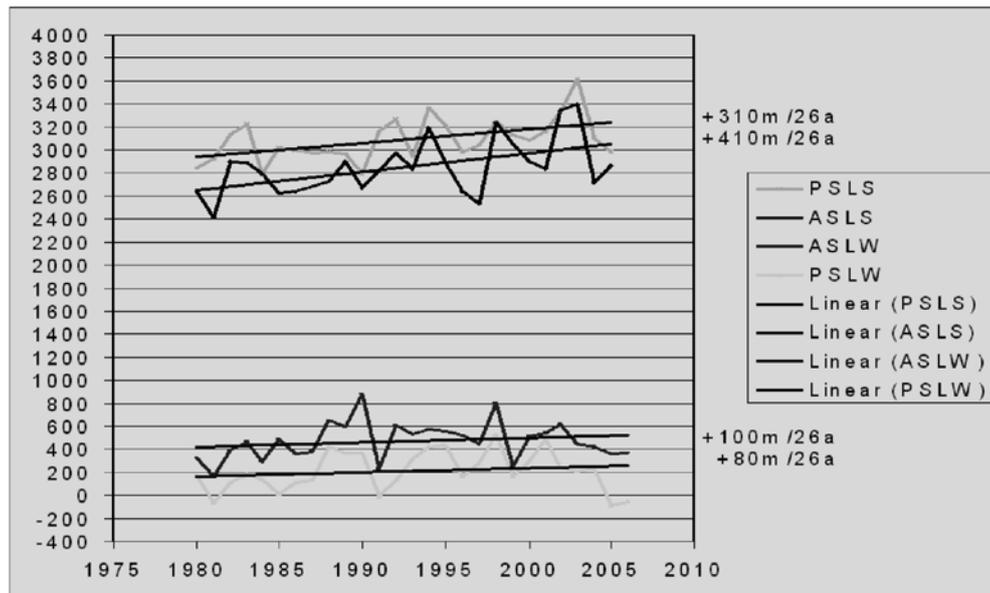


Abb. 3: Trends des jährlichen Medians der potenziellen Schneefallgrenze im Zentralalpenraum im Sommer (helle obere Kurve) und im Winter (helle untere Kurve) sowie der mittleren (Median) niederschlagsgewichteten tatsächlichen Schneefallgrenze in Sommer (dunkle obere Kurve) und im Winter (dunkle untere Kurve) mit dem jeweils linearen Trend.

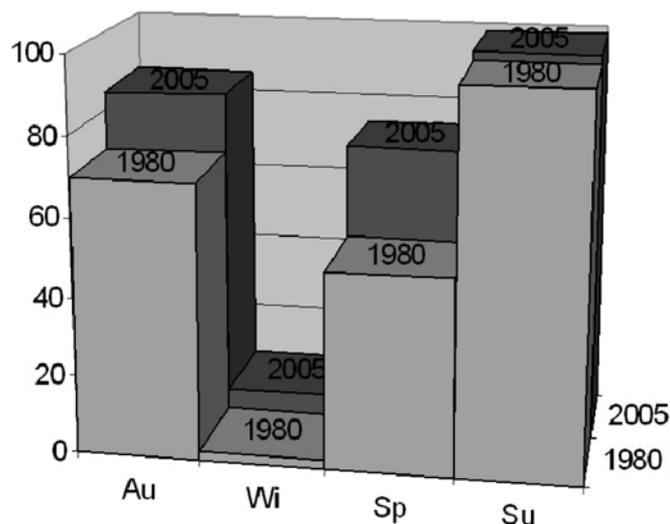


Abb. 4: Änderung des prozentuellen Anteils an flüssigem Niederschlag am Gesamtniederschlag im Alpengebiet für die vier Jahreszeiten (1980, hellgrau, 2005 dunkelgrau), bestimmt aus den linearen Trends von Abb. 3 und der hypsografischen Kurve der Alpen.

der Trends von Feuchttemperatur (potenzielle Schneefallgrenze) und niederschlagsgewichteter Feuchttemperatur (aktuelle Schneefallgrenze) erlaubt interessante Aufschlüsse in Bezug auf das Abflussverhalten. In *Abb. 3* ist der Trend dieser drei Temperaturen bzw. der Schneefallgrenzen eingetragen, wobei besonders der starke Anstieg der aktuellen Schneefallgrenze in Sommer um gut 400 Meter in nur 25 Jahren! ins Auge sticht, während der winterliche Trend dagegen fast vernachlässigbar erscheint. Da jedoch im Sommer der hochalpine Flächenanteil oberhalb der Schneefallgrenze in den Alpen immer sehr klein ist, hat dies nur geringe Auswirkungen auf das Abflussverhalten. Anders sieht dies natürlich in Bezug auf das Verhalten von Gletschern aus, die ja besonders durch sommerliche Schneefälle ihre Ablation verringern können. Der stärkste Effekt des Anstiegs der Schneefallgrenze tritt im Frühjahr und Herbst auf, wo der Anstieg der aktuellen Schneefallgrenze um rund 300 Meter gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der alpinen Fläche mit flüssigem Niederschlag um rund ein Viertel ist.

Da dieser bereits stattgefunden Trend des Anstiegs der Schneefallgrenze wohl in derselben Richtung weiter fortschreiten dürfte, bedeutet dies selbst bei gleichbleibender Niederschlagsklimatologie und unter Vernachlässigung der Schneeschmelze eine Erhöhung des Risikos für alpine Hochwässer besonders im Frühjahr und Herbst.

6 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die heutigen Klimamodelle nicht wirklich in der Lage sind, eine klare Aussage bezüglich einer geänderten Häufigkeit oder Intensität von Extremwetterereignissen zu machen. Daher muss man indirekte Methoden der Modellinterpretation anwenden. Die Untersuchung von Wetterlagen/Luftmassen ist eine dieser Möglichkeiten. Allerdings zeigt sich auch hierbei, dass die Klimamodelle nicht in der Lage sind, diesbezüglich eine realistische Statistik abzubilden. Es bleibt die Möglichkeit, aus Beobachtungsdaten der letzten Jahrzehnte, in denen bereits ein signifikanter Klimawandel aufgetreten ist, geänderte Häufigkeiten von Extremwetterlagen zu untersuchen. Hierbei zeigt sich vor allem, dass durch die fortschreitende globale Erwärmung wegen des höheren möglichen Wasserdampfgehaltes der Luft ein Potenzial zu intensiveren konvektiven Niederschlägen besteht. Durch die Verlagerung der Schneefallgrenze hin zu höheren Niveaus ist weiters ein verändertes Abflussverhalten zu berücksichtigen.

Quellenhinweise

- KLI.EN, 2010: Projekt „Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremwerten“, (PI: H.P. Nachtnebel), Klimaenergiefonds des Bundes, P. Nr. A7.CP456
- Matulla, C., W. Schöner, H. Alexandersson, H. von Storch, X. L. Wang, 2007: European storminess: late nineteenth century to present. *Clim. Dyn.*, 31, Issue 2-3, pp. 125-130.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Haerberli, M.A. Liniger, C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332-336
- IPCC Report 2007: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Steinacker, R., B. Bica, I. Aschauer, 2008: Windereignisse im Bereich der Westbahn; Auswirkungen bisheriger meteorologischer Ereignisse sowie erkennbare Tendenzen. Projektbericht im Auftrag der ÖBB.
- Steinacker, R., 1983: Diagnose und Prognose der Schneefallgrenze, *Wetter und Leben* 35,81-90.

Anschrift des Verfassers:

o.Univ.-Prof. Dr. Reinhold Steinacker
Universität Wien
Institut für Meteorologie und Geophysik
Althanstraße 14, 1090 Wien
E-Mail: reinhold.steinacker@univie.ac.at

Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten

Sven Fuchs

1 Einleitung

Berggebiete reagieren auf sich ändernde Umweltparameter besonders sensibel. In Hinblick auf Naturgefahren stellt der Klimawandel eine doppelte Herausforderung für diese dar, zum einen aus der Sicht des Naturraums, zum anderen aus der Sicht eines dicht besiedelten Lebens- und Wirtschaftsraums. Veränderungen des Naturraums betreffen Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre sowie Biosphäre. Von Bedeutung sind hier vor allem die durch den Klimawandel hervorgerufenen Änderungen in der Umwelt, wie Änderungen des Temperaturregimes (mögliche Erhöhung der Temperaturen) oder der Niederschlagsverteilung (Akzentuierung des Niederschlaggeschehens), die ihrerseits Auswirkungen auf geomorphologische Abtragsvorgänge und Erosionsprozesse haben können.

Eine Erhöhung der Temperaturen führt mit einer zeitlichen Verzögerung von Jahren bis Dekaden zu einem Abschmelzen der Gletscher sowie zu einem Auftauen des Permafrost-Bodens. Diese Beziehung kann für den Alpenraum deutlich für die Zeit seit dem Ende der so genannten „Kleinen Eiszeit“ Mitte des 19. Jahrhunderts aufgestellt werden. Während im gesamten Alpenraum die Gletscher mehr als ein Drittel ihrer Oberfläche verloren haben (Maisch et al. 1998), schwanken die Angaben zur Reduktion des Permafrost-Körpers von 10 % (Haeberli et al. 1998) bis etwa 40 % (Stötter et al. 1996). Damit einhergehend ist die sukzessiv erhöhte Verfügbarkeit unverfestigten erodierbaren Lockermaterials, sowie eine generelle Verlagerung potenzieller Prozess-Anbruchgebiete in höhere Lagen. In Kombination mit einer Änderung der Niederschlagsverteilung ist es nicht unwahrscheinlich, dass in Zukunft Wildbachprozesse und geomorphologische Massenverlagerungsprozesse an Intensität und Frequenz zunehmen werden.

Derartige natürliche Prozesse werden im Überschneidungsbereich mit Nutzungsansprüchen des Menschen zur Gefahr, da der für ökonomische Aktivitäten und Siedlungszwecke zur Verfügung stehende Raum in Berggebieten naturgemäß beschränkt ist. Durch eine Änderung des Prozessverhaltens kann es somit zu einem erhöhten Gefährdungspotenzial für exponierte Werte kommen, insbesondere, wenn diese Prozesse in ihrer durchschnittlichen Schwankungsbreite einen bestimmten, auf die jeweiligen technologischen und wirtschaftlichen Bedingungen bezogenen Schwellenwert überschreiten.

In den letzten 60 Jahren sind deutliche Veränderungen in der Nutzung von Berggebieten festzustellen. Der Ostalpenraum ist hierbei gegenüber manchen Regionen des (Süd-)Westalpenraums begünstigt. Ökonomische Aktivitäten haben zugenommen, die Siedlungsstruktur hat sich verändert und Siedlungen wurden ausgedehnt, und die Anzahl hierfür notwendiger Infrastruktur, wie Straßen und Versorgungsleitungen, hat sich erhöht. Damit einhergehend ist ein Wandel von einer ursprünglich agrarisch geprägten Gesellschaft zu einer Dienstleistungsgesellschaft, vor allem der Tourismussektor hat erheblich Steigerungsraten erfahren. Der parallel stattfindende Übergang zu einer freizeitorientierten Gesellschaft trägt vor allem zu einer Steigerung der sich in gefährdeten Gebieten aufhaltenden Personen bei.

Sich aus diesen Änderungen ergebende mögliche Entwicklungen des Risikos sind in *Abb. 1* qualitativ in (zumindest theoretisch) neun möglichen Tendenzen dargestellt.

		Exponierte Werte und/oder Anzahl gefährdeter Personen		
		Abnahme (-)	keine Änderung (∅)	Zunahme (+)
Magnitudo und Frequenz natürlicher Prozesse	Zunahme (+)	A ∅	B +	C ++
	keine Änderung (∅)	D -	E ∅	F +
	Abnahme (-)	G --	H -	I ∅

Abb. 1: Darstellung möglicher Risikoentwicklungen auf Basis von Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von Naturgefahrenprozessen und Wert und Präsenzwahrscheinlichkeit gefährdeter Objekte und Personen (Fuchs et al. 2004a).

Intensität bzw. Magnitude und Frequenz eines Prozesses können zunehmen, abnehmen, oder die derzeitige Größe beibehalten. Dabei muss aufgrund neuerer Erkenntnisse davon ausgegangen werden, dass alle Verlagerungsprozesse mit Wasser als Agens eine Akzentuierung erfahren werden (z. B. Houghton et al. 2001; Solomon et al. 2007), und somit eine Zunahme der Prozesse zumindest nicht ausgeschlossen werden kann. Das von diesen Prozessen betroffene Schadenspotenzial unterliegt ebenfalls einer Variabilität, weite Teile des Ostalpenraumes weisen aufgrund der sozioökonomischen Entwicklung der letzten Jahrzehnte eine Erhöhung der Wertekonzentration auf.

Der Umgang mit Naturgefahren wurde vor dem Hintergrund einer bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert einsetzenden Individualisierung der Gesellschaft zunehmend als staatliche Aufgabe angesehen, und in Folge beispielsweise in Österreich vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung und von der heutigen Bundeswasserbauverwaltung wahrgenommen. Bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hatten permanente und temporäre Verbaumaßnahmen zur Prozessverhinderung in den Einzugsgebieten Vorrang, ab den 1960er-Jahren setzte jedoch eine intensive Diskussionen um die Möglichkeit passiver Schutzmaßnahmen ein, die in Österreich mit der Anfertigung der ersten Gefahrenzonenpläne in Tirol ihren Niederschlag fanden.

Die Investition erheblicher Mittel in die Verbauung relevanter Anrissgebiete potenziell gefährlicher Prozesse, sowie in den Hochwasserschutz der Wasserläufe, verbunden mit der Erstellung von Gefahrenzonenplänen, darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass ein vollständiger Schutz vor Schäden durch natürliche Prozesse nicht möglich ist. Vor allem seit den 1990er-Jahren zeigt sich dies deutlich, so waren im Alpenraum erhebliche Schäden durch Lawinen (Winter 1998/99), Wildbachprozesse (1999, 2002, 2005) und Hochwasser (2002, 2005, 2006) zu verzeichnen.

Analyse und Bewertung von Naturgefahren ist bereits seit Jahrzehnten Gegenstand der mit Naturgefahren befassten Akteure. Besonders von ingenieurwissenschaftlicher Seite werden Gefahrenbeurteilungen durchgeführt, um ex ante Auswirkungen gefährlicher Prozesse auf den Siedlungs- und

Wirtschaftsraum zu bestimmen. Solange relevante Systemgrenzen stabil sind, und sich somit die Rahmenbedingungen für Prozesse nicht ändern, können mit dieser Methodik zukünftige Schäden auf das Minimum reduziert werden.

Veränderungen im Naturraum, die zu einer Erhöhung des Gefährdungspotenzials führen, und Veränderungen im Kulturräum, die eine Erhöhung exponierter Werte zur Folge haben, münden jedoch in einem deutlich ansteigenden Risiko in Berggebieten. Nachdem Änderungen im Naturraum wie auch im Kulturräum einem zeitlichen Wandel unterliegen, kommt einer temporalen Betrachtung bei der Beurteilung naturgefahreninduzierter Risiken eine hohe Bedeutung zu, eine Tatsache, die zumindest für den Bereich der Gefahrenzonenplanung evident ist. Einem erhöhten Risiko gegenüber Naturgefahren stehen eine geringere Akzeptanz von Naturgefahrenereignissen durch die Bevölkerung, ein verringerter finanzieller Spielraum der öffentlichen Hand für aktive Schutzmaßnahmen, sowie beschränkte Raumreserven und folglich Konflikte mit Gefahrenzonen gegenüber.

