



lebensministerium.at

# Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft





## NACHHALTIG FÜR NATUR UND MENSCH SUSTAINABLE FOR NATURE AND MANKIND

### Lebensqualität / *Quality of Life*

Wir schaffen und sichern die Voraussetzungen für eine hohe Qualität des Lebens in Österreich.

*We create and we safeguard the prerequisites for a high quality of life in Austria.*

### Lebensgrundlagen / *Bases of life*

Wir stehen für vorsorgende Verwaltung und verantwortungsvolle Nutzung der Lebensgrundlagen Boden, Wasser, Luft, Energie und biologische Vielfalt.

*Indispensable bases of life are clean air, pure water, unpolluted soil and intact ecosystems.*

### Lebensraum / *Living environment*

Wir setzen uns für eine umweltgerechte Entwicklung und den Schutz der Lebensräume in Stadt und Land ein.

*We support an effective protection against natural hazards as well as an ecological orientation of the riverine landscapes of Austria.*

### Lebensmittel / *Food*

Wir sorgen für die nachhaltige Produktion insbesondere sicherer und hochwertiger Lebensmittel und nachwachsender Rohstoffe.

*We are shaping for our farmers and consumers a sustainable and environmentally benign agricultural and food policy.*

## IMPRESSUM

### Medieninhaber und Herausgeber

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1012 Wien  
Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Marc-Aurel-Straße 5, 1010 Wien

### Redaktionsteam

Dr. Reinhard Böhm, MR DI Reinhold Godina, o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans Peter Nachtnebel, DI Dr. Otto Pirker

### Redaktion, Layout und Satz

Mag. Fritz Randl (ÖWAV)

### Titelfotos

(von links oben nach rechts unten): Hochwasser am Inn bei Innsbruck (Foto: Josef Pfister, HD Tirol), Stausee Mooserboden (Foto: Reinhold Godina, BMLFUW), Grüner See, Steiermark (Foto: Reinhold Godina, BMLFUW), Trockenrisse (Foto: Josef Eitzinger, BOKU)

### Druck

AV+Astoria Druckzentrum GmbH, Wien

Es wird darauf hingewiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen.

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

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.



## **Klimawandel: Auswirkungen auf die österreichische Wasserwirtschaft**

Die aktuellen Forschungsberichte zeigen, was von vielen Menschen seit Jahren wahrgenommen wird. Die vom Menschen freigesetzten Treibhausgase sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ursache für den seit Mitte des 20. Jahrhunderts beobachteten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur. Es ist eine allgemein anerkannte Tatsache, dass die globale Erwärmung vom Menschen beeinflusst und zu einer Herausforderung der ErdbewohnerInnen im 21. Jahrhundert geworden ist. Der weltweite Wandel des Klimasystems hat Auswirkungen auf Natur, Gesellschaft, Wirtschaft und insbesondere auch auf die Wasserwirtschaft.

Obwohl Österreich im Vergleich mit anderen Regionen in Europa in Hinblick auf die Verfügbarkeit von Wasser in einer sehr günstigen Lage ist, gilt es, die möglichen Veränderungen durch den Klimawandel zu verfolgen und Vorkehrungen für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung in gegenwärtigen und zukünftigen Maßnahmen zu treffen.

Die Beschreibung der komplexen Zusammenhänge des Klimas zeigt, wie wichtig es ist, langfristige Messungen und Grundlagenforschung zu betreiben, um die klimabedingten Veränderungen und ihre Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft exakt erfassen und bewerten zu können.

Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union haben das Thema Klimawandel in die für das Wassermanagement wichtigen Regelwerke – die Wasserrahmenrichtlinie und die Hochwasserrichtlinie – aufgenommen und sich zur Aufgabe gemacht, Anpassungsstrategien in den Bewirtschaftungs- und Maßnahmenplänen zu berücksichtigen.

Die Aufgabe des ÖWAV-Arbeitsausschusses war, eine sachliche Darstellung der möglichen Veränderungen auf die Sektoren der Wasserwirtschaft zu geben und dabei zwischen gesicherten und unsicheren Auswirkungen zu unterscheiden. Mit diesem Ziel wird ein Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung zum Thema Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Österreich gegeben und eine neutrale Basis für weitere Projekte und Maßnahmen geschaffen.

Die nun vorliegende Zusammenstellung der durch den Klimawandel bedingten Veränderungen des Wasserhaushaltes in Österreich gibt eine Orientierung, in welche Richtung diese Veränderung gehen kann.

### **Wilfried Schimon**

Leiter der Sektion Wasser im Lebensministerium



## Vorwort

In den letzten Jahren traten mehrmals große Hochwasserereignisse in Österreich auf (2002 und 2005), von denen insbesondere das Hochwasserereignis 2002 in Nieder- und Oberösterreich katastrophale Schädwirkungen mit sich brachte. Der Gesamtschaden wurde allein für Österreich mit etwa 3,2 Milliarden € (BMLFUW, 2003) geschätzt. Für die betroffenen Länder Österreich, Tschechische Republik und Deutschland beliefen sich die Schäden insgesamt auf 15–16 Milliarden €.

Im Gegensatz dazu war der Sommer 2005 durch eine intensive und lang andauernde europaweite Dürrephase gekennzeichnet, die höhere Schäden als das Hochwasser 2002 verursachte. Die Anzahl der Todesopfer infolge der Hitzewelle überstieg bei weitem die Anzahl der Hochwasseropfer. Mehrere Sturmtiefs über Mitteleuropa, wie Lothar im Jahre 1999 mit einer geschätzten Schädwirkung von 6 Mrd. USD (Swiss Re) und Kyrill im Jahre 2007 mit 10 Mrd. USD an volkswirtschaftlichen Schäden (Munich Re), verfestigten in der breiten Öffentlichkeit das Bild einer bereits stattfindenden Klimaveränderung.

Die international durchgeführten Klimastudien, die in den IPCC-Publikationen dokumentiert sind, geben ein globales Bild, lassen aber nur indirekte Schlussfolgerungen für Österreich zu, da die räumliche Auflösung dieser Modelle der komplexen Topografie des Alpenraumes nur sehr bedingt gerecht wird. In der Schweiz und der Bundesrepublik wurden bereits vor Jahren nationale Klimafolgenforschungsprogramme durchgeführt, die als wichtige Informationsquelle auch für Österreich herangezogen werden können, die aber nicht direkt auf Österreich übertragbar sind. Für Österreich liegen zwar etliche einzelne Arbeiten zu Klimaänderungen und deren Folgewirkungen vor, aber es besteht kein kohärentes Bild über mögliche Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft.

Aus diesem Grunde richtete der ÖWAV im Juli 2007 eine Arbeitsgruppe mit der Zielsetzung ein, die möglichen Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Wasserwirtschaft in Österreich in interdisziplinärer Weise zusammenzustellen und in ihrer Aussagekraft zu beurteilen. Die Thematik betrifft sowohl die zu erwartenden Veränderungen in den Klimavariablen, wie Niederschlag und Temperatur, als auch die Folgewirkungen für glaziologische und hydrologische Prozesse, die dann auf die wasserwirtschaftlichen Nutzungsansprüche und die Umwelt wirken. Es wurden daher auch die Bereiche Wasserversorgung, Energiewirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie Auswirkungen auf die Hydrobiologie und die semi-aquatische Flora in Form von Referaten behandelt. Ergänzend wurden Experten aus den Nachbarländern eingeladen.

Die Behandlung der Themen, die eingangs gemeinsam festgelegt wurden, erfolgte in Form von Referaten, deren schriftliche Ausarbeitungen in dieser Broschüre enthalten sind. Mit dieser Unterlage wird der Wissensstand in Österreich über mögliche Klimafolgen für Österreich dargestellt, wobei ergänzend die Unsicherheiten in den Aussagen beleuchtet werden.

An dieser Stelle sei allen Mitgliedern des Arbeitskreises für ihre aktive Mitarbeit während des letzten Jahres herzlich gedankt, und ebenso dem Lebensministerium für die Drucklegung dieses Heftes.

**Hans-Peter Nachtnebel**  
Leiter des Arbeitskreises

## **Mitglieder des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Klimawandel“ und Teilnehmer an den Ausschusssitzungen:**

### **Ausschussleiter:**

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans-Peter NACHTNEBEL, Universität für Bodenkultur Wien

### **Ausschussmitglieder/Teilnehmer an den Ausschusssitzungen:**

Univ.-Prof. DI Dr. Günter BLÖSCHL, Technische Universität Wien

Dr. Reinhard BÖHM, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

DI Frederick M. CATE, Technisches Büro ÖKOPLAN, Wien

Mag. Dr. Andreas DALLA-VIA, Joanneum Research ForschungsgmbH, Graz

Univ.-Prof. DI Dr. Josef EITZINGER, Universität für Bodenkultur Wien

DI Franz FEICHTINGER, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen

DI Dr. Robert FENZ, Lebensministerium, Wien

Baurat h.c. DI Dr. Werner FLÖGL, ZT-Büro Dr. Flögl, Linz

Dr. Martin FUCHS, Pöyry Energy GmbH, Wien

Dipl.-Geogr. Dr. Sven Fuchs, Universität für Bodenkultur Wien

Univ.-Prof. DI Dr. Josef FÜRST, Universität für Bodenkultur Wien

Dr. Andreas GOBIET, Universität Graz

MR DI Reinhold GODINA, Lebensministerium, Wien

Dr. Klaus GÖTZENDORFER, Jungbunzlauer Austria AG & CO KG, Wulzeshofen

o.Univ.-Prof. DI Dr. Dieter GUTKNECHT, Technische Universität Wien

Univ.-Prof. DI Dr. Raimund HABERL, Universität für Bodenkultur Wien

Univ.-Prof. DI Dr. Helmut HABERSACK, Universität für Bodenkultur Wien

Herbert HEINDL, Technische Universität Wien

Ass.-Prof. DI Dr. Hubert HOLZMANN, Universität für Bodenkultur Wien

OR DI Hubert HONSOWITZ, Technische Universität Wien

Univ.-Prof. Dr. Georg A. JANAUER, Universität Wien

Univ.-Prof. DI Dr. Klaus KATZENSTEINER, Universität für Bodenkultur Wien

HR Univ.-Prof. DI Dr. Eduard KLAGHOFER, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen

Gernot KOBOLTSCHNIG, Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt

MR Univ.-Doz. Mag. Dr. Martin KRALIK, Umweltbundesamt GmbH, Wien

o.Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. Helmut KROISS, Technische Universität Wien

DI Gerhard KUBU, Universität für Bodenkultur Wien

o.Univ.-Prof. Dr. Michael KUHN, Universität Innsbruck

DI Johannes MOSER, Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt

DI Dr. Otto PIRKER, Verbund Austrian Hydro Power AG, Wien

o.Univ.-Prof. DI Dr. Wolfgang RAUCH, Universität Innsbruck

Dr. Ernst RUDEL, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Dr. Bruno SCHÄDLER, Bundesamt für Umwelt, Bern (CH)