2 Änderungen im Naturraum

Auf der Skala von Kontinenten oder Ozeanbecken wurden zahlreiche langfristige Änderungen des Klimas beobachtet (Houghton et al. 2001; Solomon et al. 2007). Zu diesen gehören Änderungen der Temperatur, sowie verbreitete Änderungen der Niederschlagsmengen, des Salzgehalts der Ozeane, der Windmuster und bei Aspekten extremer Wetterereignisse wie Trockenheit, Starkniederschläge, Hitzewellen und der Intensität tropischer Wirbelstürme.

Für viele großräumige Regionen zeigen die Niederschlagsmengen langfristige Trends von 1900 bis 2005. Signifikante Niederschlagszunahmen wurden in Teilen von Nordeuropas beobachtet. Die Niederschläge schwanken räumlich und zeitlich sehr stark. Die Westwinde in den mittleren Breiten sind in beiden Hemisphären seit den 1960er Jahren stärker geworden. Die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen hat über den meisten Landflächen zugenommen, im Einklang mit der Erwärmung und der beobachteten Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs. Paläoklimatische Informationen stützen die Interpretation, dass die Wärme des letzten halben Jahrhunderts für mindestens die letzten 1300 Jahre ungewöhnlich ist. Die mittleren Temperaturen in der Nordhemisphäre waren in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich höher als während jedes anderen 50-Jahr-Abschnitts in den letzten 500 Jahren und wahrscheinlich die höchsten in zumindest den letzten 1300 Jahren.

Eine direkte Prognose für den Alpenraum erweist sich aufgrund der vorliegenden Informationen des IPCC als schwierig durchführbar, weil die Alpen im nordhemisphärischen Maßstab zu klein sind, und somit durch die große Maschenweite der Modelle nicht unmittelbar in Erscheinung treten. Eine wachsende Anzahl von Hinweisen lässt allerdings die folgenden Auswirkungen in hydrologischen Systemen wahrscheinlich werden (Parry et al. 2007; Solomon et al. 2007), diese zeichnen sich auch bereits in den einschlägigen Messperioden ab (Auer et al. 2007):

- Erhöhter Abfluss und früher eintretende Abflusshöchstmengen im Frühling bei zahlreichen von Gletschern und Schnee gespeisten Flüssen.
- Erhöhte Instabilität des Bodens in Permafrostgebieten sowie Massenverlagerungsprozesse in Gebirgsregionen.

- Für Siedlungen in Gebirgsregionen besteht – infolge des Abschmelzens der Gletscher – ein erhöhtes Risiko durch Hochwasser nach Gletscherseeausbrüchen.

Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird für den mittleren Jahresabfluss in Flüssen und die Wasserverfügbarkeit in hohen Breiten ein Anstieg von 10–40 % projiziert. Darüber hinaus wird für die in Gletschern und Schneedecken gespeicherten Wassermengen ein Rückgang erwartet. Dadurch nimmt die Wasserverfügbarkeit in Regionen, die vom Schmelzwasser der großen Gebirgsketten versorgt werden, ab. Wo extreme Wetterereignisse intensiver und/oder häufiger werden, wird es zu einem Anstieg der damit verbundenen wirtschaftlichen und sozialen Kosten kommen. Dieser Anstieg wird in den am unmittelbarsten betroffenen Gebieten erheblich ausfallen. Aufgrund weitreichender und komplexer Verflechtungen wird eine Ausweitung der Auswirkungen des Klimawandels von unmittelbar betroffenen Gebieten auf weitere Regionen die Folge sein.

Zu den negativen Auswirkungen zählen eine erhöhte Gefährdung durch flutartige Überschwemmungen im Landesinneren und verstärkte Erosion (vor allem durch eine aufgrund zunehmender Temperaturdifferenzen erhöhte Gewitteraktivität).

Die Auswirkungen werden sich sehr wahrscheinlich durch geänderte Häufigkeiten und Intensitäten extremer Wetter- und Klimaereignisse weiter verändern (Houghton et al. 2001; Parry et al. 2007; Solomon et al. 2007).

In Hinblick auf die Ostalpen manifestieren sich die wesentlichen erwarteten Änderungen in Form höherer Temperaturen und einer Akzentuierung des Niederschlagsgeschehens. Temperatur und Niederschlag sind wiederum Schlüsselparameter für das Auftreten von Naturgefahren. In Bezug auf die Temperaturen zeigt die Beobachtung für den Zeitraum 1760–2007 einen Anstieg im Sommerhalbjahr um rund 2 °C, im Winterhalbjahr um rund 2,5 °C (Böhm 2009a). Dieser Anstieg wird für das 21. Jahrhundert im Winterhalbjahr für den Ostalpenraum stärker prognostiziert als für den Westalpenraum, und im Sommerhalbjahr für den Südalpenraum stärker als für den Nordalpenraum (Böhm 2009b). Das Niederschlagsgeschehen ändert sich ebenfalls räumlich differenziert, und im Nordalpenraum ist eine leichte Zunahme zu beobachten. Allerdings sind hier die jährlichen Schwankungsbreiten noch höher als beobachtete mittlere Veränderungen, was grundsätzlich die Prognose erschwert (Auer et al. 2007, Böhm 2009b).

Für die im Naturraum ablaufenden Prozesse lassen sich aufgrund der projizierten bzw. prognostizierten Änderungen des Klimas ebenfalls Änderungen erwarten (vgl. *Tabelle 1*). Dabei wird es aufgrund der Akzentuierung der Niederschlagsereignisse vor allem zu einer Zunahme oder Steigerung von Frequenz und Magnitude bei jenen geomorphologischen Prozessen kommen, bei denen Wasser die treibende Kraft ist bzw. das auslösende Moment darstellt, so vor allem bei Wildbachprozessen und Rutschungen. Neben Bergstürzen, für die derzeit keine Veränderung nachweisbar ist, stellen Lawinen die Ausnahme dar, hier ist aufgrund einer detaillierten Analyse des Systemverhaltens im Zeitraum von 1950 bis 2000 nicht von einer Änderung auszugehen (Latenser & Schneebeli 2002).

Tabelle 1: Projizierte bzw. prognostizierte Änderungen für Naturgefahrenprozesse im Alpenraum, nach Angaben in (Bader & Kunz 1998; Wanner et al. 2000; Solomon et al. 2007).

Prozess	Tendenzielle Entwicklung
Lawine	Gleich bleibend
Murgang	Allgemeine Zunahme
Steinschlag	Gleich bleibend bis zunehmend
Bergsturz	Keine Veränderung nachweisbar
Rutschung	Zunahme
Hochwasser	Zunahme

Dennoch können derartige Veränderungen, beispielsweise in Hinblick auf Wildbachprozesse in Österreich, bislang nicht unmittelbar nachgewiesen werden. In Abb. 2 ist das Ergebnis einer Analyse der Wildbachereignisse in Österreich für die Periode 1950–2009 wiedergegeben. Obwohl einige Jahre mit einer deutlich erhöhten Ereignisanzahl auffällig sind, kann ein genereller Trend einer Zunahme nicht bestätigt werden. Diese Schlussfolgerung ergibt sich auch aus der Analyse der teuerungsbereinigten Wildbachschäden (Fuchs 2009).

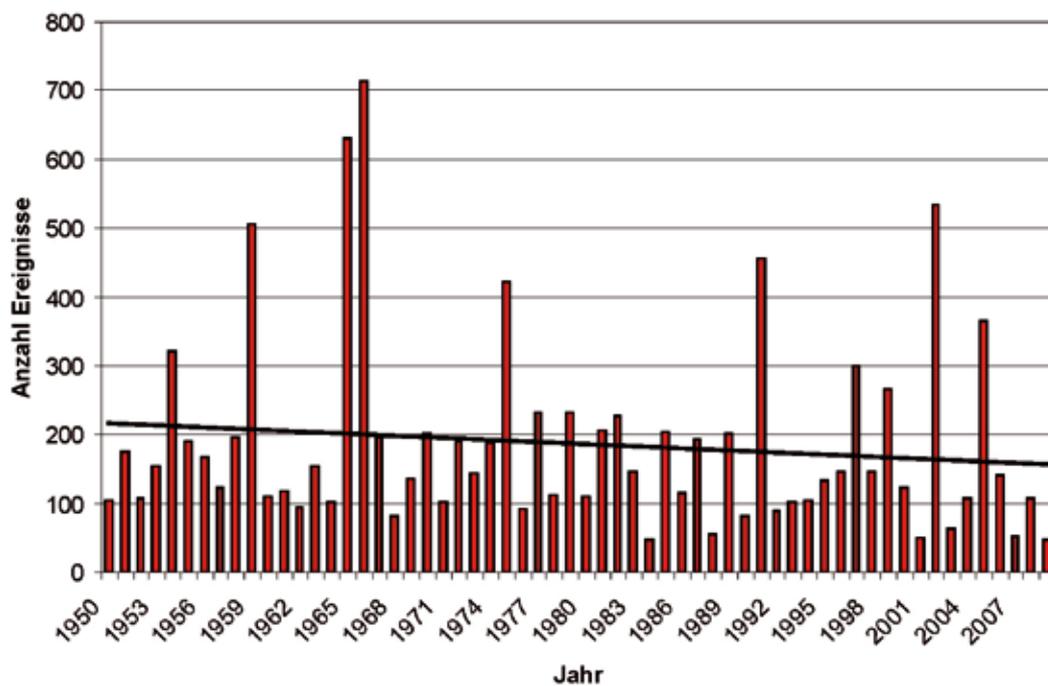


Abb. 2: Anzahl der Wildbachereignisse in Österreich für den Zeitraum 1950–2009 (Datenquelle: Institut für alpine Naturgefahren und Oberndorfer et al. 2007).

Konzeptionell interessant ist der Umgang mit dem zu erwartenden Klimawandel im österreichischen Alpenraum aber dennoch, da sich die Ausweisung der Gefahrenzonen auf das so genannte Bemessungsereignis bezieht. Dieses stellt im Bereich der Wildbach- und Lawinengefahren ein seltenes Ereignis mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von rund 150 Jahren dar (Republik Österreich 1976). Eine Änderung der zugrunde liegenden Zeitreihen führt hier möglicherweise zu einer Änderung der Abgrenzungskriterien, und kann in weiterer Folge zu einer räumlichen Ausdehnung

der Gefahrenzonen führen. Dies hat wiederum unmittelbare Auswirkungen auf die Anzahl exponierter Objekte, und somit auf das Risikomanagement.

3 Änderungen im Kulturräum

Sozioökonomische Änderungen der Strukturen in Berggebieten haben Veränderungen des Schadenspotenzials zur Folge. Diese Veränderungen können in eine lang- und eine kurzfristige Variabilität unterteilt werden, hier kommen jeweils unterschiedliche Muster zum Tragen.

3.1 Langfristige Aspekte

Aufbauend auf dem Konzept regionaler Entwicklungstypen zeigt eine erste systematische und quantifizierende Analyse des sozioökonomischen Strukturwandels im Alpenraum starke räumliche Disparitäten auf (Bätzing 1993), die mit einer langfristigen Veränderung der Bevölkerung in Verbindung gebracht werden. Diese kleinmaßstäbigen Phänomene werden auch auf meso- und mikroskaligen Betrachtungsebenen widergespiegelt. Abb. 3 veranschaulicht dies anhand zweier Fotografien der Ortschaft Davos (Schweiz), deutlich ist hier die Verdichtung der Siedlungsstruktur sowie die Ausdehnung des Siedlungsraumes zu erkennen. Die entsprechende Steigerung exponierter Werte ist für dieses Beispiel von Fuchs & Bründl (2005) dokumentiert worden, und in Abb. 4 wiedergegeben. Die langfristige Steigerung der Anzahl Gebäude und der zugehörigen Werte wurde auch für andere alpine Siedlungen nachgewiesen, beispielsweise in Keiler (2004) für die Ortschaft Galtür (vgl. Abb. 4), und in Keiler et al. (2006) für weitere Orte im österreichischen Paznauntal.



Abb. 3: Siedlungsentwicklung im Alpenraum am Beispiel Davos (Schweiz); links 1940er-Jahre, rechts im Jahr 2002. Fotos: J. Trauffer (links), S. Fuchs (rechts).

In Davos hat sich die Anzahl der gefährdeten Gebäude von 1950 bis 2000 fast verdreifacht, der Wert ist um den Faktor 4 gestiegen, wobei der Großteil der Steigerungen in der Kategorie Wohn-

gebäude zu verzeichnen ist. In Galtür hat sich die Anzahl gefährdeter Gebäude im gleichen Untersuchungszeitraum mehr als verdoppelt, und der zugehörige Wert ist um den Faktor 5 gestiegen, wobei hier in der Kategorie der Beherbergungsbetriebe die höchsten Steigerungen zu beobachten sind.

Wird die Entwicklung des Schadenspotenzials zusätzlich einer detaillierten räumlichen Analyse unterzogen, ergeben sich bemerkenswerte Differenzen. In den gelben Gefahrenzonen in Galtür sind die gefährdeten Gebäudewerte im Untersuchungszeitraum um den Faktor 9 angestiegen, diese Steigerung liegt somit auch über den der gesamten Gemeinde (Faktor 8). Wird ein 10-m-Bereich im direkten Anschluss an die gelbe Zone betrachtet – also im offiziell „sicheren“ Gebiet – so kann ein Anstieg der Gebäudewerte um den Faktor 15 festgestellt werden. Diese Steigerung erfolgte nach Fertigstellung des Gefahrenzonenplans. Dementsprechend spiegelt sich hier die Berücksichtigung des Gefahrenzonenplans in der Flächenwidmung der Gemeinde wider (Keiler & Stötter 2004). Diese Entwicklung führte dazu, dass sich in diesem unmittelbar den Zonen anschließenden schmalen Bereich ungefähr dieselbe Summe an Gebäudewerten befindet wie in den Gefahrenzonen. Eine ähnliche Entwicklung ist auch in Davos zu beobachten, hier würde eine Ausdehnung der derzeit gültigen Gefahrenzonenpläne um 10 m die Anzahl gefährdeter Gebäude um rund ein Drittel ansteigen lassen, die Anzahl der gefährdeten Personen würde sich verdoppeln (Fuchs & Bründl 2005).