HR DI Franz SCHILLER, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz

Univ.-Prof. DI Dr. Stefan SCHMUTZ, Universität für Bodenkultur Wien

MR DI Karl SCHWAIGER, Lebensministerium, Wien

wHR DI Gerhard SPATZIERER, Amt der Burgenländischen Landesregierung, Eisenstadt

o.Univ.-Prof. DI Dr. Peter TSCHERNUTTER, Technische Universität Wien

DI Mario UNTERWAINIG, Universität für Bodenkultur Wien

DI Hans WEBER, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof (D)

DI Bertram WEISS, Verbund – Österreichische Elektrizitätswirtschafts AG, Wien

HR DI Johann WIEDNER, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz

DI Friedrich ZEMANEK, EVN AG, Maria Enzersdorf

Univ.-Prof. DI Dr. Matthias ZESSNER, Technische Universität Wien

Univ.-Prof. Dr. Hans ZOJER, Joanneum Research ForschungsgmbH, Graz

### **Für den ÖWAV:**

Andreas GAUL, Referent für den Fachbereich Wasserwirtschaft im ÖWAV, Wien

# Inhalt

<b>Klimawandel: Auswirkungen auf die österreichische Wasserwirtschaft .....</b>	<b>1</b>
<i>Wilfried Schimon</i>	
<b>Vorwort.....</b>	<b>3</b>
<i>Hans-Peter Nachtnebel</i>	
<b>Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich .....</b>	<b>7</b>
<i>Reinhard Böhm, Reinhold Godina, Hans-Peter Nachtnebel und Otto Pirker</i>	
<b>Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen.....</b>	<b>27</b>
<i>Hans-Peter Nachtnebel</i>	
<b>Harte und weiche Fakten zum Klimawandel – ein Überblick .....</b>	<b>53</b>
<i>Reinhard Böhm</i>	
<b>Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich.....</b>	<b>71</b>
<i>Andreas Gobiet und Heimo Truhetz</i>	
<b>Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte .....</b>	<b>83</b>
<i>Ernst Rudel</i>	
<b>Klimawandel und Wasserhaushalt in Süddeutschland – Ergebnisse des Kooperations- vorhabens KLIWA .....</b>	<b>91</b>
<i>Hans Weber</i>	
<b>Trends in hydrologischen Variablen und in der Wasserbilanz Österreichs .....</b>	<b>105</b>
<i>Josef Fürst, Harald Kling, Hans Peter Nachtnebel und Thomas Hörhan</i>	
<b>Klimawandel und sozioökonomische Veränderungen – Herausforderungen des Umgangs mit Naturgefahren in Berggebieten .....</b>	<b>117</b>
<i>Sven Fuchs</i>	
<b>Klimawandel und Gletscherschwund.....</b>	<b>129</b>
<i>Michael Kuhn</i>	
<b>Klimatische Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Wasserversorgung in der Oststeiermark.....</b>	<b>141</b>
<i>Andreas Dalla-Via</i>	
<b>Die Schweiz im Jahre 2050 – Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft .....</b>	<b>153</b>
<i>Bruno Schädler</i>	
<b>Klimawandel und aquatische Makrophyten.....</b>	<b>165</b>
<i>Georg A. Janauer</i>	
<b>Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Fischfauna .....</b>	<b>177</b>
<i>Stefan Schmutz</i>	
<b>Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft .....</b>	<b>187</b>
<i>Klaus Katzensteiner</i>	
<b>Der Klimawandel und seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft .....</b>	<b>197</b>
<i>Josef Eitzinger, Gerhard Kubu und Sabina Thaler</i>	



# Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich

*Reinhard Böhm, Reinhold Godina, Hans-Peter Nachtnebel und Otto Pirker*

*“Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level.” (IPCC, 2007)*

## 1 Ausgangslage

Die alpinen Regionen sind gegenüber Klimaänderungen sehr sensibel, da es zu saisonalen Umlagerungen des Niederschlags kommt und zusätzlich eine große räumliche Variabilität des Klimas und der hydrologischen Prozesse besteht. Für die Alpen liegen Untersuchungen aus der Schweiz, Österreich und Deutschland vor, die einerseits die bereits beobachteten Veränderungen dokumentieren, die aber auch unter Verwendung von Klimamodellen Aussagen für den Alpenraum ableiten. Da es verschiedene Klimamodelle mit verschiedenen Emissionsszenarien gibt, die in ihren Simulationen einen Zeitraum bis etwa zum Ende dieses Jahrhunderts abdecken, ergeben sich je nach gewähltem Vorhersagezeitraum und Szenario unterschiedliche Ergebnisse.

## 2 Klimaszenarien und Klimamodelle

Die Klimaentwicklung kann nur über folgende Wirkungskette abgeschätzt werden:

- Annahmen über die gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Entwicklung der Menschheit, die in Form von 35 Entwicklungsszenarien des IPCC dargestellt werden;
- die sich daraus ergebenden Veränderungen der Klimaantriebe, die durch chemisch-physikalische Atmosphärenmodelle unter Berücksichtigung von Treibhausgaskonzentrationen und Aerosolen simuliert werden;
- Die Auswirkungen der veränderten Klimaantriebe (forcings) auf die Atmosphäre, die Ozeane, die Kryosphäre (Berechnung auf einem endlich dichten Gitternetz durch gekoppelte globale Ozean-Atmosphären-Zirkulationsmodelle (samt Kryosphäre));
- zusätzliche Berücksichtigung von Rückkopplungen zwischen der Land- und Wasseroberfläche, der Vegetation und der Atmosphäre.

Von den verschiedenen Entwicklungslinien des IPCC werden drei am häufigsten verwendet, die sich stark verkürzt folgendermaßen beschreiben lassen:

- A2-Familie: Business as usual im schlechten Sinn
- B1-Familie: volle Konzentration auf Treibhausgasreduktion
- A1B: Mix aus starker, global vernetzter technologischer Entwicklung und „sozial verträglicher Globalisierung“.

A1B ist als „optimistisches Globalisierungsszenario“ anzusehen und wird als Leitszenario von IPCC-2007 herangezogen. B1 dient zur Illustration, was durch extreme Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht werden könnte, und A2 als Abschreckung, was passiert, wenn alles aus dem Ruder läuft.



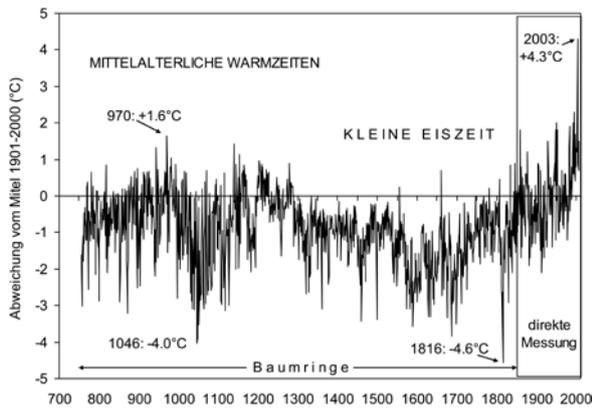


Bild 2: historischer Temperaturverlauf im Alpenraum (aus Baumringen und Messungen) (Böhm et al., 2007)

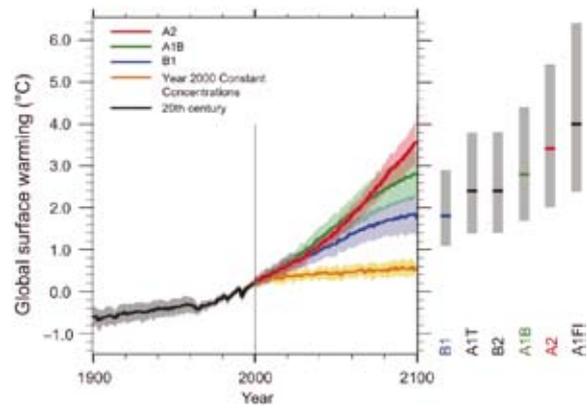


Bild 3: Zukünftige globale Temperaturzunahme (aus Klimasimulationen, IPCC Synthesis Report, 2007)

Die berechneten Veränderungen im Niederschlag sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Man kann von einem Anstieg des Jahresniederschlags mit zunehmender geografischer Breite ausgehen. Der Alpenraum liegt gerade in einer Übergangszone, wo nach Norden hin der Niederschlag steigt, während im Süden Europas eine Abnahme ausgewiesen wird. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte demnach über Skandinavien und Sibirien der Jahresniederschlag um mehr als 25 % steigen und in Südeuropa um das Mittelmeer um etwa 20 % abnehmen. Bild 4 verdeutlicht allerdings die noch existierenden gravierenden Unsicherheiten am Beispiel des für 2020 erwarteten Jahresabflusses, der etwa für die Iberische Halbinsel von zwei „state of the art“-Modellen sogar konträr simuliert wird.

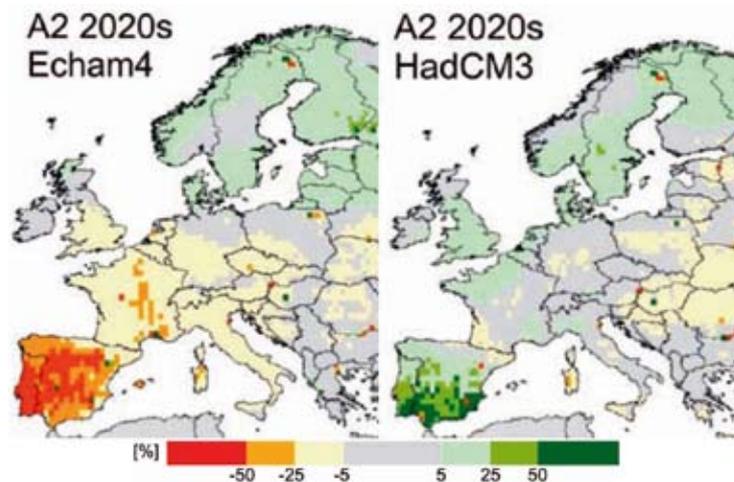


Bild 4: Simulation der Veränderung des mittleren Jahresabflusses für Europa bis 2020 (aus IPCC-2007, WG-2 Report, fig. 12.1)

#### 4 Aussagen für den Alpenraum

Die Analyse von Messreihen ergibt folgendes Bild für die historische Entwicklung der Temperatur (Bild 5) und des Niederschlags (Bild 6). Dargestellt sind Anomalien aus 124 Einzelreihen zum Mittel des 20. Jahrhunderts im Alpenraum, der durch den Bereich 4-19 °E, 43-49° N eingegrenzt

wurde. Ergänzend ist noch die globale Temperaturänderung dargestellt, die deutlich ausgeglichener als jene im Alpenraum erfolgt.