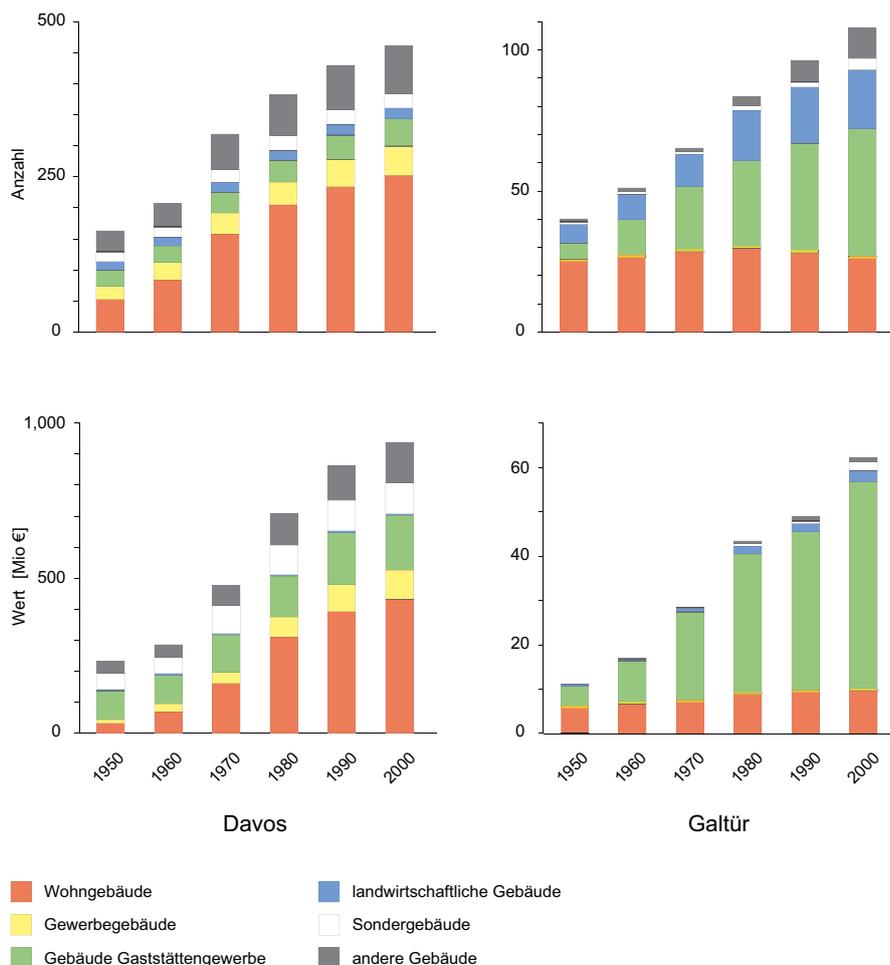


Abb. 4: Steigerung der Anzahl und Werte gefährdeter Gebäude in Davos (CH, links) und Galtür (A, rechts), aus Fuchs & Keiler (2008).

Die Anzahl der in Bergregionen anwesenden Touristen ist in den vergangenen Dekaden ebenfalls langfristig markant gestiegen, wie in *Abb. 5* exemplarisch für die Gemeinde Galtür anhand der Anzahl Gästebetten dargestellt. Entsprechend einer räumlich differenzierenden Analyse der Steigerungen bei den Gebäudezahlen halten sich in gefährdeten Gebieten heute grundsätzlich wesentlich mehr Personen auf als in vergangenen Dekaden, vor allem während der Wintermonate ist dies evident (*Abb. 6*).

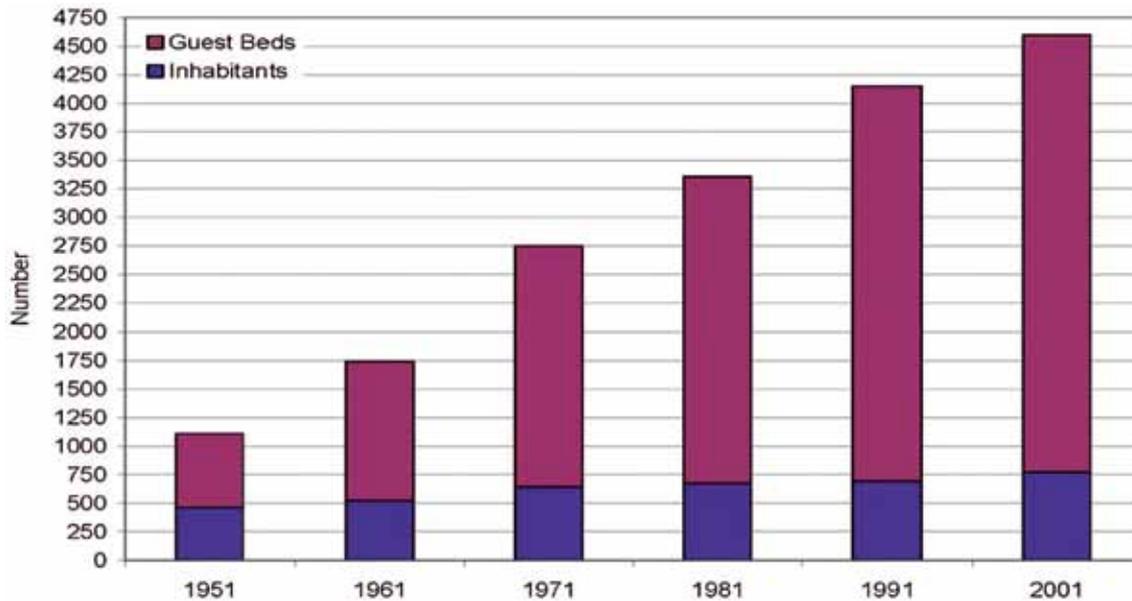


Abb. 5: Entwicklung der Einwohnerzahlen und Gästebetten in Galtür für den Zeitraum 1951–2001, aus Keiler (2004).

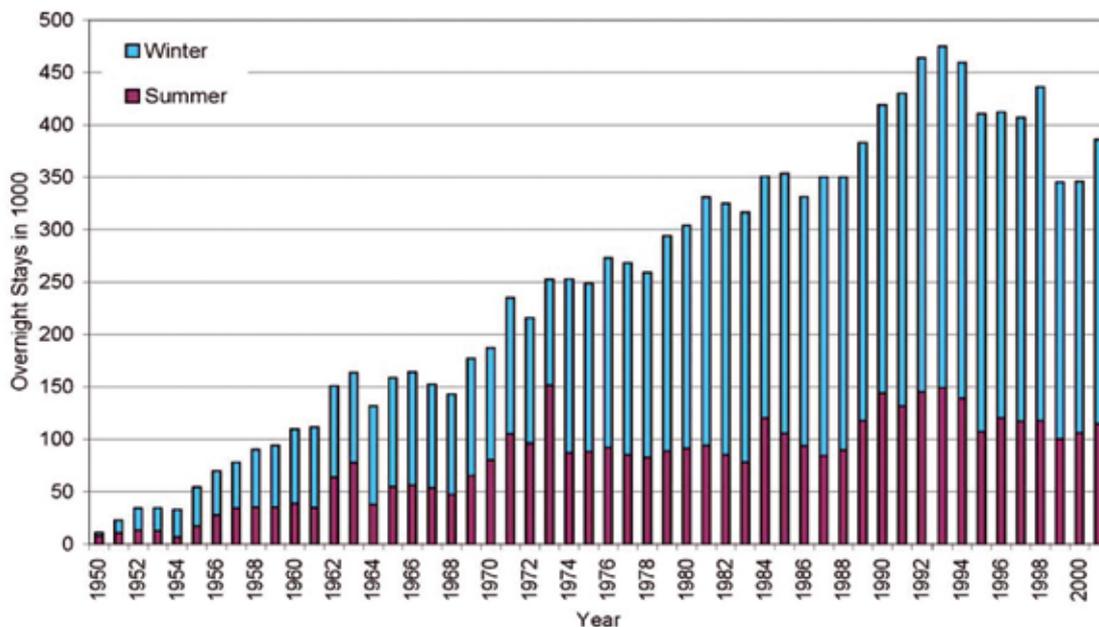


Abb. 6: Entwicklung der Nächtigungszahlen in Galtür im Zeitraum 1950–2000, aus Keiler (2004).

3.2 Kurzfristige Aspekte

Parallel zu diesen langfristigen Änderungen des Schadenspotenzials finden sich kurzfristige Fluktuationen, die vor allem mobile Werte und Personen betreffen. Diese Schwankungen können quantifiziert werden, und untergliedern sich weiter auf verschiedenen aufgelösten Zeitskalen in saisonale, wöchentliche und stündliche Variationen (vgl. Abb. 7, Keiler et al. 2005). Maximalwerte in der Anwesenheit von Personen in gefährdeten Siedlungsbereichen alpiner Tourismusdestinationen finden sich während der typischen winterlichen Hochsaison in der Zeit um Weihnachten, Ende Februar und Ostern. Diese Perioden stimmen häufig mit Zeitabschnitten erhöhter Lawinenaktivität überein, wie eine Analyse der entsprechenden Lawinenlageberichte gezeigt hat (Fuchs et al. 2004b). Über den gesamten Betrachtungszeitraum ändert sich für das Untersuchungsgebiet die Anzahl Personen um den Faktor 6. Der wöchentliche Rhythmus der Tourismusbewegungen ist dabei evident, und wird von tageszeitlichen Schwankungen mit einem Faktor zwischen 1,4 (Nebensaison) bis 3,4 (Hauptsaison) überlagert (Abb. 7).

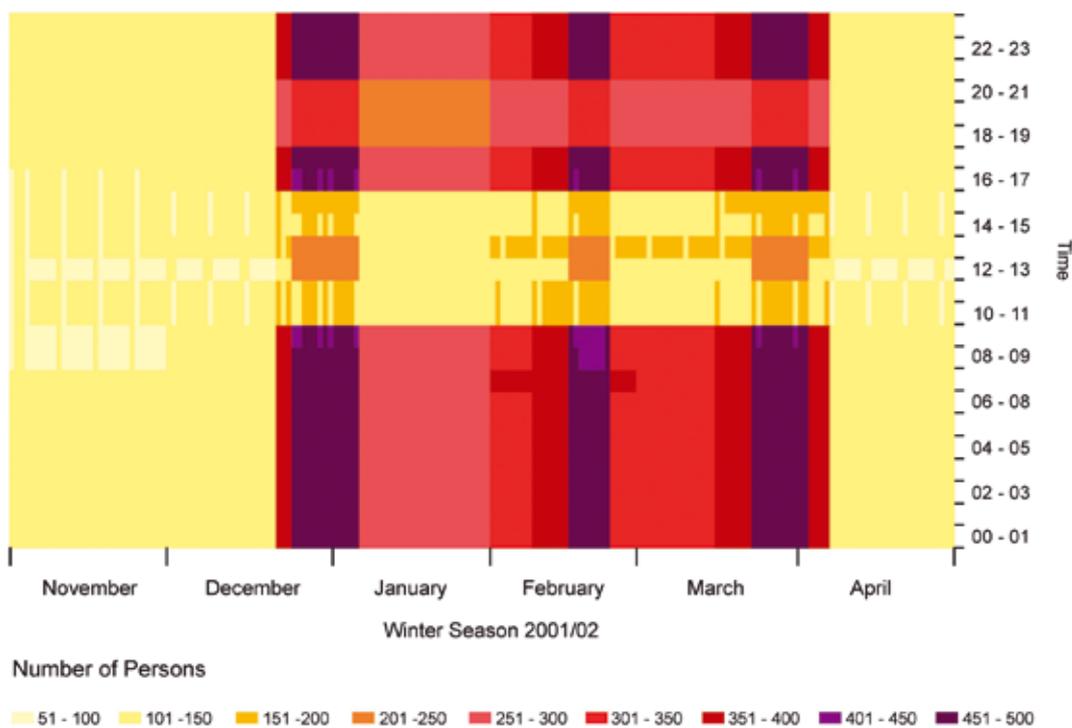


Abb. 7: Saisonale, tägliche und stündliche Variationen der exponierten Personen in Galtür (Keiler et al. 2005).

4 Zusammenfassung

Prozesse des Global Change (im Sinne des Human-Dimension-Programms definiert als Veränderung des Naturraums und des Kulturrums) manifestieren sich speziell im Alpenraum des 20. Jahrhunderts über intensive Veränderungen. Hierbei ist zukünftig von einer gewissen Zunahme der Prozessintensität bzw. Eintretenswahrscheinlichkeit der Prozesse auszugehen, an denen fließendes Wasser beteiligt ist (Hochwasser, Mur- und Rutschprozesse, Solomon et al. 2007). Ebenso bedeutsam sind aber zeitgleich ablaufende Prozesse im Kulturräum, speziell veränderte Präsenz wahr-

scheinlichkeiten von Personen und mobilen Objekten sowie die damit verbundenen exponierten Werte durch Veränderungen der Wirtschafts- und Sozialstrukturen. Langfristige Veränderungen im Prozess- sowie im sozioökonomischen Bereich werden somit durch kurzfristige Fluktuationen überlagert, die zu Risikospitzen führen können (Fuchs & Keiler 2008).

Eine multitemporale Betrachtung im Sinne der Risikoanalyse erfasst Veränderungen mehrerer Faktoren in einem Untersuchungsgebiet über einen definierten Zeitraum. Hierbei wird die Analyse auf mehreren Zeitskalen verknüpft, um die wesentlichen das Risiko beeinflussende Parameter mit den zugrunde liegenden Einflussfaktoren bewerten zu können. Die zeitliche Komponente bei der Beurteilung naturgefahreninduzierter Risiken verläuft somit multitemporal kombiniert auf einer langfristigen sowie auf einer kurzfristigen Skala.

Die Skalenabhängigkeit ist eine Grundeigenschaft aller auf der Landoberfläche ablaufenden Prozesse. Das Problem der Skalierung hat dabei zwei wesentliche Komponenten: Direkte Messungen sind in der Regel beschränkt auf kleine Raum- und Zeitausschnitte, und sind auf die jeweils übergeordnete Ebene nicht unmittelbar übertragbar, da sie sich in ihren Eigenschaften unterscheiden. Umgekehrt vermögen großflächige Prognosen, wie sie derzeit etwa vom IPCC in regelmäßigen Abständen publiziert werden, regionale Unterschiede nur eingeschränkt wiederzugeben. Ein direktes Up- bzw. Downscaling ist aus diesem Grund nicht möglich, vielmehr muss eine kombinierte Betrachtung und Bewertung auf verschiedenen Skalen durchgeführt werden. Dies gilt für den Klimawandel ebenso wie für Änderungen sozioökonomische Strukturen, die in einer Erhöhung des exponierten Schadenspotenzials münden können, und hat direkte Einfluss auf die Strategien des Risikomanagements. Diese Entwicklungen haben jüngst auf europäischer Ebene zur Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken geführt; hier ist explizit die Erstellung von Risikokarten gefordert (Europäische Kommission 2007).

Risikoanalysen, die für Naturgefahren durchgeführt werden, sind im Allgemeinen statische Ansätze, jedoch unterliegen naturgefahreninduzierte Risiken einer zeitlichen Variabilität, da risikobeeinflussende Faktoren (Prozesse, Objektwerte, Verletzlichkeit) in lang- sowie kurzfristigem Rahmen veränderlich sind. Insofern können hohe Schäden im Falle von Extremereignissen nicht ausgeschlossen werden, da sich eine Risikoreduktion immer auf die Berechnung der entsprechenden Bemessungsereignisse bezieht. Diese unterliegen wiederum aufgrund der Prozesse des Klimawandels einer Variabilität. Extremereignisse wie die Ereignisse des Lawinenwinters 1999 sowie die Hochwässer in den Jahren 2002, 2005 und 2006, haben dies gezeigt (Keiler et al. 2010).

Literatur

- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. & Nieplova, E. (2007): HISTALP - Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27 (1): 17-46.
- Bader, S. & Kunz, P. (eds.) (1998): *Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz*. Zürich, vdf-Hochschulverlag.
- Bätzing, W. (1993): *Der sozio-ökonomische Strukturwandel des Alpenraumes im 20. Jahrhundert*. Bern, Geographisches Institut der Universität Bern (= Geographica Bernensia P26).

- Böhm, R. (2009a): Klimarekonstruktion der instrumentellen Periode – Probleme und Lösungen für den Großraum Alpen. In: Schmidt, R., Matulla, C., Psenner, R. (eds.): Klimawandel in Österreich. Innsbruck, Innsbruck University Press: 145-164.
- Böhm, R. (2009b): Geändertes Umfeld durch Klimawandel? Wildbach- und Lawinenverbau 163: 34-50.
- Europäische Kommission (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union L 288/28.
- Fuchs, S., Hama, M., Keiler, M., Seitz, M. & Zischg, A. (2004a): Aspekte zum Lawinenrisiko im Siedlungsraum und auf Verkehrsachsen. In: Kuratorium für alpine Sicherheit (ed.): Sicherheit im Bergland. Jahrbuch 2004. Innsbruck, Österreichisches Kuratorium für alpine Sicherheit: 91-98.
- Fuchs, S., Bründl, M. and Stötter, J. (2004b). Development of avalanche risk between 1950 and 2000 in the municipality of Davos, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4 (2): 263-275.
- Fuchs, S. & Bründl, M. (2005): Damage potential and losses resulting from snow avalanches in settlements of the canton of Grisons, Switzerland. *Natural Hazards* 34 (1): 53-69.
- Fuchs, S. & Keiler, M. (2008): Variability of natural hazard risk in the European Alps: evidence from damage potential exposed to snow avalanche. In: Pinkowski, J. (ed.): *Disaster Management Handbook*. London, Taylor & Francis: 267-279.
- Fuchs, S. (2009): Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria – Paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2): 337-352.
- Haeberli, W., Käab, A., Hölzle, M., Bösch, M., Funk, M., Vonder Muehll, D. & Keller, F. (1998): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Zürich, vdf-Hochschulverlag.
- Houghton, J., Yihui, D. & Griggs, D. (eds.) (2001): *Climate change 2001. The scientific basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Keiler, M. (2004): Development of the damage potential resulting from avalanche risk in the period 1950-2000, case study Galtür. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4 (2): 249-256.
- Keiler, M. & Stötter, J. (2004): Aspekte der Entwicklung des Schadenpotentials bei Lawinenrisiken am Beispiel Galtür. *Proceedings Internationales Symposium Interpraevent, Riva del Garda, 24.-27. Mai, Band 2, VI/139-VI/150*.
- Keiler, M., Zischg, A., Fuchs, S., Hama, M. & Stötter, J. (2005): Avalanche related damage potential - changes of persons and mobile values since the mid-twentieth century, case study Galtür. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (1): 49-58.
- Keiler, M., Zischg, A. & Fuchs, S. (2006): Methoden zur GIS-basierten Erhebung des Schadenpotenzials für naturgefahreninduzierte Risiken. In: Strobl, J. & Roth, C. (eds): *GIS und Sicherheitsmanagement*. Heidelberg, Wichmann: 118-128.
- Keiler, M., Knight, J. & Harrison, S. (2010): Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 368: 2461-2479.
- Latenser, M. & Schneebeli, M. (2002): Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland. *Natural Hazards* 27 (3): 201-230.
- Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. & Benz, C. (1998): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gletscher und deren Vorfelder. Zürich, vdf-Hochschulverlag.
- Oberndorfer, S., Fuchs, S., Rickenmann, D. & Andrecs, P. (2007): Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich. Wien, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (= BFW-Report 139).
- Parry, M., Canziani, O. & Palutikof, J. (eds.) (2007): *Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability: Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press.

Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren

- Republik Österreich (1976): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft vom 30. Juli 1976 über die Gefahrenzonenpläne. Wien, BGBl 436/1976.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. & Miller, H. (eds.) (2007): Climate change 2007. The scientific basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press.
- Stötter, J., Maukisch, M., Simstich, J. & Belitz, K. (1996): Auswirkungen des zeitlich-räumlichen Wandels der Permafrostverteilung im Suldental (Ortlergebiet) auf das Gefährdungspotential durch Erosionsprozesse. Proceedings Internationales Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, 29. Mai - 03. Juni, Band 1, 447-457.
- Wanner, H., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Rickli, R., Salvisberg, E. & Schmutz, C. (2000): Klimawandel im Schweizer Alpenraum. Zürich, vdf-Hochschulverlag.

Anschrift des Autors:

PD Dr. Sven Fuchs
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien
E-Mail: sven.fuchs@boku.ac.at

Konsequenzen des Klimawandels für das Ertragspotenzial und den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion

Josef Eitzinger, Gerhard Kubu und Sabina Thaler

Einleitung

Die Landwirtschaft hat großen Einfluss auf die regionalen Wasserressourcen und ist in vielen Ländern der größte Wasserverbraucher. Weltweit beträgt die landwirtschaftliche Produktion aus der Bewässerungslandwirtschaft ungefähr das Doppelte im Vergleich zur Produktion aus nicht bewässerter Produktion, obwohl der Flächenanteil der bewässerten Landwirtschaft nur ca. 25 % beträgt (FAO, 2004). Durch die Zunahme der Weltbevölkerung, die nicht mehr ausdehnbaren landwirtschaftlichen Nutzflächen und die veränderten Ernährungsgewohnheiten ist Bewässerung sowie eine effiziente Wassernutzung für die landwirtschaftliche Produktion eine der größten Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte (Sivakumar and Motha, 2007). In Europa erwartet man durch den Klimawandel in vielen Regionen eine weitere Verknappung der Wasserreserven, insbesondere jene, die für die landwirtschaftliche Bewässerung genutzt werden. Insbesondere der Mittelmeerraum als auch Südosteuropa werden davon betroffen sein (IPCC, 2007; Alexandrov and Eitzinger, 2007; Olesen and Bindi, 2004). Im Mittelmeerraum werden schon jetzt 60–80 % der Wasserreserven für die Bewässerung verbraucht (in Europa im Mittel ca. 24 %), (EEA, 2009). Auch in Mitteleuropa sind vor allem während des Sommers, also der Hauptwachstumsperiode vieler Nutzpflanzen zunehmend trockenere Bedingungen zu erwarten bzw. auch ein erhöhter Wasserverbrauch und Wasserbedarf vieler Nutzpflanzen. Weltweit werden daher große Anstrengungen unternommen um die Wassernutzungseffizienz in der landwirtschaftlichen Produktion, sei es in der Bewässerungslandwirtschaft als auch für nicht bewässerte Produktion zu verbessern, um das Produktionspotenzial auch unter veränderten Klimabedingungen zumindest erhalten zu können.

Klimawandel und Wasserbilanz von Nutzpflanzen

Der Wasserbedarf landwirtschaftlicher Nutzpflanzen hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst gibt es pflanzenart- und sortenspezifische Unterschiede des Wasserverbrauchs pro Einheit gebildeter Trockensubstanz, die neben genetischen Einflüssen auch von mehreren Umweltfaktoren, wie der Düngung oder dem Wachstumsverlauf, abhängig ist. *Tabelle 1* zeigt dazu typische Schwankungsbereiche verschiedener Nutzpflanzen. Der Wasserbedarf von Pflanzenbeständen insgesamt hängt zusätzlich von der gebildeten Biomasse pro Flächeneinheit (bzw. vom Ertrag) und auch von der Bestandstruktur und der Bodenbearbeitung ab (welche die unproduktive Verdunstung bzw. den Oberflächenabfluss von der Bodenoberfläche bestimmt).

Zur Beurteilung des Einflusses des Klimawandels, muss der Wasserbedarf von einjährigen Nutzpflanzen gesondert im Vergleich zum Wasserbedarf mehrjähriger Kulturen (wie Grünland, Dauerkulturen) betrachtet werden, da hier die Dauer der Wachstumsperiode durch die Erwärmung im Normalfall verkürzt wird. Dabei verursacht eine verkürzte Wachstumsdauer auch einen niedrigeren Wasserverbrauch (v. a. durch die geringere akkumulierte Transpirationsleistung).

Tabelle 1: Transpirationskoeffizienten (Spannbreite verschiedener Quellen) und Wasserverbrauch ausgewählter Kulturpflanzen (abgeleitet aus mittlerem Ertragsniveau) (nach Eitzinger et al., 2009a)

Kulturart	Transpirationskoeffizient [l Wasser / kg Trockenmasse]	Gesamtwasserverbrauch der Pflanzenbestände pro Wachstumsperiode (mm)
W. Weizen	308–690	460
W. Gerste	310–521	400
W. Roggen	400	350
S. Gerste	218–521	300
Mais	180–400	530
Energiemais	180–400	800
Kartoffel	182–636	450
Zuckerrübe	176–400	480
W. Raps	600–700	480
Luzerne	800	700
Buschbohne	206–400	250
Weißkohl	296–600	300
Gurke	220–430	290
Zwiebeln	350–600	350
Wein	370–430	400–700

Generell werden für Europa unter künftigen Klimaszenarien neben dem saisonal unterschiedlichen, aber ganzjährigen Erwärmungstrend zunehmende Winter- und abnehmende Sommer-niederschläge erwartet, mit räumlich signifikanten, aber sehr unsicheren Unterschieden in den erwarteten Änderungen. Im Mittelmeerraum und Südosteuropa ist demnach auch mit stärkeren Rückgängen in den Jahresniederschlägen zu rechnen, wobei diese in Nordeuropa zunehmen (vor allem aufgrund stärkerer Winterniederschläge). Mitteleuropa und Österreich liegen dabei in einem Übergangsbereich (vgl. Eitzinger, 2007; Eitzinger et al., 2009a). Insgesamt ergibt sich wegen abnehmender bzw. stagnierender Sommerniederschläge und der ganzjährigen Erwärmung für ganz Europa eine Zunahme des Verdunstungspotenzials und eine Trend zu mehr Trockenheit für die Sommerperiode. Im europäischen Überblick grober Auflösung (hier sind keine hochaufgelösten regionalen, sondern nur globale Klimaszenarien berücksichtigt) zeigt *Abb. 1* dazu wie sich die mittlere Wasserbilanz (ausgedrückt in der mittleren Anzahl von Wasserstresstagen durch ein Ungleichverhältnis von aktueller zu potenzieller Verdunstung) einer Referenz-Vegetationsdecke (Gras) in verschiedenen Perioden im 20. Jahrhundert gestaltet hat bzw. wie sich diese unter künftigen Klimaszenarien darstellt. Im Vergleich zur Periode 1961–1990 ist demnach ein deutlicher Trend zu mehr Wasserstress für Pflanzen in den nächsten Dekaden und zumindest bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten, wobei dieser natürlich aufgrund der natürlichen Klimavariabilität immer wieder durch „feuchtere“ Zwischenperioden unterbrochen werden kann. Diese natürliche Klimavariabilität zeigt sich zum Beispiel auch darin dass die Periode 1901–1930 aufgrund geringerer Niederschläge trockener war als die Periode 1961–1990 (vgl. in Eitzinger et al., 2009a). In ähnlicher Weise kann daraus der potenzielle Wasserbedarf bzw. Bewässerungsbedarf zur Sicherstellung eines optimalen Wachstums für die Vegetationsperiode im Sommer abgeleitet werden, der bis

zu den 2050er-Jahren demnach fast überall in Europa zunimmt. Daraus lässt sich schließen, dass in vielen Regionen mit Bewässerungslandwirtschaft Wasserknappheit ein zunehmendes Problem sein wird, sofern nicht entsprechende Anpassungsmaßnahmen gesetzt werden.

Am Beispiel des Winterweizens wurde in verschiedenen Studien für Mitteleuropa der Zusatzwasserbedarf für eine Erhaltung des Ertragspotenzials abgeschätzt (Eitzinger et al., 2009a, Eitzinger, 2010). Nach Simulationsstudien für Trockenregionen in Deutschland (Magdeburg) würde ohne Berücksichtigung des direkten CO₂-Effekts auf die Pflanzen (der eine etwas höhere Wassernutzungseffizienz bedingt) durch das veränderte Klima der Zusatzwasserbedarf durch Bewässerung von derzeit etwa 115 mm pro Jahr um durchschnittlich ca. 40 mm für den Zeitraum bis 2050 ansteigen. Durch die bessere Wassernutzungseffizienz bei erhöhter CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird jedoch lediglich ein durchschnittlicher Anstieg des Zusatzwasserbedarfs um 6 mm/Jahr bei Winterweizen berechnet. Für das Marchfeld in Österreich ergab eine ähnliche Simulation einen Zusatzwasserbedarf bei Winterweizen von ca. 30 mm – das entspricht ungefähr einer Beregnungsgabe – für die 2050er-Jahre mit CO₂-Effekt, auf mittelschwerem Boden. Der hier etwas höhere Wert ist auf die größere Sommertrockenheit in dieser Region zurückzuführen. Da Winterweizen die Wachstumsperiode zum Sommer hin abgeschlossen hat und die Winterfeuchte besser nutzen kann als Sommerkulturen (wie Sommergetreide, Mais, Zuckerrübe) sind diese Werte für Nutzpflanzen als eine untere Grenze für den zusätzlichen Wasserbedarf unter Klimaszenarien zu sehen (Thaler et al., 2010). Bei Kulturen wie Mais, Zuckerrübe, aber auch Dauerkulturen wie Grünland, Wein oder Obstgehölze dürfte der Zusatzwasserbedarf im Sommer ein mehrfaches dieses Wertes betragen. In trockenen Regionen wie im Marchfeld kann dieser zusätzliche Wasserbedarf zur Erhaltung des Ertragsniveaus im langjährigen Mittel nicht durch Niederschlag abgedeckt werden was einen entsprechend höheren Bewässerungsbedarf zur Folge hat.

Ein für die Pflanzenproduktion nicht unwesentlicher Aspekt ist die Wasserspende aus der Schneeschmelze, welche in Mitteleuropa für viele Winter- und Sommerkulturen ein wichtiger Faktor der Wasserversorgung für die Hauptwachstumsperiode darstellt. Dies deshalb, da eine Schneedecke das Wasser für eine gewisse Zeit am Standort konserviert und dessen Verfügbarkeit näher zur Wachstumsperiode der Nutzpflanzen rückt. Da durch die zunehmend wärmeren Winter im langfristigen Mittel die Dauer der Schneedecke und auch ihr Wasseräquivalent abnimmt (häufigere Regen- und weniger Schneefallereignisse) wird dieser Effekt abnehmen (*Abb. 2*). Inwieweit dieser für die Wasserversorgung im Frühjahr negative Effekt durch zunehmende Winterniederschläge ausgeglichen wird ist sicher standortspezifisch unterschiedlich, allerdings noch nicht umfassend untersucht.

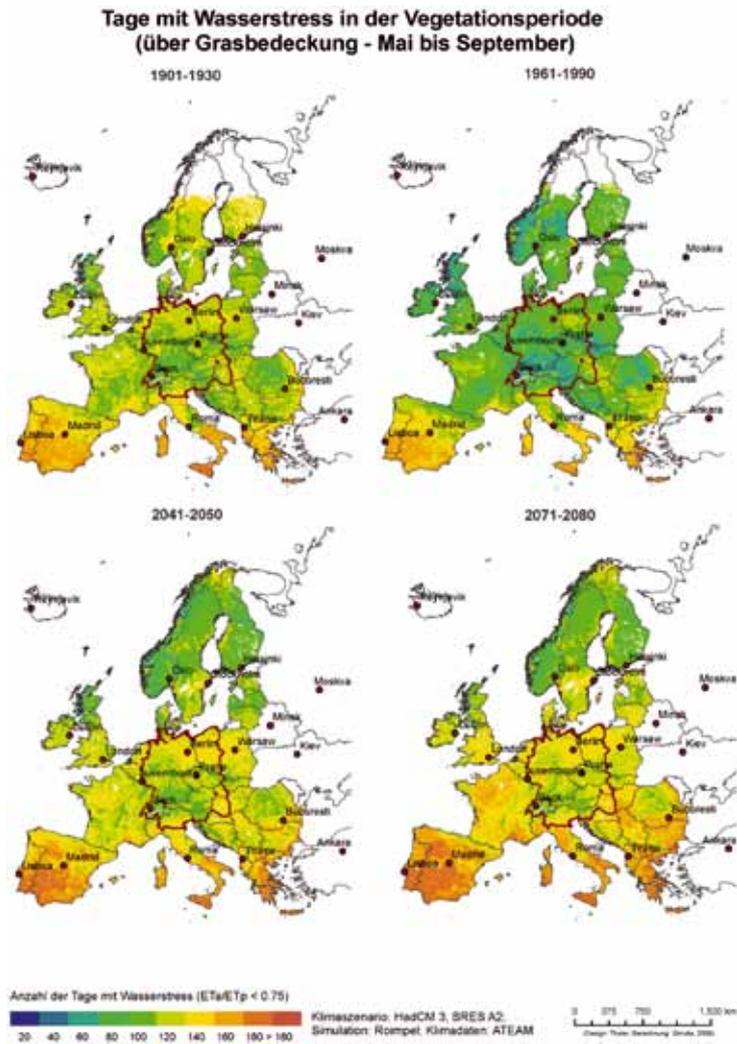


Abb. 1: Veränderung der Anzahl von Tagen mit Wasserstress für Grünland im 20. Jahrhundert und unter einem Klimaszenario des 21. Jahrhunderts (Eitzinger, 2010).