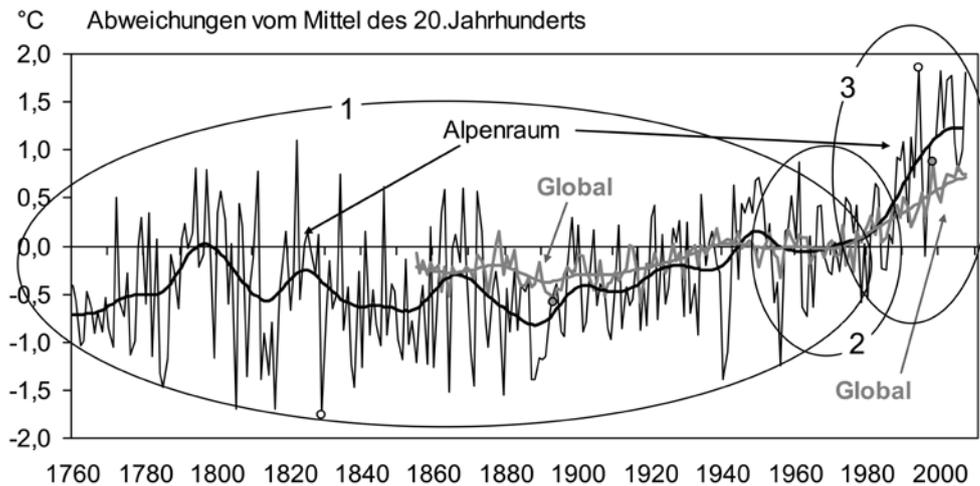


Bild 5: Gemessene Jahresmittel der Lufttemperatur im Großraum Alpen 1760–2007 (schwarz) und im globalen Mittel 1858–2007 (grau).

- 1: letzte natürliche Periode – solarer und vulkanischer Einfluss dominant
  - 2: erster merklicher menschlicher Einfluss – die Aerosolperiode
  - 3: Eintritt ins Treibhauszeitalter
- (Auer et al., 2007; Jones und Moberg, 2003 (aktualisiert))

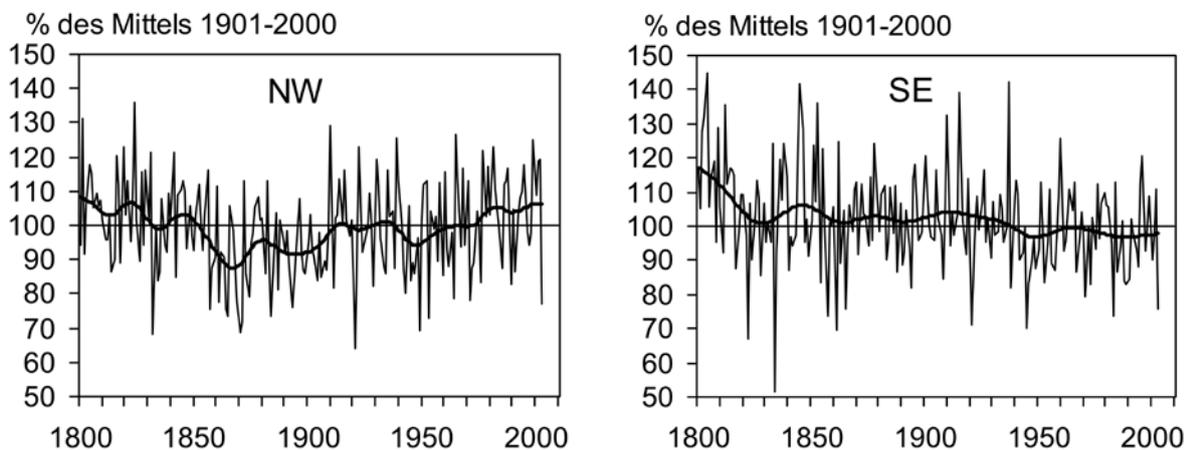


Bild 6: Regionale Trendunterschiede beim Niederschlag in den Einzeljahren und für das 30-jährige Mittel (HISTALP Datenbank, Auer et al., 2005)

- links: nordwestlich des Alpenbogens (Frankreich, Schweiz, Süddeutschland, Vorarlberg, Tirol),
- rechts: südöstlich des Alpenbogens (Ungarn, Slowenien, Kroatien, Bosnien, Friaul, Veneto, Kärnten, West- und Oststeiermark).

Während bei der Temperatur der Langfristtrend im Großraum Alpen auch für Unterregionen repräsentativ ist (die +2° gelten sowohl für Perugia, Wien, Marseille oder Bern und genau so für die hochalpinen Observatorien auf dem Säntis, der Zugspitze oder auf dem Sonnblick), zeigt sich bei den Niederschlagstrends in Bild 6 ein markanter Unterschied zwischen langfristig ansteigendem Trend im Nordwesten des Alpenbogens und langfristiger Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im

Südosten. Die Größenordnung beider gegenläufiger Trends liegt bei 10–15 % pro Jahrhundert, während die Kurzfristvariabilität bei  $\pm 50$  % liegt.

Für lokale Anwendungen von Klimamodellen sind höher aufgelöste Simulationen notwendig, indem die Informationen des grobmaschigen Modells mit regionalen Informationen über die Topografie, Landbedeckung und das Klima gekoppelt werden. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn Aussagen über Extremereignisse getroffen werden sollen.

Beim „dynamischen Downscaling“ verwendet man an den Gebietsrändern die Randbedingungen des grobmaschigen Modells und arbeitet innerhalb des Gebiets mit höherer räumlicher Auflösung. Im Rahmen des EU Projekts PRUDENCE (2001) wurden vier regionale Modelle mit einer räumlichen Auflösung von ca. 50 km Rasterlänge auf Europa angewandt und die Veränderungen in Niederschlag und Temperatur berechnet.

In Bezug auf die Temperaturentwicklungen zeigen die Modellsimulationen einen eindeutigen Trend zur Temperaturzunahme, jedoch wird die Höhe der Zunahme unterschiedlich errechnet und liegt demnach im letzten Quartal dieses Jahrhunderts zwischen 3–3,5 °C (Jahresmittel) und reicht bei einem Modell bis zu 4,5 °C. Die Auswirkungen des Temperaturanstiegs äußern sich deutlich im Rückgang der aktiven Alpengletscherfläche auf 40 bis 50 % (von 1980) bis 2050, und auf 15–20 % bis 2100.

Die prognostizierte Niederschlagsveränderung fällt sehr unterschiedlich aus. Während das Schweizer Modell eine Abnahme des Jahresniederschlags zeigt, ergeben die anderen Modelle eine Zunahme des Niederschlags auch südlich des Alpenhauptkamms. Aussagen über Extremereignisse sind mit zusätzlicher Unsicherheit behaftet und eigentlich nicht aus diesen Daten ableitbar.

## 5 Klimaänderungen für Österreich

Zuerst werden die Beobachtungen analysiert und dann wird die zu erwartende Entwicklung diskutiert.

Die langfristige Niederschlagsentwicklung im Donaeinzugsgebiet flussauf von Wien zeigt *Bild 7*, woraus ein niederschlagsärmerer Zeitabschnitt zwischen 1850 und 1870 abzulesen ist. Insgesamt zeigt die Zeitreihe des Jahresniederschlags eine hohe Variabilität, während das geglättete Mittel ziemlich konstant verläuft. Die Auswertung beruht auf 28 HISTALP-Niederschlagsreihen. Eine Analyse für Kärnten (Moser et al., 2002) zeigt eine langfristige Abnahme der Niederschläge (*Bild 8*).

Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf Deutschland zu untersuchen, wurde ein regionales Klimamodell in das globale Klimamodell eingebettet, und die Klimaentwicklung für das Gebiet Mitteleuropas mit einem Raster von 10 km Seitenlänge gerechnet. Dafür wurde die am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte Modellkette ECHAM5/MPI-OM und REMO verwendet. Die nachfolgenden *Bilder 9 und 10* wurden für Österreich aus den Darstellungen des Berichts des Umweltbundesamts (2008) ausgeschnitten.

## Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich

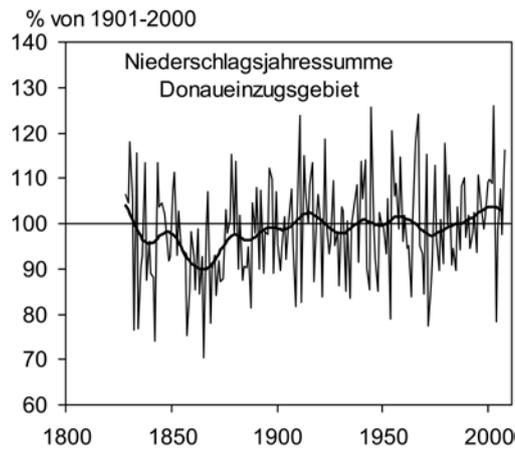


Bild 7: Flächenmittel der Jahressummen des Niederschlags im Einzugsgebiet der Donau oberhalb Wiens (Auer et al., 2007)

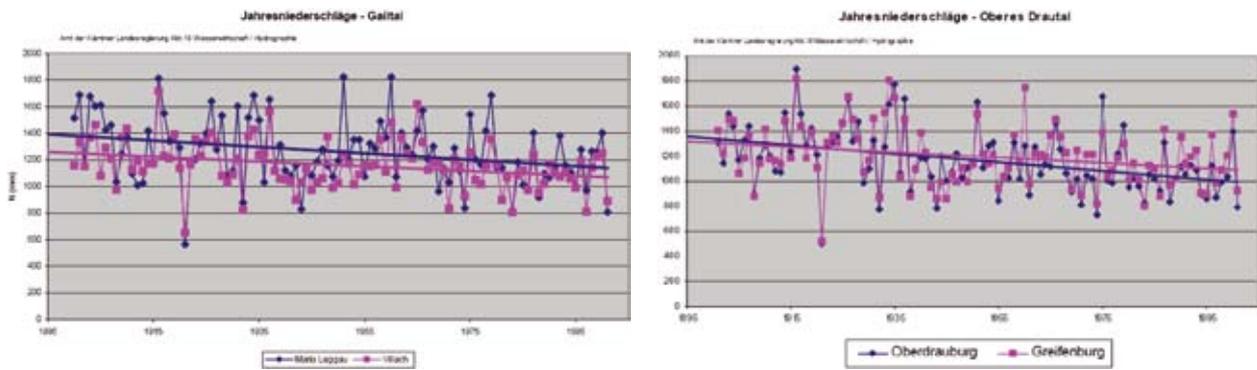
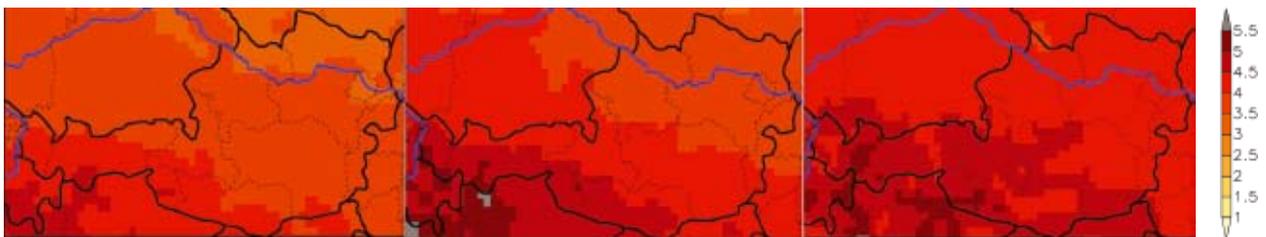


Bild 8: Langfristige Entwicklung der Jahresniederschläge in Kärnten (Moser et al., 2002)



a) Jahr

b) Sommer

c) Winter

Bild 9: Änderung der Temperaturen für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Zeitraum 1961–1990 (entnommen aus UBA, 2008, S. 111–115)

Demnach sollte im Winter, insbesondere im Süden und Südwesten, ein höherer Anstieg, bis zu 4,5 °C, als im übrigen Bundesgebiet zu erwarten sein, der mit 3–3,5 °C im Jahresdurchschnitt angegeben ist.