**Abnahme der Wasserspende durch Schneeschmelze von
1961-1990 bis 2011-2040 (ECHAM4)**

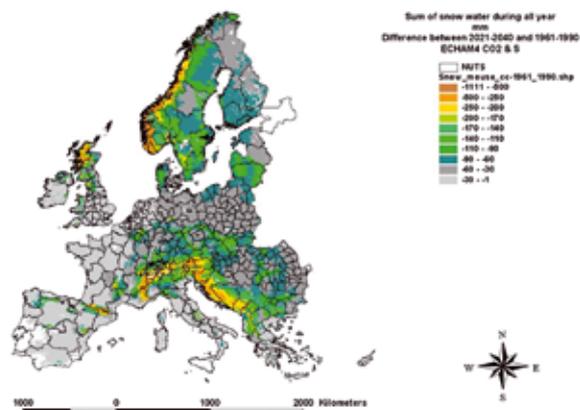


Abb. 2: Veränderung der Wasserspende aus der Schneeschmelze in Europa durch zunehmend wärmere Winter (Beispiel Klimaszenario ECHAM 4), (Eitzinger et al., 2009c).

Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionspotenzial der Pflanzenproduktion

Die Beurteilung der Auswirkungen eines regionalen Klimawandels (d. h. eine Veränderung des regionalen Klimas der vergangenen Jahrzehnte und seiner natürlichen Variabilität) hinsichtlich des regionalen landwirtschaftlichen Produktionsrisikos bzw. möglicher Anpassungsmaßnahmen zur Reduzierung dieser Risiken rückt zunehmend in den Mittelpunkt des Forschungsinteresses und gewinnt an Wert für Entscheidungsträger aus der Politik und der Praxis bzw. für Landwirte.

Bisherige Forschungsergebnisse zu den Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Österreich zeigen folgendes allgemeines Bild :

- Etliche Studien für den mitteleuropäischen Raum kommen zu dem Ergebnis das bei einer mäßigen mittleren Temperaturerhöhung bis ca. 2 °C (wie bis zu den 2040er-Jahren erwartet) die positiven Effekte auf das Ertragspotenzial in der Landwirtschaft in Summe überwiegen könnten, darüber hinaus dann zunehmend negative Effekte auftreten würden.
- Die regionalen Unterschiede im Ertragspotenzial generell nehmen zu, aufgrund unterschiedlicher Wasserversorgung (z. B. Bodenwasserspeichervermögen). Standorte schlechter Böden verlieren gegenüber Standorten mit guten Böden. Ebenso zeichnet sich an Standorten wo die Wasserversorgung als begrenzender Produktionsfaktor wirkt eine zunehmende zwischenjährige Ertragsvariabilität ab.
- Es erfolgt eine Verschiebung der Temperaturzonen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Phänologie und das Wachstum der Kulturpflanzen (die Vegetationszeit wird um ca. 7–10 Tage pro Dekade länger, beginnt früher und die Entwicklungsraten der Pflanzen werden beschleunigt). Das Produktionspotenzial in bisher von der Temperatur begrenzten Anbauregionen würde sich insbesondere durch eine verlängerte Vegetationsperiode verbessern, wie z. B. der Futtergewinnung in vielen niederschlagsreichen Grünlandregionen. Das Risiko von Frostschäden durch Spätfröste, insbesondere bei Obstkulturen, könnte sich durch die frühere Vegetationsperiode an verschiedenen Standorten auch erhöhen.
- Die zunehmenden Temperaturen erhöhen das Verdunstungspotenzial überproportional, was eine Zunahme der Beanspruchung der Bodenwasserressourcen durch die Vegetation bedeutet. In den niederschlagsarmen Anbauregionen Österreichs würden insbesondere Sommerkulturen zunehmendem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sein. Wassersparende Kulturen, Anbautechniken, Fruchtfolgen werden dadurch an Bedeutung gewinnen. Eine Zunahme des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfes wäre ebenfalls eine logische Folge. Andererseits würde eine Zunahme der witterungsbedingt verfügbaren Feldarbeitstage durch trockenere Bedingungen kombiniert mit einer längeren Vegetationsperiode die Flexibilität in der Produktionstechnik erhöhen bzw. erlauben bestimmte maschinelle Kapazitäten (als Kostenfaktor) zu verringern.
- Zunehmende Temperaturen erhöhen auch bei gleichbleibender Klimavariabilität die Zahl der Hitzetage und Trockenperioden im Vergleich zur vergangenen Klimaperiode, was vor allem in den wärmeren und trockeneren Lagen eine Zunahme der Stresssituationen durch Trockenheit und Hitze für die bisher angebauten Kulturen bedeutet. Auch andere ertragsbeeinflussende Stressfaktoren die in Kombination mit Hitze auftreten, wie z. B. ertragsreduzierende Ozonschäden könnten zunehmen.

- Durch den Düngungseffekt des zunehmenden Kohlendioxidgehaltes der Luft würde sich das Ertragspotenzial der gängigen Kulturpflanzen erhöhen. Simulationsstudien ergaben einen bei Getreide bis zu den 2050er-Jahren im Schnitt leicht positiven Ertragstrend unter der Annahme gleichbleibender Klimavariabilität. Allerdings ist allgemein durch den Einfluss zunehmender Witterungsextreme auch mit geringerer Ertragsstabilität und höherem Ertragsrisiko zwischen den Jahren zu rechnen (mit entsprechenden Implikationen auf die Betriebsführung und Risikoabsicherung). Auch belegen neuere Studien mit steigender Kohlendioxidkonzentration eine veränderte Qualität des Erntegutes wie z. B. eine Verschlechterung der Kleberqualität bei Weizen.
- Eine Zunahme der Temperaturen verändert ökologische Nischen für Unkräuter, Krankheiten und Schädlinge. Diese können sich weiter ausbreiten, neu auftreten oder verschwinden, oder sich schneller entwickeln (z. B. zusätzliche Generationen). Insbesondere von Seiten der sehr temperatursensitiven Insekten droht hier Gefahr.
- Eine Zunahme von Witterungsextremereignissen birgt generell ein sehr hohes Schadenspotenzial für die Landwirtschaft, und könnte positive Auswirkungen durch z. B. eine längere Vegetationsperiode wieder zunichte machen. Dabei sind vor allem Trockenheit und Hitze (Trocken- und Hitzeschäden), Starkniederschläge (Bodenerosionsschäden, Auswinterungsschäden), Zunahme der Gewitterhäufigkeit (Hagelschäden), Stürme (Schäden im Forstbereich) zu nennen. In welchem Ausmaß sich die Häufigkeit dieser Extreme unter den Klimaszenarien verändert ist nach wie vor mit großer Unsicherheit verbunden, obwohl sich aus Messreihen – regional unterschiedliche – Veränderungen abzeichnen (wie z. B. Zunahme von Hitzeperioden).

Mögliche Anpassungsmaßnahmen

Im Vergleich zu den vielfältigen Einflüssen einer Klimaänderung auf Agrarökosysteme ist die Analyse potenzieller Anpassungsmaßnahmen durch den menschlichen Einfluss und zahlreicher Optionen noch komplexer. Potenziell realistische Anpassungsmaßnahmen müssen insbesondere die regionalen Verhältnisse berücksichtigen, sei es hinsichtlich der Klimaszenarien, der vorhandenen natürlichen Produktionsressourcen, der Produktionssysteme und sozio-ökonomischer Szenarien. Zusätzlich sollten Anpassungsstrategien auch eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion gewährleisten und sicherstellen. Alle diese Faktoren führen zu relativ hohen Unsicherheiten bzw. Bandbreiten hinsichtlich regionaler Zukunftsszenarien, was es für Entscheidungsträger erschwert konkrete Maßnahmen zu setzen. Trotz des noch großen Forschungsbedarfes lassen sich mit Hilfe des heutigen Wissens etliche Schlussfolgerungen ziehen bzw. Trends erkennen, welche das künftige Risikopotenzial und Anpassungsstrategien skizzieren.

Grundsätzlich könnte man aus agrarmeteorologischer Sicht Anpassungsmaßnahmen unterscheiden, welche einerseits auf die langfristigen Änderungen in den Mittelwerten klimatischer Parameter und andererseits auf eine Änderung von Extremwetterereignissen und deren Folgen abgestimmt sind. Im ersteren Fall reagiert man zum Beispiel auf längere Vegetationsperioden, zunehmende trockene Verhältnisse usw. durch Landnutzungsänderungen, Anpassungen in der Fruchtfolge, Sortenauswahl, Bodenbearbeitung, Verschiebung des Anbauzeitpunktes oder Effizienzsteigerung in der Schädlingsbekämpfung, um nur einige zu nennen. Im zweiten Fall liegt der Schwerpunkt z. B. auf Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenerosion durch Starkniederschläge, rechtzeitigen

Bewässerungsmaßnahmen gegen Hitze- und Trockenstress, Hagelschutzmaßnahmen, in der Erhöhung von Lagerkapazitäten oder der landtechnischen Schlagkraft.

Im europäischen und globalen Kontext spielen Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung der Wassernutzung in der Landwirtschaft eine zentrale Rolle, die nach Expertenmeinung auch in Europa noch ein beträchtliches Potenzial besitzen.

Hinsichtlich einer effektiveren Wassernutzung in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, dem größten Wasserverbraucher, stehen zudem eine Vielzahl von Maßnahmen zur Auswahl (Tabelle 2):

Tabelle 2: Beispiele von (Anpassungs-)Maßnahmen zu Verbesserung der Wassernutzungseffizienz in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion

Arbeitsfeld	Bereich der Anpassung	Beispiele wirksamer Anpassungsmaßnahmen
Produktionstechnik	Mikroklimatische Bedingungen (Windreduktion)	Acker-Forst-Mischkulturen, Mischkulturen, Hecken, Windschutzstreifen
	Fruchtfolge	Einbau wassersparender Pflanzen in die Fruchtfolge, Brache, Fruchtwechsel
	Anbauzeitpunkte	Frühere Anbauzeitpunkte im Frühjahr, Anpassung der Anbautermine an die Wasserversorgung
	Bodenbearbeitung	Reduzierte oder Minimalbodenbearbeitung, Mulchsysteme und permanente Bodenbedeckung, Verbesserung der Bodeneigenschaften hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes (Infiltrationseigenschaften, Wasserspeicherkapazität usw.) und der Durchwurzelung (Beseitigung von Bodenverdichtungen usw.)
	Düngung	Optimale Nährstoffversorgung der Pflanzen (insbes. N, P, K), Kalkung saurer Böden, Vermeidung von Überdüngung
	Sortenwahl	Trockenstresstolerante Sorten, ozontolerante Sorten, Sorten mit gutem Durchwurzelungsvermögen etc.
Bewässerung	Bewässerungsmethode	Wassersparende Methoden (als Ersatz zur Flutbewässerung), Defizitbewässerung, Alternierende Bewässerung, Tröpfchenbewässerung, Unterflurbewässerung, Anpassung an räumlich variierende Bodenwasserspeicherkapazität (Precision-Farming) usw.
	Bewässerungsplanung	Flexibilität der Bewässerungszeitpunkte verbessern: Anpassung des Zeitpunktes der Bewässerung an: empfindliche Wachstumsphasen, Witterungsbedingungen. Berücksichtigung des aktuellen Wasserstressstatus durch Simulation oder Messungen des Bodenwassergehaltes, Wasserspannung. Berücksichtigung der Bodeneigenschaften bzgl. der Höhe der Wassergabe (Vermeidung von Wasserstau und Drainage), Vor-Saat-Bewässerung usw.
	Bewässerungs-Infrastruktur	Abwassernutzung, Verringerung von Wasserverlusten in Verteilungs- bzw. Leitungssystemen, Vermeidung illegaler Wasserentnahmen, effektives Wassermanagement usw.

Arbeitsfeld	Bereich der Anpassung	Beispiele wirksamer Anpassungsmaßnahmen
Politik und Beratung	Anpassung von Regulierungsmaßnahmen, Wasserrechte; Beratung und Lehre	Wasserverbrauch als Kostenfaktor einführen, effektive Beratung der Landwirte, Problembewusstsein in Beratung und Lehre sicherstellen, Anpassung von Wasserrechten an nachhaltiges Umwelt- und Ressourcenschutzmanagement usw.
anderes	Wasserqualität	Sicherstellung der Wasserqualität, Verringerung des Salzgehaltes usw.

Im Allgemeinen lassen sich folgende Kernpunkte von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel im europäischen Kontext beschreiben (Eitzinger et al., 2009c), welche zur Umsetzung allerdings immer auf die lokalen Gegebenheiten abgestimmt werden müssen, wozu Experten- und Beraterwissen gleichsam mit dem Erfahrungsschatz der Landwirte einfließen soll.

Auswahl kurzfristig (sofort bis wenige Jahre) umsetzbarer Maßnahmen für den Landwirt:

- Verstärkte Anwendung bodenwasserkonservierender Bodenbearbeitungsverfahren (Mulchsysteme, reduzierte Bodenbearbeitung, Minimalbodenbearbeitung, Direktsaatverfahren etc.).
- Auswahl trocken- und hitzeresistenterer Arten/Sorten im Anbau.
- Anbau wärmeliebenderer Arten/Sorten, angepasst an die Verschiebung der Temperaturzonen.
- Anpassung der Anbauzeitpunkte bzw. der Feldarbeiten an die saisonalen Temperaturänderungen.
- Anpassungen in der Fruchtfolge (z. B. weniger Sommerungen wenn keine Bewässerung zur Verfügung steht).
- Sicherstellung von Maßnahmen zum Frostschutz und Hagelschutz verschiedener Kulturen.
- Sicherstellung der Risikoabsicherung (Versicherungen, Reserven, Marktinstrumente, Lagerhaltung etc.).
- Anpassungen in der Tierhaltung, vor allem Hitzeschutz (gebäudetechnische Maßnahmen, Hygienestandards, Notstromversorgung etc.).

Auswahl mittelfristig (mehrere Jahre) umsetzbarer Maßnahmen für den Landwirt bzw. für Institutionen:

- Verbesserung der Bewässerungsinfrastruktur und -technik (Vermehrung verfügbarer Wasserressourcen und Steigerung der Wassernutzungseffizienz).
- Züchtung stresstoleranterer Sorten (Trocken-, Hitze-, Ozonstress usw.).
- Ausbau bzw. Verbesserung operationeller Monitoringsysteme (Schädlinge, Krankheiten, Auswirkungen von Klimaextrema wie Trockenheit usw.).
- Risikoverteilung (Diversifizierung) durch Anbau/Nutzung verschiedener Pflanzenarten (regional als auch auf Betriebsebene) bzw. Produktionssparten (z. B. ergänzende Biomasseproduktion).
- Steigerung der Lagerkapazitäten (Vorratshaltung, Vermarktungsstrategien).
- Anpassung/Änderung der Landnutzung wie Umstieg auf ein anderes Produktionssystem (z. B. Ergänzung der Grünlandproduktion durch Futterpflanzenanbau, Nutzung weniger wasserverbrauchender Kulturen usw.).
- Verdunstungsreduzierende Maßnahmen (vor allem Windschutz) in trockenen Regionen durch Änderung von Landschaftsstrukturen (z. B. Anlegen von Windschutzhecken, Acker-

Forst-Mischnutzung usw.).