Die Darstellungen der Niederschlagsänderungen sind in *Bild 10* wiedergegeben. Im Jahresdurchschnitt sollten demnach nur sehr geringe Änderungen des Niederschlags zu erwarten sein; im Sommer sollten die Niederschläge abnehmen, während im Winter eine Zunahme zu erwarten wäre. Es besteht ein hohes Maß an Unsicherheit für den alpinen Bereich.

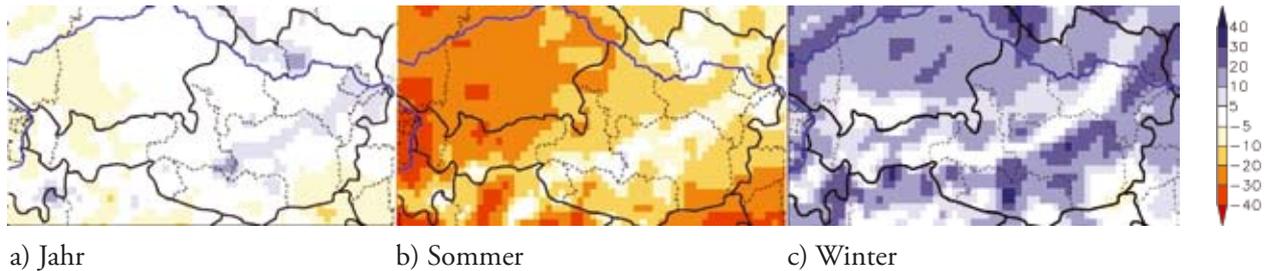


Bild 10: Prozentuelle Änderung des Niederschlags für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Zeitraum 1961–1990 (entnommen aus UBA, 2008, S. 111–115)

## 6 Auswirkungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft

Zuerst werden die historisch beobachteten Veränderungen dargestellt und dann die durch Simulationen gewonnenen Veränderungen diskutiert. Allgemein ist festzuhalten, dass die in jüngerer Vergangenheit beobachteten Veränderungen tendenziell mit den Simulationen für die nächsten Jahrzehnte vergleichbar sein sollten, doch sollte eine Trendfortschreibung vermieden werden. Digitale Daten des Hydrografischen Dienstes liegen für die meisten Messstellen etwa ab 1951 vor und daher beziehen sich etliche der nachfolgenden Darstellungen auf den Zeitraum von 1950–2000.

### 6.1 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur zeigt einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Entwicklung der Lufttemperatur. Bild 11 zeigt die Entwicklung der Wassertemperatur des Bodensees und der Gail – Beispiel eines Fließgewässers – seit 1900 und für den Neusiedler See seit 1951. Das gleitende Mittel über 10 Jahre ergibt für den Bodensee seit 1970 eine kontinuierliche Steigerung von ca. 1,5 °C in 35 Jahren. Die Temperatur des Neusiedler Sees ist nach einer Periode der Abnahme von 1965 bis 1975 in den folgenden 30 Jahren um ca. 2 °C angestiegen. Weniger stark als bei den Seemessstellen hat sich die Wassertemperatur an der Gail verändert. Aber auch hier ist ein Anstieg seit den 70er-Jahren um ca. 1 °C zu erkennen.

Der Anstieg der Lufttemperatur zeigt sich in allen Höhenlagen und damit auch in einer Erhöhung der Abflüsse an Messstellen, die einen relativ hohen Gletscheranteil haben. Auffallend dabei ist, dass diese Veränderungen in den Sommermonaten Juni bis August in der Vergangenheit deutlicher zu erkennen sind als in den Jahresmittelwerten im Beobachtungszeitraum. Bild 12 zeigt die Zeitreihen der Lufttemperatur und des Abflusses an der Messstelle Vent in den Ötztaler Alpen. Während die Jahresmittelwerte der Parameter Temperatur und Abfluss seit den 60er-Jahren kontinuierlich und signifikant angestiegen sind, erhöhten sich die entsprechenden Mittelwerte für den Monat Juni in den vergangenen 20 Jahren sehr rasch um ca. +2 °C bzw. um ca. +5 m<sup>3</sup>/s. Dieses Ergebnis zeigt, dass vor allem bei Trenduntersuchungen im Zusammenhang mit Aussagen zum Klimawandel die saisonale Veränderung zu berücksichtigen ist.

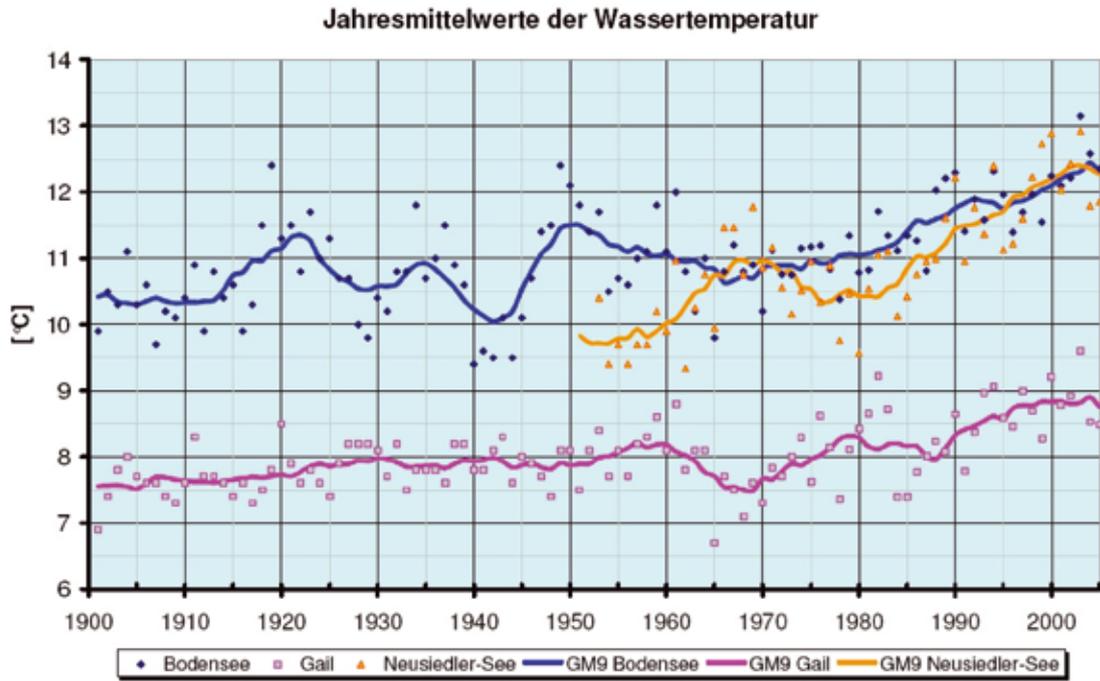


Bild 11: Entwicklung der Wassertemperatur an ausgewählten Gewässern in Österreich seit 1900

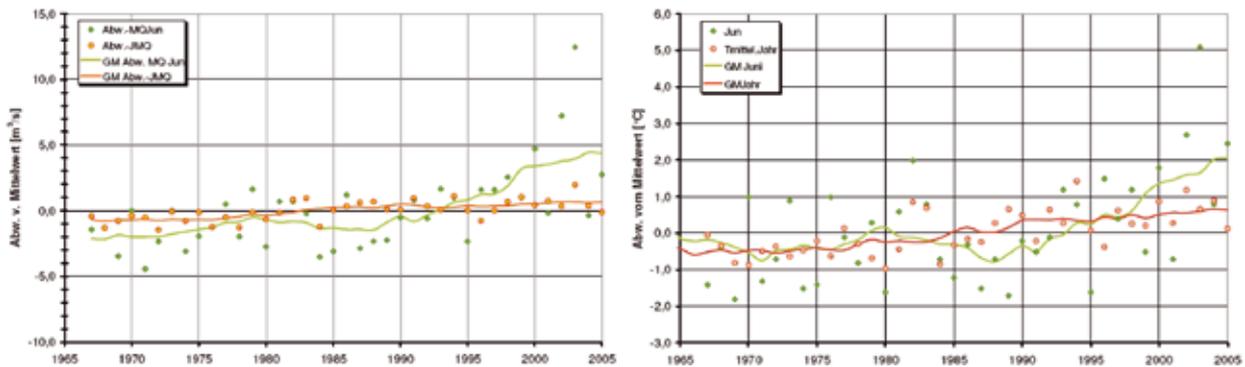


Bild 12: Veränderungen der Lufttemperatur und des Abflusses an der Messstelle Vent – dargestellt als Abweichung vom langjährigen Mittelwert

## 6.2 Wasserbilanz

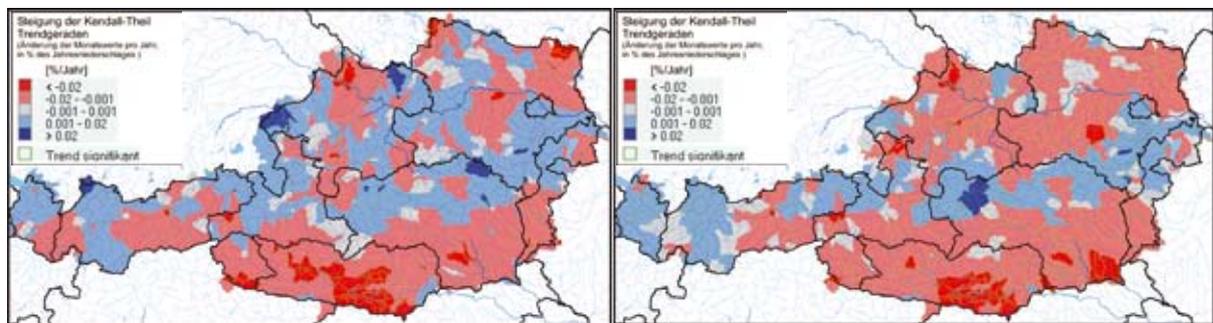
Die Grundlage für die Wasserwirtschaft bilden die Bilanzkomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss. In einer Studie (Fürst et al., dieses Heft) wurden diese Anteile für sämtliche Einzugsgebiete erfasst, wobei auf Ausleitungen und Speichereinflüsse Bedacht genommen wurde. Es wurde für den Zeitraum 1950–2006 eine Simulation aller Einzugsgebiete auf der Basis von Monatsschritten durchgeführt. Einige der Ergebnisse sind im Hydrologischen Atlas Österreichs (BMLFUW, 2007) erläutert und werden nachfolgend zusammengefasst.

Ein Vergleich der aktuellen Berechnung (2007) mit der Analyse von Kresser (1994) zeigt im Jahresmittel nur geringe Unterschiede.

Tabelle 1: Vergleich der Wasserbilanzkomponenten Österreichs

	BMLFUW (2007)	Kresser (1994)
Niederschlag	1144 mm	1170 mm
Abflusshöhe	634 mm	654 mm
Akt. Verdunstung	510 mm	516 mm

Längerfristige Analysen der Bilanzkomponenten zeigen auf Jahresbasis nur geringe Trends. Nördlich der Alpen ist eine leichte Zunahme der Niederschlagsmengen (Bild 13 a) festzustellen, während südlich des Alpenhauptkamms gegenläufige Tendenzen zu erkennen sind. Infolge der Temperaturerhöhung nimmt die Evapotranspiration zu und der Abflussanteil (Bild 13b) fällt tendenziell ab. Dies ist im Süden des Bundesgebiets deutlich erkennbar und wurde auch durch Zeitreihenanalysen einzelner Stationen bestätigt (siehe Bild 8). In einigen Gebieten ist dieser Rückgang sogar statistisch signifikant. Da es sich um Simulationsrechnungen handelt, sind Speicher- und Kraftwerkseffekte nicht wirksam.



a) Trend in Monatsniederschlägen

b) Trend in Monatsabflusswerten

Bild 13: Jahresauswertung der Trends in den monatlichen Abflusshöhen für den Zeitraum von 1950 bis 2006 (aus Fürst et al., 2007)

Im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten (Nachtnebel et al., 1999, 2001, 2004) wurden einige Regionen Österreichs (Gail-, Enns-, und Traiseneinzugsgebiet, Marchfeld und Leibnitzer Feld) mithilfe von stochastischen Downscaling-Verfahren in ihrer Reaktion auf geänderte Klimabedingungen analysiert. Mit Hilfe dieser Methode wurden Zeitreihen der Temperatur und des Niederschlags mit hoher räumlicher Auflösung für verschiedene zukünftige Zeitabschnitte generiert und damit hydrologische Modelle betrieben.

In allen Gebieten ist bis etwa zum Ende dieses Jahrhunderts ein Temperaturanstieg von 2,5 bis 4 °C im Jahresmittel zu erwarten. Der Temperaturanstieg ist in den Sommermonaten etwas deutlicher ausgeprägt als in den Wintermonaten. Am geringsten ist die Temperaturzunahme in den Monaten Februar und März. In den Tallagen ginge demnach der Temperaturanstieg bis zu 4 °C, während in den hohen Lagen (über 2.000 m) der Anstieg bei 2–3 °C läge. Es nimmt die Verdunstung deutlich zu und die Jahresabflussfracht geht zurück.

Generell ist keine eindeutige Niederschlagsveränderung aus den abgeleiteten Daten erkennbar. Sowohl die Niederschlagsmengen als auch die saisonale Verteilung sind für den heutigen Fall und zukünftig ähnlich. Tendenziell zeigen die Simulationen eine leichte Abnahme im Süden Österreichs, während in den nördlichen Staulagen sogar Zunahmen zu erwarten wären.

## Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich

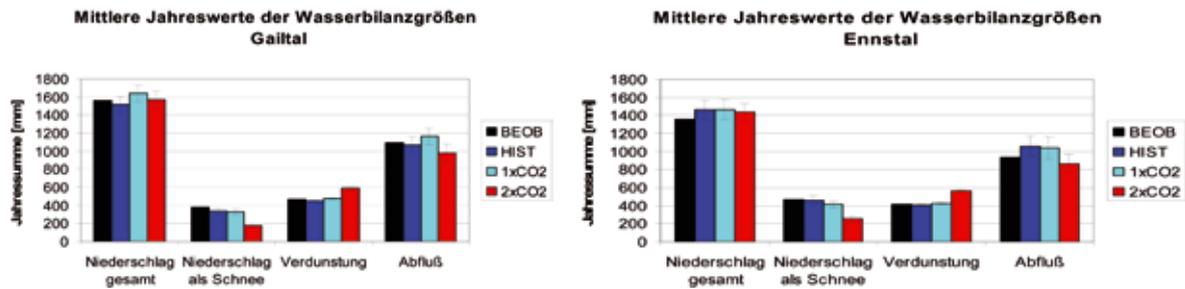


Bild 14: Veränderung der Wasserbilanzkomponenten im Gailtal (Pegel Federaun) und im Oberen Ennsgebiet (Pegel Liezen) (aus Nachtnebel und Fuchs, 2001)  
 schwarz: heutiger Zustand, dunkelblau: aus historischen Druckverteilungen berechnet, hellblau: Klimasimulation für 1961–1990, rot: Klimasimulation 2070–2000

Die ersten drei Balken sollten ein möglichst ähnliches Ergebnis zeigen, da sie sich auf den abgelaufenen Zeitraum 1961–1990 beziehen. Das Klimasignal sollte sich im Unterschied zwischen dem hellblauen und dem roten Balken zeigen. Ergänzend sind noch die Unsicherheiten in den Simulationen durch Schwankungsbereiche gekennzeichnet.

In Bild 14 ist für beide Gebiete eine leichte Abnahme des Jahresniederschlags abzulesen, die im Süden etwas größer erscheint. Der feste Niederschlag (Schnee) geht um mehr als die Hälfte zurück, im Süden ist die Abnahme noch etwas größer. Infolge der erhöhten Temperaturen nimmt die Evapotranspiration zu und die Bilanzkomponente Abfluss nimmt daher ab. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für das Traisengebiet, sodass von einem Rückgang des Abflusses in weiten Gebieten auszugehen ist. Für Westösterreich und in hochalpinen Lagen kann sich bei Niederschlagszunahme in hohen Lagen und infolge des verstärkten Gletscherabflusses ein anderes Bild ergeben.

Im Jahresgang zeigt sich beim Abfluss in den Frühjahrs- und Sommermonaten ein starker Rückgang und insgesamt eine deutliche Vergleichsmäßigung des Abflussregimes. Besonders deutlich ist der Rückgang in den Monaten Mai und Juni. Eine Zunahme des Abflussgeschehens ist in den Wintermonaten zu erwarten, da ein größerer Anteil an flüssigen Niederschlägen auftritt und die Schneeschmelze in niederen Lagen auch im Winter wirksam ist. Insgesamt kommt es in den alpinen Gebieten zu einer saisonalen Dämpfung des Abflussgeschehens und zu einer Verschiebung der Niederwasserzeiten vom Winter in den Spätsommer. Die Anzahl der Frosttage und Tage mit Schneebedeckung (Bild 15) nimmt um etwa 50 % ab. Die Schneelagen verschieben sich gegenüber dem heutigen Zustand um etwa 400–600 m bergwärts.

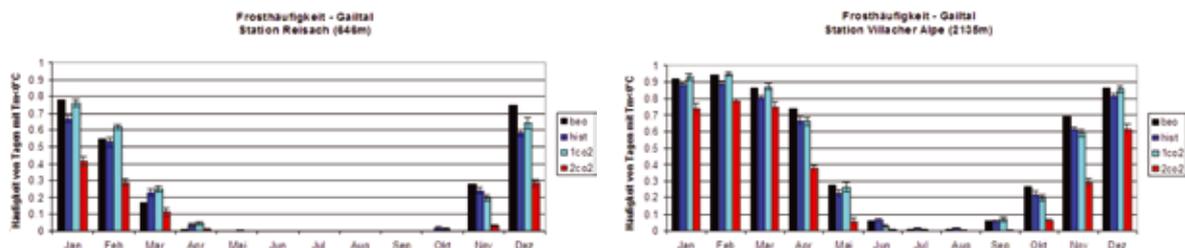


Bild 15: Veränderungen in der Anzahl der Frosttage für eine Tal- und Bergstation im Gailtal für den Zeitraum 2070–2100 (aus Nachtnebel und Fuchs, 2001)

### 6.3 Gletscher

Die österreichischen Gletscher stellen einen wichtigen Speicher im Wasserkreislauf des Landes dar: Das Eisvolumen wurde für das Jahr 1998 auf ca. 17 km<sup>3</sup> geschätzt (Lambrecht und Kuhn 2007). Als Wasseräquivalent von rund 16 km<sup>3</sup> entspricht das auf die Gesamtfläche von Österreich bezogen einer Wasserhöhe von 190 mm oder 16 % eines mittleren Jahresniederschlags. Seit dem Gletscherhöchststand Mitte des 19. Jahrhunderts haben die Alpengletscher auffällig an Fläche und Volumen abgenommen. Insgesamt ergibt sich für den Zeitraum von 1960 bis 1990 folgendes Bild: Die Fläche aller vergletscherten Gebiete Österreichs ist von 567 auf 471 km<sup>2</sup> zurückgegangen und hat damit um 17 % abgenommen; das Volumen reduzierte sich von ca. 23 auf ca. 17 km<sup>3</sup>; dies entspricht einer Reduktion der Eisdicke um ca. 10 m (Kuhn, 2007; dieses Heft). Da bei zunehmendem Temperaturanstieg weitere Gletscherflächen dem Abschmelzen ausgesetzt sind, ist davon auszugehen, dass in den nächsten vierzig Jahren der Schmelzanteil noch zunehmen wird, ehe dann die Volumsverkleinerung dominiert und der Beitrag rückläufig wird. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts würden demnach nur mehr vereinzelte Gletscherreste bestehen.

Bezogen auf die Wasserbilanz Österreichs beträgt der Abflussanteil aus dem in dreißig Jahren abgeschmolzenen Gletschervolumen unter 2 mm/Jahr und liegt damit weit unter einem Prozent des Abflusses. Da dieser Schmelzbeitrag aber nur einige Monate im Jahr zur Verfügung steht und besonders im hochalpinen Bereich wirksam wird, zeigt sich in einigen Alpentälern der Gletschereinfluss ganz deutlich.

### 6.4 Extremereignisse: Hochwässer und Niederwässer

Dass Hochwasserereignisse infolge des Klimawandels extremer ausfallen und häufiger auftreten werden, ist eine oft gehörte Feststellung, die durch Beobachtungen nicht belegbar ist, und auch in den Klimasignalen zeigt sich kein einheitlicher Effekt. *Bild 16* zeigt das Ergebnis einer Trenduntersuchung der Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt für die Zeitreihen mit mehr als 50-jährigen Beobachtungsdauer. Daraus ist kein einheitliches regionales bzw. zeitliches Verhalten abzulesen und die identifizierten positiven bzw. negativen Trends und deren Signifikanz sind nicht eindeutig in Verbindung mit der Klimaänderung (Erwärmung) zu sehen. Direkte anthropogene Effekte, wie Verlust an natürlichen Retentionsräumen, Begradigung und Einstau der Fließgewässer sowie die Zunahme von versiegelten Flächen haben ebenfalls deutlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen, insbesondere bei Hochwässern.

Der festgestellte positive Trend an der Donau steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der Zunahme von Ereignissen in der Größenordnung von HQ<sub>5</sub>–HQ<sub>10</sub>. Eine Erklärung dafür wäre der Ausbau der Donau zur Nutzung der Wasserkraft und die damit verbundene Reduktion von natürlichen Retentionsflächen. Eine Analyse der Jahreshochwässer am Pegel Kienstock (Krems-Stein) zeigt keine erkennbare Veränderung in den extremen Hochwässern (Nachtnebel und Debene, 2004). Es wurde aus einer gleitenden Reihe von 50 Jahreshöchstwerten jeweils ein HQ<sub>100</sub> geschätzt und dieses mit dem Konfidenzbereich in *Bild 17* dargestellt.