- Betriebswirtschaftliche Risikominderungsstrategien: Sicherstellung einer besseren Marktpreisstabilität einerseits (wie Nutzung von Marketingstrategien im ökologischen Landbau, Einführung von Qualitäts-, bzw. Herkunftsbegriffen (z. B. Terroirherkunft im Weinbau) usw.) und einer größeren Kostenflexibilität auf Betriebsebene andererseits (Steigerung betriebswirtschaftlicher Kosteneffizienz, Mindestreserven etc.).

Literatur

- Alexandrov, V., Eitzinger, J. (2005): The Potential Effect of Climate Change and Elevated Air Carbon Dioxide on Agricultural Crop Production in Central and Southeastern Europe. *Journal of Crop Improvement* 13 (1-2): 291–331.
- European Environment Agency (EEA), (2009): Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought, EEA Report No 2/2009.
- Eitzinger, J. (2007): Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. *Ländlicher Raum* (online) – www.laendlicher-raum.at
- Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S. (2008): Der Klimawandel und seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft. In: Dr. R. Böhm, MR DI R. Godina, o.Univ.-Prof. DI DR. H. P. Nachtnebel, DI Dr. O. Pirker, Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft, 204; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt u. Wasserwirtschaft und Österreichischer Wasser- u. Abfallwirtschaftsverband, Wien.
- Eitzinger, J., Kersebaum, K. C., Formayer, H. (2009a): Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. <http://de.agrimedia.com>, Agrimedia, D-29459 Clenze, Deutschland; ISBN: 978-3-86037-378-1
- Eitzinger, J., Kubu, G. (ed.), (2009b): Impact of Climate Change and Adaptation in Agriculture. Extended Abstracts of the International Symposium, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, June 22-23 2009. *BOKU-Met Report* 17, ISSN 1994-4179. ISSN 1994-4187 (online) – www.boku.ac.at/met/report
- Eitzinger, J, Kubu, G, Thaler, S, Alexandrov, V, Utset, A, Mihailovic, DT, Lalic, B, Trnka, M, Zalud, Z, Semeradova, D, Ventrella, D, Anastasiou, DP, Medany, M, Attaher, S, Olejnik, J, Lesny, J, Nemeshko, N, Nikolaev, M, Simota, C, Cojocar, G (2009c): Final report, including recommendations on adaptation measures considering regional aspects. Final scientific report of the ADAGIO Project: “Adaptation of agriculture in European regions at environmental risk under climate change”; Specific Support Action, FP6-2005-SSP-5-A, Proj.No.044210, Sixth Framework Programme (European Commission). Ed.: Institute of Meteorology, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna (BOKU), 450p. (online) – www.adagio-eu.org
- Eitzinger, J. (2010): Der Klimawandel – seine Auswirkungen auf agrarmeteorologische Aspekte und Anpassungsoptionen für die Landwirtschaft im europäischen Kontext.. *Ländlicher Raum*, 3, 1-11.
- Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO), FAO Statistical Yearbook, 2004 Vol. 1, 2, Rome, 2004.
- IPCC, (2007): Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC (978 0521 88010-7 Hardback; 978 0521 70597-4 Paperback).
- Olesen, J.E.; Bindi, M. (2004): Agricultural impacts and adaptations to climate change in Europe. *Farm Policy Journal*, 1: 36-46.
- Sivakumar, MVK., Motha, R. (Eds.), (2007): *Managing Weather and Climate Risks in Agriculture*, 554; Springer, Berlin.
- Thaler, S., Eitzinger, J., Rischbeck, P., Dubrovsky, M., Trnka, M. (2010): Vulnerability of crops to climate change in Northeastern Austria.. *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 15/1, 50-61.

Anschrift der AutorInnen:

ao.Univ.-Prof. DI Dr. Josef Eitzinger

DI Gerhard Kubu

Mag.^a Sabina Thaler

Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Meteorologie

Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien

E-Mail: josef.eitzinger@boku.ac.at

Wasserkrafterzeugung bei Klimaveränderungen

Philipp Stanzel und Hans Peter Nachtnebel

Kurzfassung

Der Wasserkraftanteil am Stromverbrauch in Österreich fiel von 71 % (1999) auf 56 % (2005) und sank in dem trockenen Jahr 2006 sogar auf den historischen Tiefstand von 52 %. Die durchschnittliche hydroelektrische Energieerzeugung deckt derzeit in Österreich etwa 60 % des Bedarfes. Der Rückgang dieses für Österreich wichtigen Anteils ist durch den steigenden Bedarf bei gleichzeitig stagnierender Kapazität zu erklären.

Im vorliegenden Beitrag werden die Auswirkungen prognostizierter Klimaänderungen auf die Energieerzeugung aus Wasserkraft analysiert. Dafür wurden Klimaszenarien des regionalen Klimamodells REMO-UBA für das gesamte 21. Jahrhundert als Eingangsdaten für ein hydrologisches Modell aller Einzugsgebiete Österreichs angewendet. Es wurden die IPCC-Szenarien A1B, A2 und B1 herangezogen, die unterschiedliche Entwicklungen der globalen Treibhausgasemissionen beschreiben. Das hydrologische Modell berechnet die wesentlichen Wasserbilanzkomponenten wie Schneespeicherung, Bodenwasserspeicherung, Verdunstung und Abflussbildung. Aus den modellierten Abflussreihen wurde für den bestehenden Kraftwerkspark die Energieerzeugung abgeleitet.

Die Klimaszenarien ergeben mögliche Veränderungen in der hydroelektrischen Stromproduktion: Für die Jahreserzeugung wird je nach Szenario bis zum Ende dieses Jahrhunderts ein Rückgang zwischen 6 % und 15 % errechnet, wobei der Anteil der Produktion im Sommerhalbjahr abnimmt und im Winterhalbjahr zunimmt.

1 Einleitung

Die Wasserkrafterzeugung stellt in Österreich den größten Anteil an der Stromproduktion dar. Die durchschnittliche hydroelektrische Energieerzeugung deckt derzeit in Österreich etwa 60 % des Bedarfes. In den letzten Jahren fiel der Wasserkraftanteil am Stromverbrauch in Österreich allerdings von 71 % im Jahr 1999 auf 56 % im Jahr 2005 und sank in dem trockenen Jahr 2006 sogar auf den historischen Tiefstand von 52 % (Umweltdachverband 2009). Der Rückgang dieses für Österreich wichtigen Anteils ist durch den steigenden Bedarf bei gleichzeitig stagnierender Kapazität zu erklären. Während ab 1950 bis zum Beginn der 1990er-Jahre ein beständiger Ausbau der Wasserkraft von rund 1.500 MW auf rund 11.000 MW Engpassleistung stattfand, wurde der Kraftwerkspark in den folgenden Jahren nur mehr geringfügig auf knapp unter 12.000 MW Engpassleistung im Jahr 2006 ausgebaut (E-Control 2008).

Pöyry (2008) gehen von einem technisch-wirtschaftlichen Restpotenzial von rund 18.000 GWh bei einem derzeit ausgebauten Potenzial von ca. 38.000 GWh aus. Bei Berücksichtigung von Einschränkungen in den sensibelsten Gebieten wie Nationalparks verringert sich dieser Wert auf unter 13.000 GWh.

Eine Verringerung der Produktion aus Wasserkraft wird durch die Implementierung der Wasserrahmenrichtlinie erwartet. Stigler et al. (2005) errechnen Gesamterzeugungsverluste von 2–7 % (rund 850 bis maximal 3000 GWh).

Bei gleichbleibender Potenzialnutzung wird die Energieproduktion aus Wasserkraft vom Abfluss bestimmt. Veränderungen der klimatischen Bedingungen und daraus resultierende Veränderungen im Wasserkreislauf haben daher direkten Einfluss auf die hydroelektrische Energieerzeugung. Diese Auswirkungen sind gerade im Alpenraum besonders relevant, in dem eine hohe räumliche Variabilität der meteorologischen Verhältnisse herrscht und Schneeprozesse und damit verbundene saisonale Umlagerungen eine wichtige Rolle spielen (Böhm et al. 2008).

Die erwartbaren Änderungen in den wesentlichen klimatischen Größen werden durch globale Klimamodelle (GCM) und in zunehmendem Maße durch räumlich besser aufgelöste regionale Klimamodelle (RCM) beschrieben. Für Lufttemperatur liegen die Prognosen verschiedener Modelle für Österreich nahe beieinander: bis 2050 wird eine mittlere Temperaturerhöhung von 2–2,5 °C erwartet (Loibl et al. 2009). Bei den Aussagen zu Niederschlag weichen die Modelle stärker voneinander ab (Gobiet und Truhetz 2008).

Aus bisherigen Studien können einige wesentliche mögliche Auswirkungen dieser klimatischen Veränderungen auf Hydrologie und Wasserwirtschaft zusammengefasst werden: Schneeschmelze entsteht früher, aber aufgrund geringerer Schneemengen gedämpft, Niederwasserperioden treten früher im Jahr auf. Insgesamt wird eine saisonale Verschiebung und Vergleichmäßigung des Abflusses erwartet (vgl. Nachtnebel 2008). Aus diesen hydrologischen Veränderungen resultierende Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten wurden von Nachtnebel et al. (1999) untersucht, wobei die Klimaänderung aus GCM-Daten abgeleitet wurde. Piot (2005) verwendete RCM-Daten mit einer Auflösung von 25 x 25 km für seine Untersuchung des Einflusses auf die Wasserkraftproduktion der Schweiz.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist eine Analyse von Klimafolgen für die Wasserkraftproduktion in Österreich unter Verwendung von räumlich möglichst hoch aufgelösten Klimadaten. Dafür wurden Ergebnisse des regionalen Klimamodells REMO-UBA mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km verwendet, wobei die Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 (entsprechend der Nomenklatur des IPCC, 2007) herangezogen wurden. Die Zeitreihen des Niederschlags und der Temperatur für das 21. Jahrhundert wurden mit Hilfe von Beobachtungsdaten korrigiert und dienten als Eingangsdaten für ein hydrologisches Modell.

Das hydrologische Modell aller Einzugsgebiete Österreichs wurde für die Simulation des Wasserhaushalts von 1961–1990 kalibriert (Kling 2006). Für die Berechnung von hydrologischen Klimaszenarien für 2001–2090 wurde es geringfügig adaptiert und um ein vereinfachtes Gletschermodell erweitert.

Aus den simulierten Abflüssen wurde das Flächenpotenzial für ganz Österreich errechnet. Die Ergebnisse für das 20. Jahrhundert wurden mit Ergebnissen früherer Studien zum Wasserkraftpotenzial in Österreich verglichen (Schiller 1982, Schiller und Drexler 1991, Pöyry 2008). Aus den Veränderungen des Flächenpotenzials in den hydrologischen Szenarien konnten schließlich Aussagen zu Klimafolgen für die Wasserkrafterzeugung abgeleitet werden.

2 Methoden und Daten

2.1 Klimadaten

Als Beobachtungsdaten, die auch in den Berechnungen für die Referenzperiode 1961–1990 verwendet wurden, standen für ganz Österreich Zeitreihen der Temperatur (Kling et al. 2005a) und des Niederschlags (nach Skoda und Lorenz 2003, korrigiert von Kling et al. 2005b) zur Verfügung.

Für die Berechnung hydrologischer Szenarien wurden Monatswerte des Niederschlags und der Temperatur für das 21. Jahrhundert benötigt. In der vorliegenden Studie wurden dafür Ergebnisse des regionalen Klimamodells REMO-UBA (Jacob et al. 2008) des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg verwendet, dessen Randbedingungen vom globalen Klimamodell ECHMAM5 vorgegeben werden. REMO-UBA weist mit 10 x 10 km zum Zeitpunkt der Bearbeitung für Österreich die höchste räumliche Auflösung auf. Es wurden Ergebnisse der Szenarien A1B, B1 und A2 herangezogen, die sich in den Annahmen zum Verlauf der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert unterscheiden (Nakicenovic et al. 2000).

Der Vergleich der Ergebnisse des Kontrolllaufs des REMO-UBA-Modells für 1961–1990 mit den Beobachtungen zeigte deutliche Differenzen, die bis zu 200 % des Jahresniederschlags betragen. Die Abweichungen in der Temperatur sind geringer betragen aber in weiten Teilen Österreichs auch über 2 °C im Jahresmittel. In den tiefen Lagen kommt es dabei eher zu Überschätzungen, in den alpinen Gebieten zu Unterschätzungen.

Aufgrund dieser Unterschiede zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen für 1961–1990 wurden die Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung mit dem „delta change approach“ korrigiert (Nachtnebel und Stanzel, dieses Heft).

2.2 Hydrologische Modellierung

Für die Berechnung der Wasserbilanzkomponenten wurde das kontinuierliche hydrologische Konzept-Modell COSERO herangezogen (Nachtnebel et al. 1993, Eder et al. 2005, Kling und Nachtnebel 2009, u. a.). *Abb. 1* zeigt ein Schema des Modellkonzepts mit den einzelnen Modulen und Speichern. Das zu simulierende Einzugsgebiet wird in einzelne Berechnungszonen unterteilt; für jede einzelne Zone werden die dargestellten Rechenmodule ausgeführt. Der Gebietsabfluss ergibt sich aus der Addition des zugehörigen Zonenabflusses.

Es wurde das Modell für das gesamte Staatsgebiet Österreichs angewendet, das bereits für die Erstellung von Karten des Hydrologischen Atlas Österreich (HAÖ) erstellt und kalibriert wurde (Kling 2006). Österreich ist dabei in 188 Einzugsgebiete unterteilt (*Abb. 2*), die Berechnungszonen haben eine Größe von 1 x 1 km. Als Berechnungszeitschritt wurde ein Monat gewählt.

Mit den Eingangsdaten aus der Klimamodellierung wurden hydrologische Szenarienrechnungen erstellt. Damit konnten die Veränderungen in den wesentlichen Wasserbilanzkomponenten im Verlauf des 21. Jahrhunderts analysiert werden. Die Änderungen im Abfluss wurden für die Ableitung von möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die hydroelektrische Energieerzeugung verwendet.