Wesentlich deutlicher sind die Veränderungen im Niederwasser. *Bild 18* zeigt im Winter eine seit Beginn der Beobachtungen steigende Tendenz der Niederwässer. Im Sommer hingegen ist ab 1980 eine deutliche Reduktion der Niederwasserführung zu erkennen. Ein ähnliches Verhalten ist auch



Bild 16: Trends der Jahresmaxima für Messstellen mit mehr als 50 Jahren Hochwasserdaten (JHQ<sub>max</sub>) (↑↑... signifikant steigend; ↑... steigend; ↓↓... signifikant fallend; →... gleich bleibend)

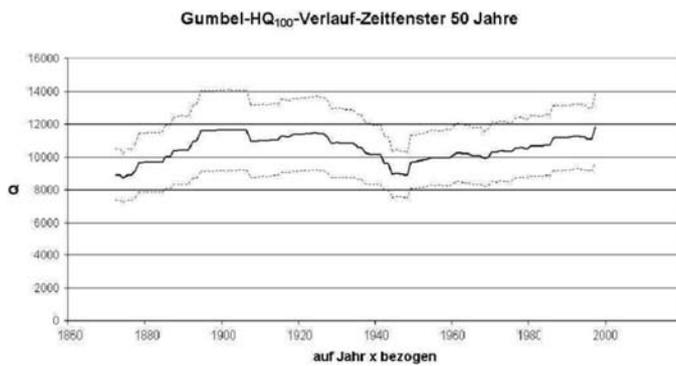


Bild 17: Zeitliche Entwicklung des HQ<sub>100</sub> für den Pegel Kienstock

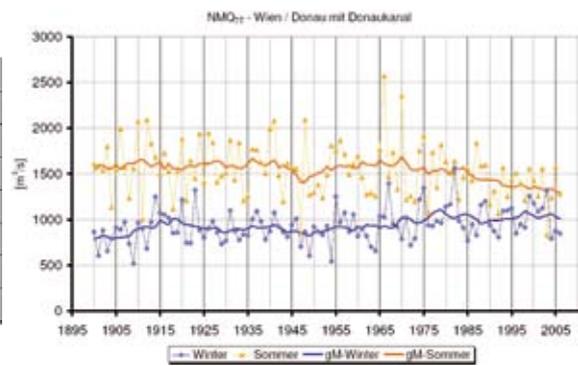


Bild 18: Zeitliche Entwicklung der Niederschläge für die Donau-Pegel Reichsbrücke und Donaukanal

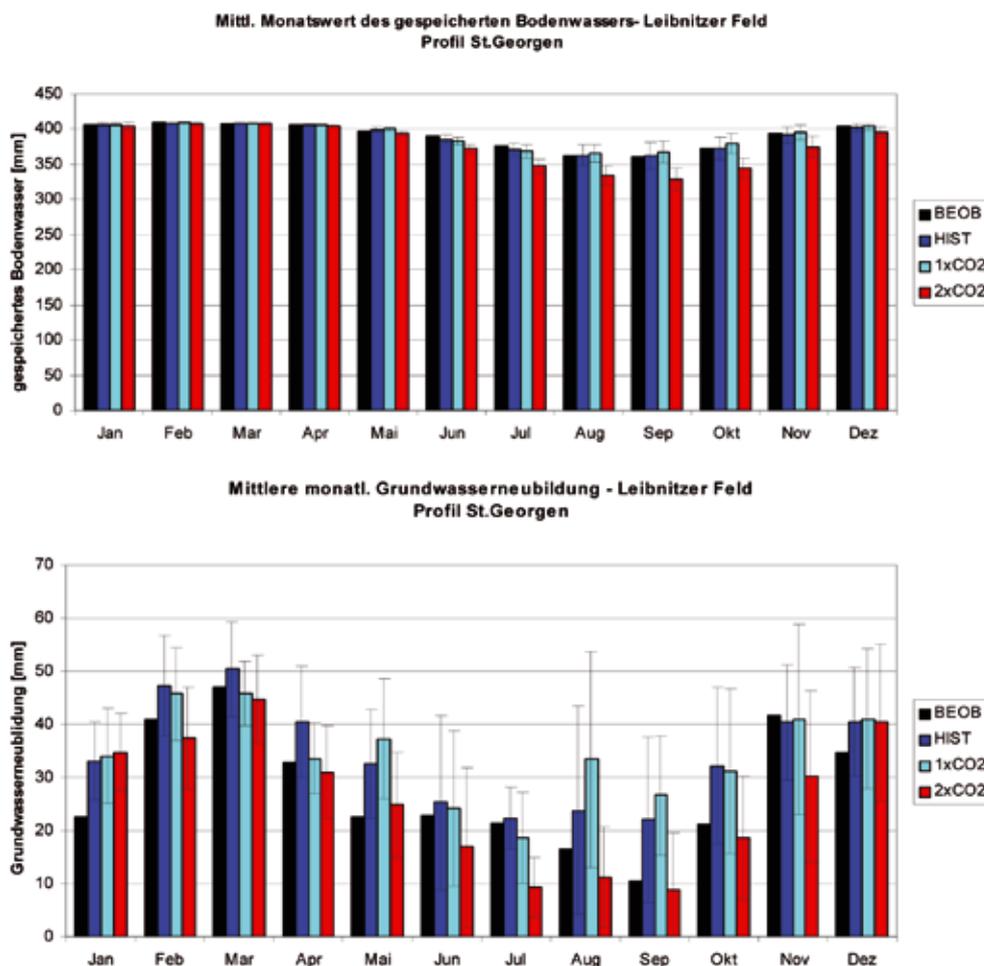
an vielen Messstellen im Süden Österreichs (Kärnten und Steiermark) festzustellen, die eine Abnahme der saisonalen Niederschläge im Frühling und im Sommer aufweisen.

## 6.5 Boden- und Grundwasser

Das Marchfeld und das Leibnitzer Feld wurden mit der gleichen Methodik bearbeitet, wie sie bei den alpinen Einzugsgebieten erläutert wurde. Es wurden die Änderungen der Verdunstung, des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mithilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells analysiert.

Infolge der zukünftig deutlich erhöhten Temperatur nimmt die Verdunstung zu. Obwohl der Bodenwasserhaushalt in den Sommermonaten zukünftig deutlich geringer sein wird, sollte in den niederschlagsreicheren Gebieten noch kein Einfluss auf das Pflanzenwachstum zu erwarten sein. Im Osten und Südosten Österreichs ist durchaus ein negativer Effekt infolge des Bodenwasserrückgangs zu erwarten.

Aus *Bild 19* wird deutlich, dass derzeit die Grundwasserneubildung im Leibnitzer Feld hauptsächlich in den Monaten Oktober bis Mai erfolgt, mit einem Maximum im März, wobei aber auch hier die Konfidenzintervalle extrem breit sind. Gegen Ende dieses Jahrhunderts käme es dann zu einer stärkeren Saisonalität der Grundwasserneubildung mit sehr geringen Werten im Sommer und relativ hohen Werten im Winter. Insgesamt geht die jährliche Neubildungsrate um etwa 25 % zurück. In einzelnen Jahren ist dieser Effekt noch ausgeprägter. Für niederschlagsarme Gebiete, wie das Marchfeld, ist ein Rückgang der Grundwasserneubildung um mehr als 60 % zu erwarten. Dalla-Via (dieses Heft) gibt für die Oststeiermark einen zukünftigen Rückgang in der Grundwasserneubildung von ca. 40 % an. Ebenso verlängern sich die Trockenphasen deutlich, gekennzeichnet durch niedrige Bodenfeuchten. Diese Auswirkungen müssten durch vermehrte Beregnung kompensiert werden, was die Grundwasservorkommen zusätzlich unter erhöhten Nutzungsdruck stellt.



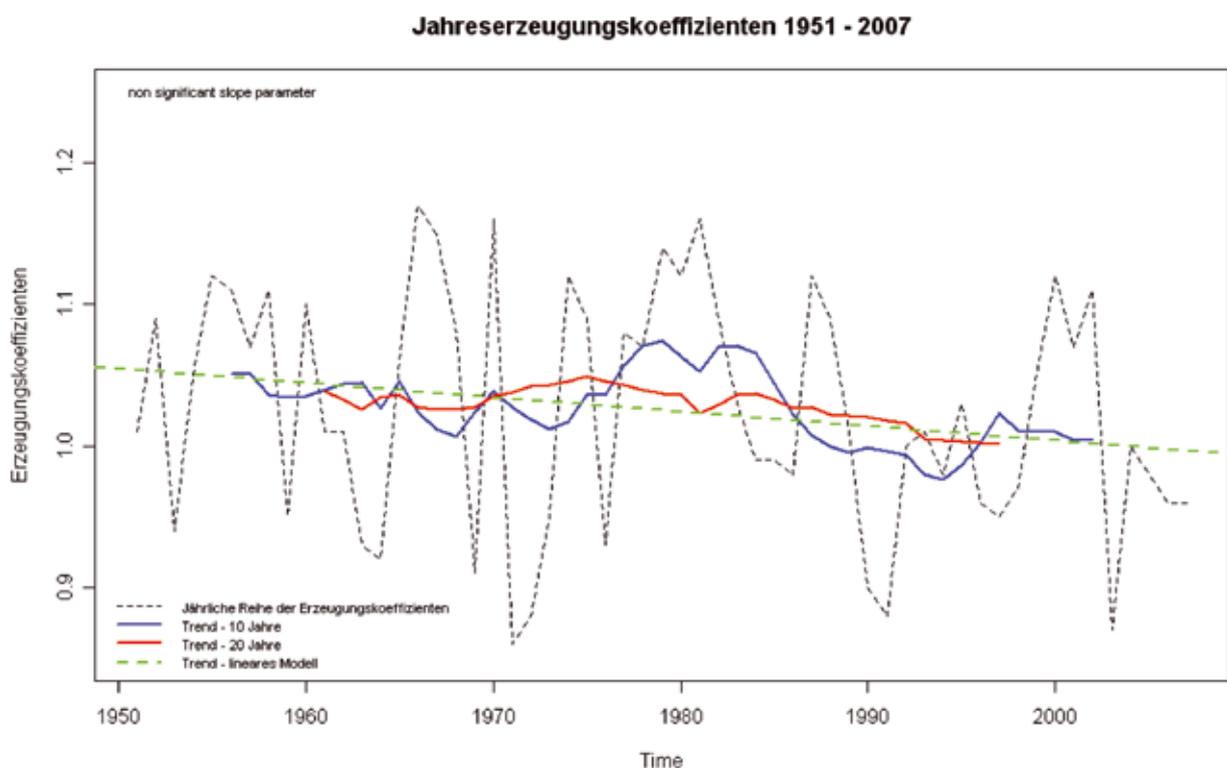
*Bild 19: Bodenfeuchte und Grundwasserneubildung im Leibnitzer Feld (aus Nachtnebel und Fuchs, 2001)*

## 6.6 Folgewirkungen für die Wasserkraft

Durch den Klimawandel ergeben sich für die Wasserkraft grundsätzlich geänderte Rahmenbedingungen. Einerseits ist die Wasserkraft als erneuerbarer und schadstofffreier Energieträger ein wesentlicher Faktor im Bereich der Stromproduktion, andererseits ist die Wasserkraft selbst durch

die Änderungen im Wasserhaushalt durch einen möglichen Klimawandel betroffen. Anhand der jährlichen Erzeugungskoeffizienten der Laufkraftwerke der Austrian Hydro Power AG (AHP) wurden mögliche Auswirkungen simuliert.

Verwendet wurde dabei die Jahresreihe von 1951 bis 2007. Der Erzeugungskoeffizient ist der Quotient aus dem Arbeitsvermögen und dem Regelarbeitsvermögen eines oder mehrerer Wasserkraftwerke. Das Arbeitsvermögen gibt an, welche Energie die betrachteten Anlagen aufgrund des hydraulischen Dargebots erzeugen hätten können. Das Regelarbeitsvermögen stellt das langjährige Mittel der tatsächlich erzeugten Energie dar. Der Erzeugungskoeffizient ist daher ein Maß dafür, ob aufgrund der Wasserführung im betrachteten Zeitraum die Erzeugung über- oder unterdurchschnittlich war. *Bild 20* zeigt, dass die Jahresreihe 1951 bis 2007 einen leicht fallenden Trend aufweist, der jedoch statistisch nicht signifikant ist.



*Bild 20: Jahreserzeugungskoeffizient 1951–2007*

In den monatsbezogenen Erzeugungskoeffizienten zeigt sich in den Wintermonaten ein signifikanter Anstieg, während im Sommer ein signifikantes Absinken stattgefunden hat. Eine Simulationsstudie, die mittels Boot-Strapping durchgeführt wurde, setzt diese Trends bis etwa 2030 fort.

Aus diesen Simulationen ergeben sich die simulierten Erzeugungskoeffizienten für die Zeitpunkte 2008 und 2028). Deutlich zu erkennen sind die durch den signifikanten Trend verursachten Verschiebungen in den Winter- und Sommermonaten: In den Wintermonaten kommt es zu einer positiven Verschiebung der Verteilung, in den Sommermonaten kommt es zu einer negativen Verschiebung der Verteilung.

Mit welchen Auswirkungen muss nun in der Energiewirtschaft gerechnet werden?

In einer Studie von Nachtnebel und Fuchs (1999) wurde für die Wasserkraft aufgrund vorhandener Klimamodelldaten ein Rückgang der Jahreserzeugung von 3–8 % ermittelt. Dieser Wert ist mit einer großen Unsicherheit behaftet. Wahrscheinlicher ist der bereits erwähnte Effekt einer Sommer-/Winterverlagerung bei annähernd gleich bleibender Jahreserzeugung. Das würde für die Wasserkraft zukünftig sogar eine Vergleichmäßigung und somit einen positiven Effekt bedeuten. In den nächsten Jahren wird es in den höheren Lagen zu einer Kompensation durch Gletscher kommen, doch wird der Höhepunkt voraussichtlich in 40 Jahren erreicht sein und nach weiteren 30 Jahren der Einfluss der Gletscher negierbar sein. Für die gesamte Wasserwirtschaft wird das zur Folge haben, dass die Umlagerungsfunktion der alpinen Speicher zunimmt.

Durch den Rückgang der Gletscher und den Anstieg der Temperaturen, wird im Hochgebirge das Thema des Permafrosts neue Bedeutung gewinnen. Durch das Auftauen bis jetzt gefrorener Bodenschichten wird es teilweise zu Instabilitäten in Hängen, vor allem aber zu einem vermehrten Feststoffeintrag in die Gewässer kommen. Die Anforderungen hinsichtlich des Sedimenthaushalts beim Betrieb von Wasserkraftanlagen werden eine zukünftige Herausforderung darstellen.

Abschließend muss jedoch gesagt werden, dass der Handlungsbedarf aus heutiger Sicht schwer abschätzbar ist, da die einzelnen Modelle noch recht ungenau sind und die Auswirkungen daher sehr schwer interpretier- und darstellbar sind.

## **7 Auswirkungen auf die Biologie**

Infolge der Temperaturzunahme ist eine weitere Invasion Wärme liebender aquatischer Vegetationselemente zu erwarten (Janauer, diese Heft). Die Verbreitung erfolgt dabei vorwiegend entlang der Donau, wobei thermophile Elemente aus dem unteren Donaauraum flussauf vordringen, und sich aus dem atlantischen Bereich Makrophyten über den Rhein-Main-Donau-Kanal flussab verbreiten. Für die heimische Makrophytenvegetation sind Gefährdungen vor allem in stehenden und langsam fließenden Gewässer oder Gewässerabschnitten gegeben. Viele der neuen Arten haben starke Auswirkungen auf das befallene Gewässersystem, besonders aber auf die vorher dort wachsenden Wasserpflanzen. Es ergeben sich eine Gefährdung der heimischen Biodiversität und Auswirkungen auf die Fisch- und Evertbratenfauna und Sportfischerei.

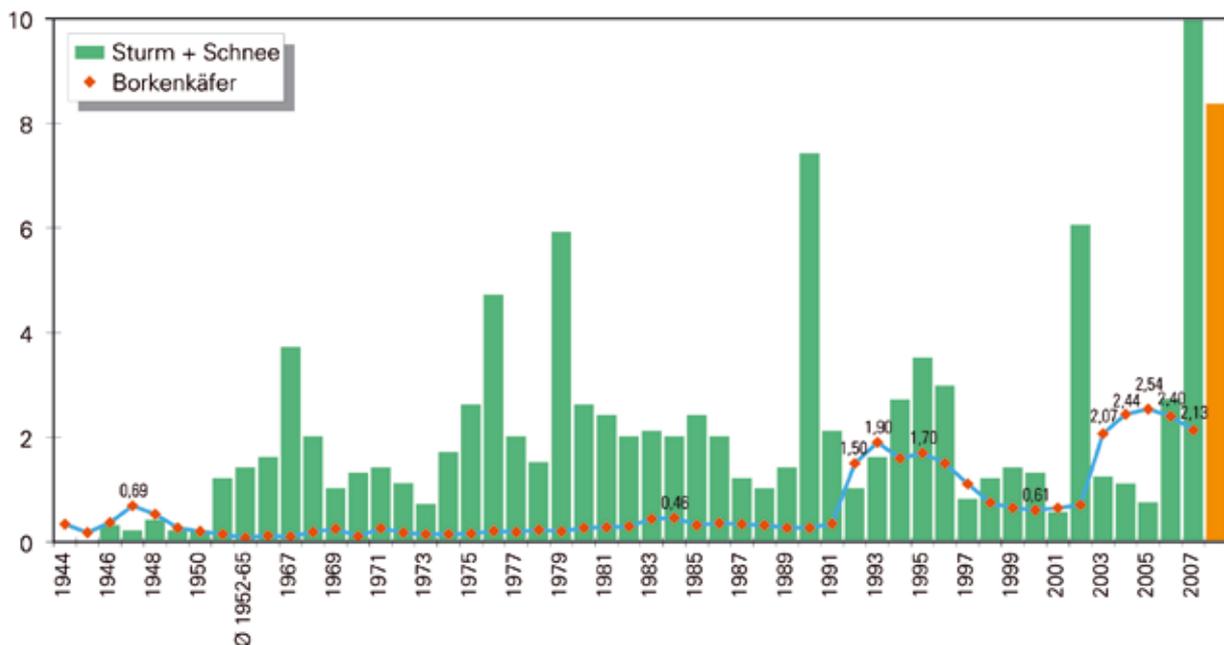
Wissenschaftlich besteht darüber Konsens, dass eine globale Erwärmung für die meisten Kälte liebenden Fischarten in einer Verschiebung ihrer Lebensräume gegen höhere Breiten und in größere Seehöhen resultieren wird (Mohseni et al., 2003). Man geht auch davon aus, dass Kälte liebende durch Wärme liebende Arten ersetzt werden. Diese Annahme wird durch paläoklimatische Untersuchungen unterstützt, die derartiges für die glazialen und interglazialen Perioden des Pleistozän belegen. Übertragen auf Österreich würden die bisherigen Erkenntnisse ein Zurückdrängen der Salmoniden bedeuten. Einzelne Arten, wie z. B. die Äsche, sind derzeit infolge anderer anthropogener Eingriffe in ihrem Bestand schon so stark gefährdet, dass zusätzliche, klimabedingte Beeinträchtigungen sie an den Rand des Aussterbens bringen könnten. Jedoch nicht nur einzelne Arten, sondern die gesamte Lebensgemeinschaft ist von den Klimaänderungen betroffen. Dies kann sich in einer Verschiebung des Fischregionsindex zeigen (Schmutz et al., 2004). Räumlich betrachtet entspricht dies einer Verlagerung der Fischregionen nach flussauf, sofern dies im Gewässer noch möglich ist.

## 8 Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft

Die zunehmenden Temperaturen erhöhen das Verdunstungspotenzial überproportional, was eine Zunahme der Beanspruchung der Bodenwasserressourcen durch die Vegetation bedeutet. In den niederschlagsarmen Anbauregionen Österreichs (Eitzinger et al., dieses Heft) würden insbesondere Sommerkulturen zunehmendem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sein. Wasser sparende Kulturen, Anbautechniken, Fruchtfolgen werden dadurch an Bedeutung gewinnen. Eine Zunahme des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfes ist ebenfalls eine logische Folge.

Durch den Düngungseffekt des zunehmenden Kohlendioxidgehaltes der Luft würde sich das Ertragspotenzial der gängigen Kulturpflanzen erhöhen. Zunehmende Temperaturen erhöhen bei gleich bleibender 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.

C3-Pflanzen, zu denen unsere Waldbäume gehören, reagieren auf erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit einer reduzierten stomatären Leitfähigkeit, einem dadurch reduzierten Wasserverbrauch und einer erhöhten Wassernutzungseffizienz (Leutzinger und Körner, 2007). Damit wirkt dieser Faktor zum Teil dem durch die Temperaturerhöhung gesteigerten Verdunstungsanspruch entgegen. Obwohl die Prognosen im Hinblick auf Klimawandel mit Unsicherheiten behaftet sind, dürfte die Gefährdung, d. h. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremereignissen regional steigen. Wie die Wälder auf derartige Störungen reagieren, ist aus den langjährigen Beobachtungen der Schadholzmengen infolge Sturm und Schneebruch sowie Borkenkäferbefall zu ersehen (*Bild 21*).