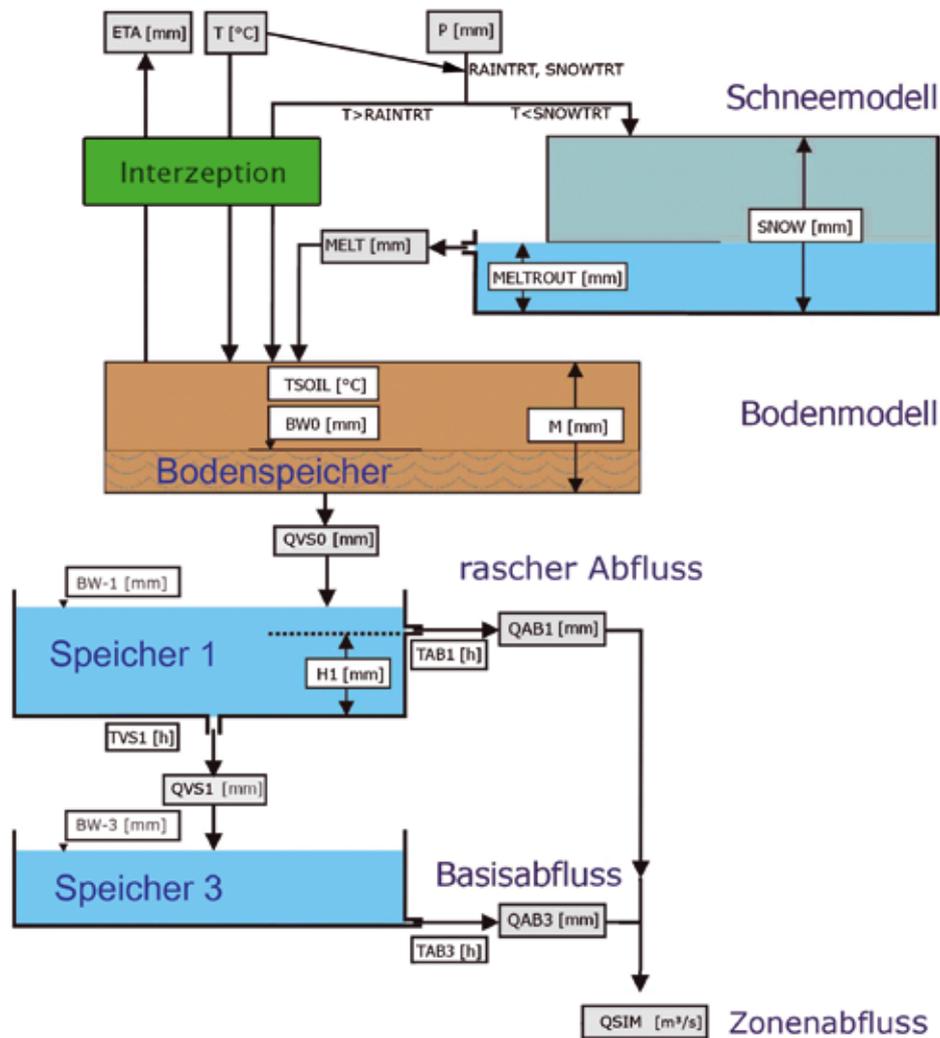


Abb. 1: Schema des hydrologischen Konzept-Modells COSERO.

Für die größten Gletschergruppen wurde ein vereinfachtes Gletschermodell mit dem hydrologischen Modell gekoppelt. Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Gletschersimulation (vgl. Kuhn 2008) und des nur in wenigen Gebieten relevanten Gletscherabflusses wurden die flächendeckenden Analysen der Veränderungen im Abfluss und im Wasserkraftpotenzial nur auf der Grundlage der Wasserbilanzkomponenten und ohne Berücksichtigung von Gletscherabfluss durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Gletschersimulationen in den untersuchten Gletschergruppen wurde der mögliche Einfluss der Gletscherschmelze abgeschätzt.

2.3 Energieproduktion aus Wasserkraft

Jedes Einzugsgebiet des Wasserbilanzmodells wurde einem von 8 Flussgebieten mit einem definierten Gebietsauslass zugeordnet, wobei die Flussgebiete der Einteilung von Schiller und Drexler (1991, in Pöyry 2008) entsprechen (Abb. 2).

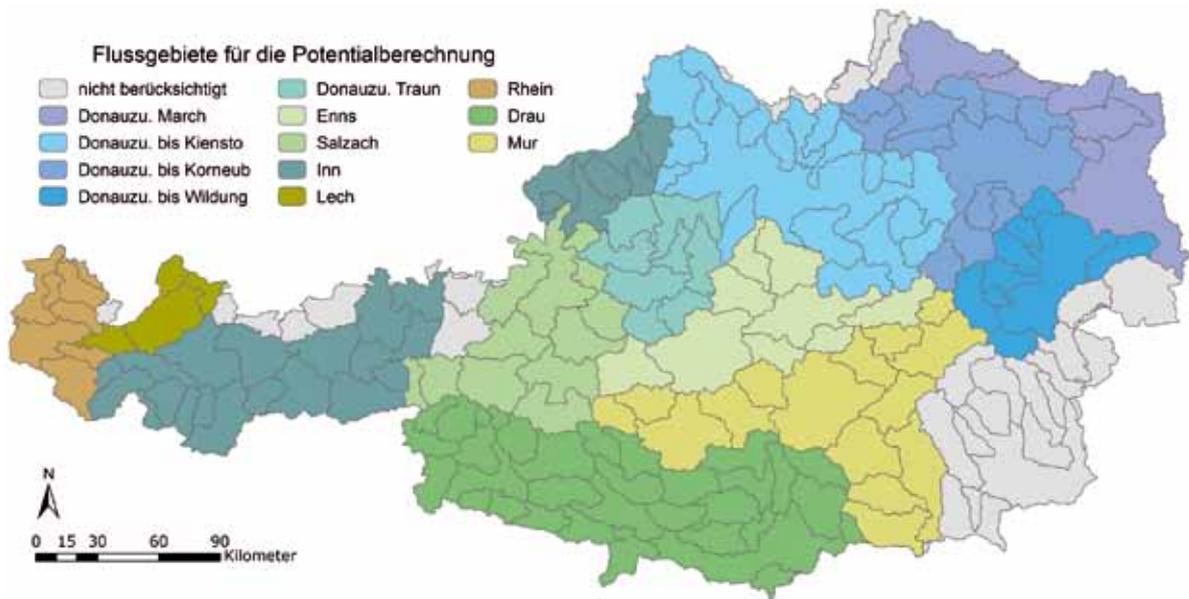


Abb. 2: 188 Einzugsgebiete Österreichs und Zuteilung zu den Flussgebieten der Potenzialberechnung.

Aus den Ergebnissen der Abflusssimulation 1961–1990 wurde das mittlere jährliche Abflussflächenpotenzial für jedes Rasterelement des hydrologischen Modells (1 x 1 km) berechnet (Abb. 3):

$$W = \rho g \cdot \Delta h \cdot Q_{sim} \cdot t$$

mit

W..... Jahresarbeit [Ws]

ρ Dichte von Wasser [1000 kg/m³]

g..... Erdbeschleunigung [9.81 m/s²]

Δh Höhendifferenz [m] zwischen mittlerer Seehöhe des Modellelements und dem Gebietsauslass des Flussgebiets

Q_{sim} ... simulierter Zonenabfluss [m³/s] aus dem Wasserbilanzmodell

t einjähriger Betrachtungszeitraum [s]

Die für die Flussgebiete aufsummierten Werte wurden dem ausgebauten Potenzial nach Pöyry (2008) gegenübergestellt. Daraus wurde für jedes Flussgebiet ein Faktor ermittelt, der den Zusammenhang zwischen simuliertem Flächenpotenzial und ausgebautem Potenzial angibt. Für die Donau – die als Fluss im Wasserbilanzmodell nicht existiert – wurde ein Verhältnis zwischen den Flächenpotenzialen aller Zubringerflüsse und dem ausgebauten Potenzial der Donau ermittelt.

Aus einer Gegenüberstellung mit einer Zeitreihe der tatsächlich erzeugten Energie aus Wasserkraft (E-Control, 2008) wurde ein weiterer Faktor abgeleitet, der beschreibt, um wie viel die erzeugte Energie im Mittel unter dem ausgebauten Potenzial liegt.

Mit den beiden für die Referenzperiode ermittelten Faktoren wurde also ein Zusammenhang zwischen dem errechneten Flächenpotenzial und der Stromproduktion aus Wasserkraft hergestellt. Unter der Annahme, dass dieser Zusammenhang gleich bleibt, konnte aus der Veränderung des Abflussflächenpotenzials in den Zukunftsszenarien eine Aussage über Veränderung in der Energieerzeugung für den bestehenden Kraftwerkspark abgeleitet werden.

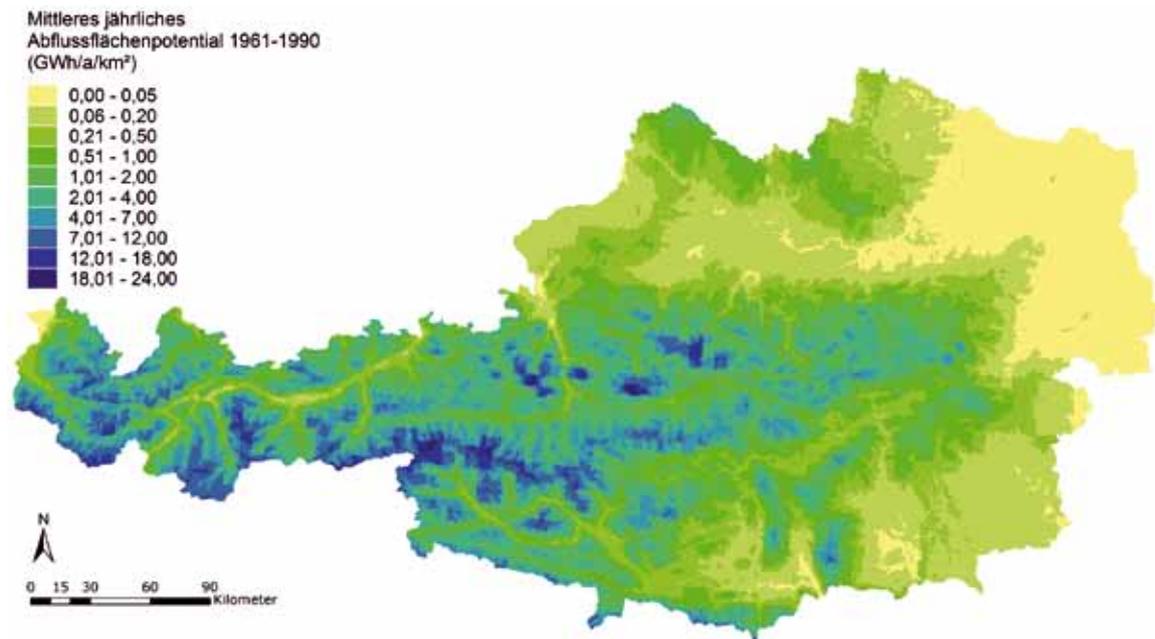


Abb. 3: Mittleres jährliches Abflussflächenpotenzial 1961–1990 aus der Wasserbilanzsimulation.

Die Summe des berechneten mittleren jährlichen Flächenpotenzials aller Flussgebiete für 1961–1990 lag mit 137.000 GWh etwas niedriger als die von Schiller und Drexler (1991, in Pöry 2008) angegebenen 150.000 GWh. Die Differenz könnte sich aus unterschiedlichen räumlichen Diskretisierungen oder unterschiedlichen Topografien ergeben. Außerdem könnte sich der Wert von Schiller und Drexler (1991) auch auf das gesamte Bundesgebiet beziehen, inklusive der Gebiete im Norden und Osten Österreichs, die laut Pöry (2008) und daher auch hier nicht berücksichtigt wurden.

In den Zeitreihen der berechneten Energieproduktion zeigte sich eine etwas höhere interannuale Variabilität als in den Aufzeichnungen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Flächenpotenzial stärker variiert als der Gerinneabfluss. Die Ableitung langfristiger Trends auf der Basis mehrjähriger Mittelwerte wurde dadurch nicht beeinträchtigt.

3 Ergebnisse

3.1 Wasserbilanzkomponenten

Abb. 4 zeigt die Entwicklung der Wasserbilanzkomponenten Niederschlag (gesamter Balken), Abfluss (dunkler Teilbalken) und Verdunstung (heller Teilbalken). Dargestellt sind die 30-jährigen Mittel für ganz Österreich für die Referenzperiode 1961–1990 und für die betrachteten Perioden des 21. Jahrhunderts für alle Szenarien. Es ist deutlich erkennbar, dass die Niederschläge in den REMO-UBA-Szenarien generell sehr hoch sind. Außerdem kann man, vor allem im Szenario A2, relativ starke zyklische Schwankungen im Niederschlag erkennen, die gewissermaßen feuchte und trockene Perioden im Klimamodell darstellen. Insgesamt zeigt sich aber in allen Szenarien ein abnehmender Trend im Niederschlag. Im Abfluss ergeben sich daraus ebenfalls im Vergleich zum 20. Jahrhundert relativ hohe Werte, der Trend zu einem Rückgang des Abflusses im Verlauf des

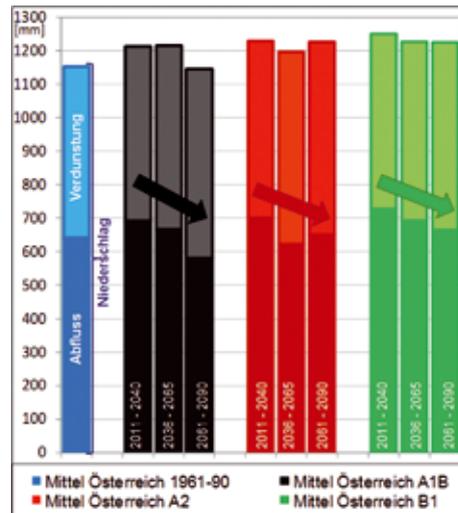


Abb. 4: Wasserbilanzkomponenten aus der hydrologischen Simulation, 30-jährige Mittel für ganz Österreich.

21. Jahrhunderts ist aber noch stärker als beim Niederschlag. Dies ist auf die deutliche Zunahme der Verdunstung zurückzuführen. Diese ist im Szenario mit dem geringsten Temperaturanstieg, B1, am geringsten. Bei vergleichbar großem Temperaturanstieg ergibt sich aufgrund der besseren Wasserverfügbarkeit im Szenario A2 eine höhere Verdunstung als im Szenario A1B.

3.2 Stromproduktion aus Wasserkraft

Aus den simulierten Flächenpotenzialen wurden für alle drei Klimaszenarien Zeitreihen der Energieproduktion von 2002 bis 2090 berechnet (Abb. 5). Im gleitenden Mittel über 10 Jahre erkennt man einerseits zyklische Schwankungen, die aufgrund der feuchteren und trockeneren Perioden

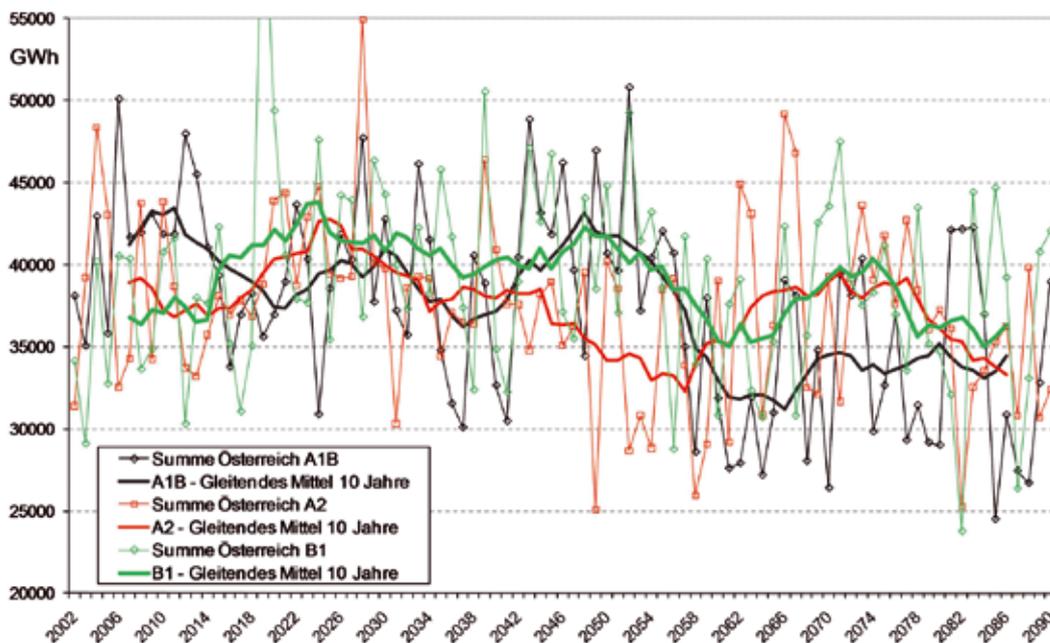


Abb. 5: Stromproduktion aus Wasserkraft 2002–2090 für ganz Österreich für alle drei Klimaszenarien

im Klimamodell entstehen und in den einzelnen Szenarien unterschiedlich verlaufen, andererseits einen deutlichen abnehmenden Trend im 21. Jahrhundert in allen Szenarien.

Abb. 6 zeigt links den Vergleich der 30-jährigen Mittelwerte der simulierten Energieproduktion für die Referenzperiode und alle Szenarien (immer bezogen auf den Ausbaugrad im Jahr 2008). Aufgrund der generell hohen Niederschläge und den daraus resultierenden Abflüssen liegen die Werte in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts über jenen von 1961–1990. Die Abnahme der Produktion in allen Szenarienzläufen wird besonders deutlich, wenn man den relativen Rückgang im Verlauf des 21. Jahrhunderts betrachtet (Abb. 6 rechts). Zwischen 2025 und 2075 kommt es zu einer Reduktion um rund 15 % im A1B-Szenario, um rund 6 % bei A2 und um rund 8 % bei B1. Ein Vergleich der beiden Szenarien A1B und A2 für die Periode um 2075 kann dabei die Spannweite möglicher Auswirkungen bei unterschiedlichen Veränderungen im Niederschlag aufzeigen: die Temperaturentwicklung ist für beide Szenarien im österreichischen Mittel sehr ähnlich, die Niederschlagsmengen sind deutlich unterschiedlich.

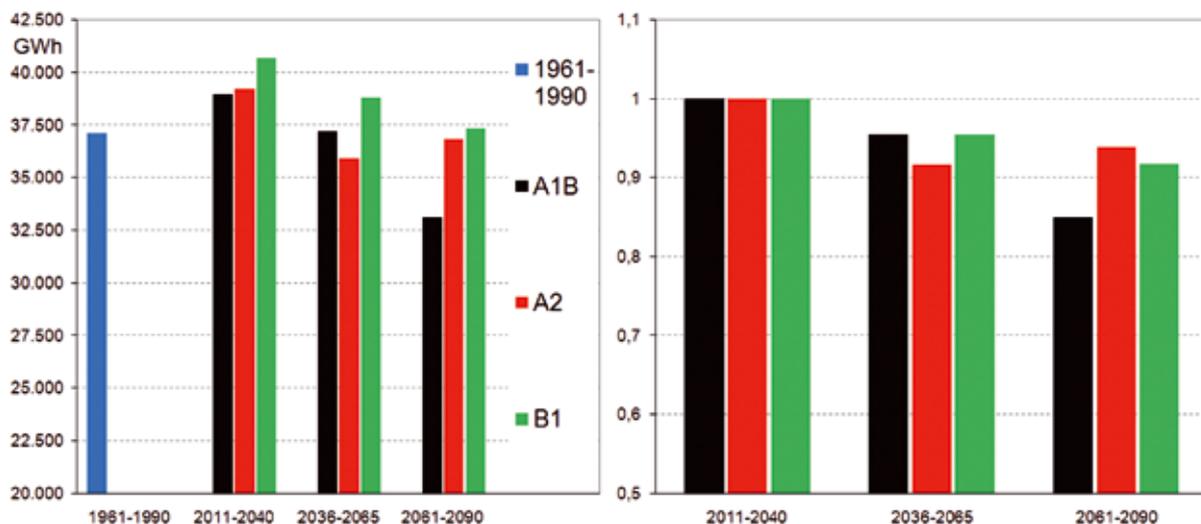


Abb. 6: Langjährige Mittelwerte der Stromproduktion aus Wasserkraft (links) und relative Veränderungen innerhalb des 21. Jahrhunderts (rechts).

Neben dieser Abnahme der Jahresproduktion kommt es im Verlauf des 21. Jahrhunderts zu einer Vergleichmäßigung im Jahresgang. Aufgrund höherer Abflüsse nimmt die Produktion im Winterhalbjahr zu, im Sommerhalbjahr nimmt sie ab (siehe Abb. 7). Die relative Zunahme im Winterhalbjahr liegt dabei zwischen 2025 und 2075 zwischen fast 18 % (A2) und rund 9 % (B1). Die Abnahme im Sommerhalbjahr zwischen 2025 und 2075 schwankt zwischen 24 % (A1B) und 13 % (A2 und B1).

Abflussbeiträge aus Gletscherschmelze wurden in den bisher erläuterten Größen nicht berücksichtigt. Die Gletschersimulation und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung der Wasserkraftproduktion ist mit großer Unsicherheit behaftet – während in unseren Berechnungen der Beitrag der Eisschmelze zwischen 2050 und 2070 ein Maximum erreicht und erst danach stark zurückgeht, erwarten z. B. Weber et al. (2009) das fast völlige Verschwinden der Gletscher im Donaeinzugsgebiet bis 2060.

Die dünnen Linien in *Abb. 7* zeigen den Verlauf der Sommerproduktion, wenn der aus der Gletschersimulation abgeschätzte Beitrag der Eisschmelze – die fast ausschließlich im Sommerhalbjahr auftritt – dazuaddiert wird. Für ganz Österreich ist dieser Beitrag sehr gering, die relative Abnahme der Energieerzeugung zwischen 2025 und 2075 liegt bei Mitberücksichtigung des Gletscherbeitrages immer noch zwischen rund 23,5 % (A1B) und 12,5 % (A2).

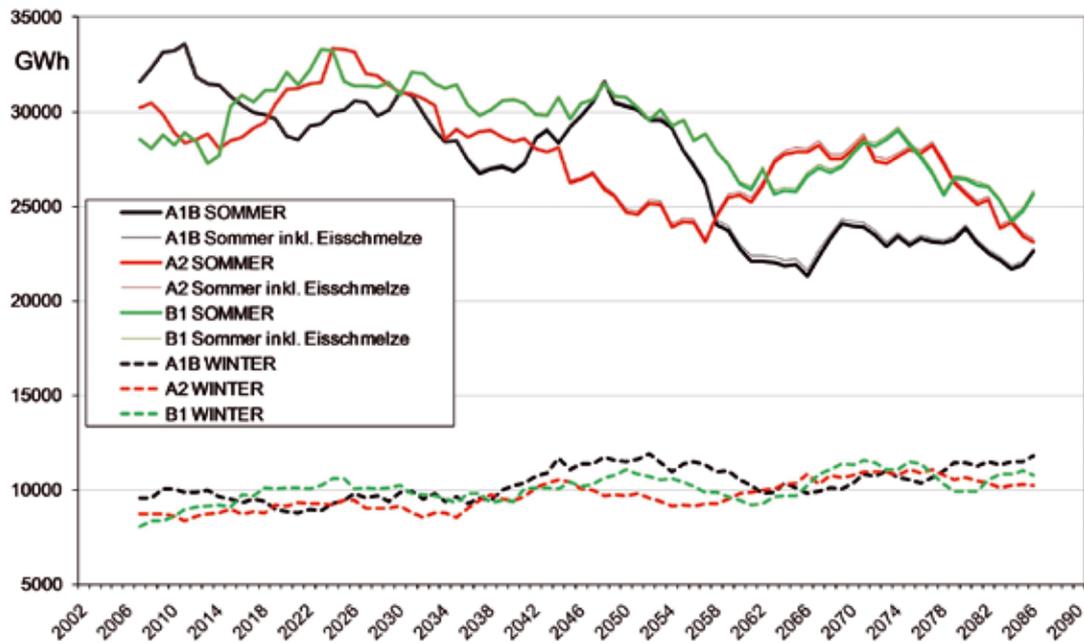


Abb. 7: Mittel der Produktion für ganz Österreich im 21. Jahrhundert, Winter- und Sommerhalbjahr.

4 Zusammenfassung

Die Energieproduktion aus Wasserkraft hängt in hohem Maße von den klimatischen Bedingungen ab, die das Abflussgeschehen beeinflussen. Klimaänderungen haben daher – für den bestehenden Kraftwerkspark – direkte Auswirkungen auf die hydroelektrische Stromerzeugung. Klimamodelle beschreiben natürliche Schwankungen des Klimas sowie Trends, die durch erhöhte Treibhausgasemissionen bewirkt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde das regionale Klimamodell REMO-UBA herangezogen, das mit 10 x 10km die höchste räumliche Auflösung für Österreich aufweist. Unter Anwendung des „delta-change“-Verfahrens wurden die Niederschlags- und Temperaturdaten der Klimaszenarien A1B, A2 und B1 mit Hilfe der Beobachtungen korrigiert und als Eingangsdaten für ein hydrologisches Modell verwendet, das ganz Österreich abdeckt.

Aus den simulierten Abflüssen wurde das Flächenpotenzial errechnet und für die Kontrollperiode 1961–1990 ein Zusammenhang mit Aufzeichnungen der hydroelektrischen Jahresenergieerzeugung hergestellt. Aus der Entwicklung des Flächenpotenzials in den hydrologischen Klimaszenarien konnten schließlich mögliche Klimafolgen für die Wasserkrafterzeugung für den bestehenden Kraftwerkspark abgeleitet werden.

In allen drei Szenarien ergeben sich deutliche Abnahmen der Jahresenergieproduktion aus Wasserkraft im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Der Rückgang zwischen 2025 und 2075 liegt zwischen rund 6 % und rund 15 % und damit etwas höher als die Ergebnisse früherer Untersuchungen

für einzelne Einzugsgebiete, bei denen Abnahmen von 3–8 % bzw. 5–10 % errechnet wurden (Nachtnebel et al., 1999; Nachtnebel 2008). Sehr deutlich zeigt sich eine Vergleichmäßigung der Produktion im Jahresgang, mit Zunahmen im Winterhalbjahr und einer Reduktion im Sommerhalbjahr. Der Rückgang im Sommer liegt zwischen 13 % und 24 % zwischen 2025 und 2075, die Zunahme im Winter zwischen 9 % und fast 18 %.

In der gesamten Kette der Modellierung liegen beträchtliche Unsicherheiten. Bei der hydrologischen Modellierung und der anschließenden Ableitung der Wasserkrafterzeugung ergaben sich diese großteils aus Vereinfachungen, die nötig waren, um ganz Österreich in der Analyse berücksichtigen zu können. In der Klimamodellierung und hier vor allem bei der Beschreibung der Niederschlagsentwicklung liegen auch bei Anwendung der am höchsten aufgelösten Klimamodelle immer noch die größten Unsicherheiten. Diese zeigen sich sowohl in Abweichungen von Beobachtungen, als auch in den unterschiedlichen Ergebnissen verschiedener Szenarien und verschiedener Klimamodelle. Die zukünftige Zunahme der Temperatur wird von Klimamodellen aber wesentlich zuverlässiger vorhergesagt. Die Klimaerwärmung führt auch für relativ feuchte Zukunftsszenarien aufgrund der höheren Verdunstung zu einem Rückgang des Jahresabflusses und damit der Wasserkrafterzeugung. Auch die deutlichen saisonalen Veränderungen werden – im Winter durch veränderte Schneeprozesse, im Sommer durch höhere Verdunstung – stark durch den Temperaturanstieg angetrieben.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projekts „KlimAdapt – Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Anpassung des Energiesystems an den Klimawandel“ durchgeführt, das vom Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms „Energie der Zukunft“ gefördert wurde (Nr. 816 665). Das Projekt wird vom Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Energy Economics Group, der Technische Universität Wien koordiniert. Klimadaten wurden vom Institut für Meteorologie der BOKU zur Verfügung gestellt.

Literatur

- Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P. und Pirker, O. 2008 Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich. In: BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- E-Control 2008. Engpassleistung nach Kraftwerkstypen und Jahresreihen. Online verfügbar unter: <http://www.e-control.at/de/statistik/strom/bestandsstatistik> (Zugriff: August 2009)
- Eder, G., Fuchs, M., Nachtnebel, H.-P. und Loibl, W. 2005. Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. *Hydrological Processes* 19, 2339–2360.
- Gobiet, A. und Truhetz, H. Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich. In: BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K. 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg.
- Kling H., Fürst J., Nachtnebel H.P. 2005a. Spatio-temporal water balance Danube – A methodology for the spatially distributed, seasonal water balance of the Danube basin. Final report, Austrian Academy of Sciences, HÖ 27/2003.
- Kling H., Nachtnebel H.P., Fürst J. 2005b. Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag aus der Wasserbilanz. In: BMLFUW (Hrsg.), Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Kartentafel 2.3. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Kling, H. 2006. Spatio-Temporal Modelling of the Water Balance of Austria. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien.
- Kling, H. und Nachtnebel, H.P. 2009. A spatio-temporal comparison of water balance modelling in an Alpine catchment. *Hydrological Processes*, 23/7, 997 – 1009.
- Kuhn, M. 2008. Klimawandel und Gletscherschwund. In: BMLFUW (Hrsg.), Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Loibl, W., Züger, J. und Köstl, M. 2009 Reclip:more – Kleinräumige Klimaszenarien für Österreich. Standort – Zeitschrift für Angewandte Geographie 33, 94–100.
- Nachtnebel, H.P., Baumung, S., Lettl, W. 1993. Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr (Handbuch). IWHW, BOKU, Wien.
- Nachtnebel, H.P., Hebenstreit, K., Diernhofer, W., Fuchs, M. 1999. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 51/9-10, 262-275.
- Nachtnebel, H.P. 2008. Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen. In: BMLFUW (Hrsg.) 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Piot, M. 2005. Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. *Wasser Energie Luft*, 11/12, 365-367.
- Pöyry 2008. Wasserkraftpotentialstudie Österreich. Studie erstellt von Pöyry Energy GesmbH im Auftrag des VEÖ.
- Schiller, G. 1982. Die Wasserkraftnutzung in Österreich – Wasserkraftpotential Stand 1982. Verbundgesellschaft, Wien.
- Schiller, G. und Drexler, F. 1991. Die Wasserkraftnutzung in Österreich – Wasserkraftpotential Stand 1990. *Österreichische Wasserwirtschaft* 43, 5/6, 1001-106.
- Skoda, G. und Lorenz, P. 2003. Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten. In: BMLFUW (Hrsg.), Hydrologischer Atlas Österreichs, 1. Lieferung, Kartentafel 2.2. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Stigler, H., Huber, C., Wulz, C. und Todem, C. 2005. Energiewirtschaftliche und ökonomische Bewertung potenzieller Auswirkungen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie auf die Wasserkraft. Studie im Auftrag des VEÖ, der VÖEW, der Kleinwasserkraft Österreich und des Lebensministeriums. TU Graz.
- Thorntwaite, C.W. und Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evaporation and the water balance. *Publications in Climatology*, 10 / 3.
- Umweltdachverband 2009. Stromverbrauchsentwicklung in Österreich. fact sheet 02/09.

Wasserkrafterzeugung bei Klimaveränderungen

Weber, M., Prasch, M. und Braun., L. 2009. Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in Zukunft. Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich, 86, 1-29.

Anschrift der Autoren:

DI Philipp Stanzel

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans Peter Nachtnebel

Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau

Muthgasse 18, 1190 Wien

E-Mail: philipp.stanzel@boku.ac.at