*Bild 21: Zeitreihen von Schadholzmengen infolge von Borkenkäferbefall, Sturm und Schneebruch (Tomiczek und Steyrer, 2003, mit freundlicher Genehmigung des BWF Wien)*

## 9 Zusammenfassung

Für Österreich liegen keine umfassenden Klimaanalysen und Klimafolgeuntersuchungen wie für die Schweiz und Deutschland vor. Eine Reihe von einzelnen Arbeiten sowie die Analysen in Nachbarstaaten lassen darauf schließen, dass bis zum Ende dieses Jahrhunderts im Jahresmittel die Temperaturen bis zu 4,5 °C ansteigen. Im Sommer sollte die Erwärmung ausgeprägter sein. Die Aussagen zu den Niederschlagsänderungen sind widersprüchlich und werden durch den Umstand erschwert, dass die Alpen einen Übergangsbereich darstellen, wobei nach Norden hin eine Zunahme und nach Süden eine deutliche Abnahme zu erwarten ist. Die Sommerniederschläge sollten tendenziell abnehmen, während die Winterschläge steigen sollten.

Durch die erhöhte Temperatur geht der Schneeanteil am Niederschlag deutlich, bis zu 50 % zurück und die Klimazonen verschieben sich im Alpenraum um 400–600 Höhenmeter bergwärts. Die Anzahl der Frosttage und die Tage mit Schneebedeckung gehen im Talbereich dramatisch zurück. Die Auswirkungen auf den Wintertourismus können durch Beschneiungsanlagen nur zum Teil in höheren Lagen kompensiert werden.

Infolge der erhöhten Verdunstung zeigt der Jahresabfluss eine fallende Tendenz, die bis zum Ende des Jahrhunderts 12–18 % betragen kann. Winterabflüsse steigen, Sommerniederwässer werden im Voralpenraum verstärkt. Dies bedeutet, dass die hydroelektrische Jahresenergieerzeugung zwischen 3–8 % abnimmt, aber die Wintererzeugung steigt, sodass die Erzeugung besser der Nachfrage angepasst ist.

Der Einfluss der Gletscher erhöht in den nächsten vierzig Jahren in den Schmelzphasen den Abfluss, was für die Wasserbilanz Österreichs vernachlässigbar ist, aber für vergletscherte und alpine Einzugsgebiete einen deutlichen Effekt auf den Abfluss haben kann. Seit 1960 verloren die Gletscher bereits ein Volumen von 4,9 km<sup>3</sup>, bei einem Gesamtvolumen von 17 km<sup>3</sup> im Jahre 1998.

Durch den Rückgang der Gletscher und den Anstieg der Temperaturen wird im Hochgebirge das Thema Permafrost neue Bedeutung gewinnen. Durch das Auftauen bis jetzt gefrorener Bodenschichten wird es zu Instabilitäten in Hängen kommen, wodurch Steinschlag, Hangrutschungen und Massebewegungen zunehmen werden.

In Bezug auf Extremereignisse besteht kein einheitliches Bild. Potenziell besteht die Möglichkeit für verstärkte Starkregenereignisse, doch zeigen die Simulationen kein entsprechendes Signal. Ebenso konnte in den letzten Jahrzehnten kein derartiger Trend beobachtet werden. Bei anthropogen stark veränderten Flüssen, wie der Donau, ist eine Häufung mittlerer Hochwässer festzustellen.

Die Siedlungswasserwirtschaft könnte in einigen Gebieten, wie im Nordosten Österreichs, infolge der verstärkten Niederwässer und der erhöhten Wassertemperaturen mit weiteren Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen konfrontiert werden. Für die Wasserversorgung ist in den niederschlagsärmeren Gebieten, und insbesondere bei kleinräumigen Versorgungssystemen, ein quantitatives und qualitatives Problem zu erwarten. Ebenso könnte der Bedarf an Kühlwasser steigen. Die Trinkwasserversorgung könnte ebenfalls in einigen Regionen mit quantitativen Problemen konfrontiert sein, doch sollte durch einen erweiterten Netzverbund ein Ausgleich geschaffen werden können.

Mit der Erwärmung ist auch eine Zunahme aller Arten von positiven Temperaturextremwerten (heiße Tage, absolute Maxima etc.) bei etwa analoger Abnahme der negativen Temperaturextremwerte (Frost, absolute Minima etc.) realistisch zu erwarten. In Bezug auf Wind- und Sturmtätigkeit über Mitteleuropa ist keine Veränderung zu erwarten. Diese Nichtzunahme der Sturmtätigkeit in der Zukunft deckt sich mit dem Datenbefund der vergangenen 130 Jahre. Ebenso ist eine Intensivierung von Trockenwetterphasen zu erwarten, da die Sommerniederschläge abnehmen und die Verdunstung gesteigert wird. Dies führt in bereits derzeit niederschlagsarmen Regionen zu einer Verknappung des natürlichen Wasserangebots für die Landwirtschaft, die verstärkt auf Kompensationsmaßnahmen wie z. B. Bewässerungsanlagen zurückgreifen muss.

Die bereits beobachtete Gewässererwärmung, die sich zukünftig noch verstärken wird, führt zu einer Verschiebung des Artenspektrums im Längsverlauf eines Fließgewässers, was insbesondere für die rheophilen und Kälte liebenden Arten problematisch ist.

Für die Forstwirtschaft bedeutet die Klimaänderung eine Anpassung bei der Baumartenwahl, insbesondere bei Umtriebszeiten von 100 Jahren und mehr. Eine Reduzierung des Risikos in Tieflagen kann durch Verzicht auf Fichtenmonokulturen erreicht werden. Eine Abkehr vom Altersklassenwald hin zu Dauerwald mit Naturverjüngung und größerer, standortgerechter Bandbreite an Baumarten wird als eine Möglichkeit gesehen, die Vulnerabilität der Wälder zu verringern. Dieser Trend ist in der forstlichen Praxis bereits zu beobachten. In der Waldinventur ist ein deutlicher Rückgang der Nadelholzreinbestände von 70 % in der Inventurperiode 1971/80 auf 62 % in der Periode 2000/02 und eine Zunahme der Mischbestände und Laubholzreinbestände zu beobachten. In jüngeren sekundären Fichtenbeständen kann durch rechtzeitige Durchforstungsmaßnahmen der Wasserverbrauch gesenkt und der Wasserstress für den Einzelbaum reduziert werden.

## 10 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
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T, 2005. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *International Journal of Climatology*, **25**: 139-166
- BMLFUW, 2007. Hydrologischer Atlas Österreichs. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien. ISBN 3-85437-250-7
- Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C, Weys B, 2007. Gletscher im Klimawandel. ZAMG-Morawa, Wien, 111 Seiten
- Fürst J., Nachtnebel, H.P., Kling, H. und Hörhan. T., 2007. Trends in Niederschlag und Abfluss. Mitt.Blatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich. Heft 85, BMLFUW, Wien
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the 4<sup>th</sup> Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 996 Seiten
- Jones PD und Moberg A, 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate* **16**: 206-223

- Kresser W., 1994. Die Wasserbilanz für das österreichische Bundesgebiet 1961-1990. Mitt.Blatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich. Heft 72, BMLFUW, Wien
- Kuhn, M. (2007) Änderung von Gletschern im 20. Jahrhundert. Karte 4.3 im Hydrologischen Atlas Österreichs. (BMLFUW, Hrsg.).
- Lambrecht, A. und Kuhn, M. (2007). Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, im Druck
- Leutzinger S. and Körner K. 2007. Water savings in mature deciduous forest trees under elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 13, 2498-2508
- Matulla C, Schöner W, Alexandersson H, von Storch H, Wang XL, 2007. European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics* 31: 125-130
- Mohseni, O., Stefan, H.G. und Eaton, J.G., 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in US streams. *Climatic Change* 59, 389-409
- Moser J., C. Mairamhof, J. Wutte, R. Godina, V. Weilguni (2002) Hydrographie Trend der Niederschläge und Abflüsse in Kärnten. Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 18 – Wasserwirtschaft
- Nachtnebel H.P. und A. Debene (2004) Hochwassersituation unter dem Einfluss anthropogener Einwirkungen. Ergebnisse einer Analyse an Donau und Traisen. Im Auftrag der NÖLR
- Nachtnebel H.P. und M. Fuchs (2001) Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluss von Szenarien einer möglichen Klimaänderung. Abschlussbericht. Auftragsforschung des BMFWV und BMUJF. GZ 30.610/1-VII/A/3/97. <http://iwhw.boku.ac.at/forschung/Bericht1.pdf>
- Nachtnebel H.P. und M. Fuchs (2004) Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 56, 7/8: 79–92
- Nachtnebel H.P., K. Hebenstreit und W. Diernhofer (1999) Impact of climate change on river basin hydrology under different climatic conditions. Final Report of CCHYDRO Project (ENV4-CT95-0133). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien [http://iwhw.boku.ac.at/climate\\_change\\_deu.html](http://iwhw.boku.ac.at/climate_change_deu.html)
- Nachtnebel, H.P., K. Hebenstreit, W. Diernhofer und M. Fuchs (1999) Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 51, 9/10, Wien
- PRUDENCE (2001) Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. <http://prudence.dmi.dk/>
- Schmutz, S., Matulla, Ch., Melcher, A., Gerersdorfer, T., Haas, P., Formayer, H., 2004. Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer. Endbericht, im Auftrag des BMLFUW, GZ 54 3895/163-V/4/03
- Tomiczek C. und Steyrer G. 2008. Aktuelle Borkenkäfersituation in Österreich. BFW Praxisinformation 17, 4-5
- Umweltbundesamt (2008) Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz P. und K. Sieck (Autoren). Umweltforschungsplan des BMF/UNR Forschungsbericht 204 41 138. UBA-FB 000969

### **Anschrift der Autoren:**

Dr. Reinhard Böhm  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38, 1190 Wien  
Tel. +43-1-36026-2203  
E-Mail: reinhard.boehm@zamg.ac.at

## Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich

MR DI Reinhold Godina  
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt  
Marxergasse 2, 1030 Wien  
Tel. +43-1-71100-6944  
E-Mail: reinhold.godina@lebensministerium.at

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans-Peter Nachtnebel  
Universität für Bodenkultur Wien  
Department Wasser–Atmosphäre–Umwelt  
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau  
Muthgasse 18, 1190 Wien  
Tel. +43-1-36006-5501  
E-Mail: hans\_peter.nachtnebel@boku.ac.at

DI Dr. Otto Pirker  
VERBUND Austrian Hydro Power AG  
Am Hof 6a, 1010 Wien  
Tel. +43-1-53113-50408  
E-Mail: otto.pirker@verbund.at

# Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen

*Hans-Peter Nachtnebel*

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein Überblick über die zu erwartenden Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie und die Wasserwirtschaft in einigen Regionen Österreichs gegeben. Diese betreffen das Ennstal, das der zentralalpiner Region zuzuordnen ist, das Gailtal, das auch von mediterranen Tiefdruckgebieten beeinflusst ist, sowie die Beckenlagen des Leibnitzer Feldes und des Marchfeldes, wobei hier auch schon pannonische Klimateigenschaften erkennbar sind.

Da die globalen Zirkulationsmodelle eine grobe räumliche Auflösung haben, wurde mithilfe von ECHAM4- und HadCM3-Modellen ein stochastisches Downscaling angewandt. Unter Verwendung der lokalen Messwerte konnten Zeitreihen des Niederschlages und der Temperatur für verschiedene Klimasituationen auf Tagesbasis generiert werden. Für die hydrologische Analyse wird ein kontinuierliches Abflussmodell verwendet, das als Input die Tagesreihen der Niederschläge und Temperaturen benötigt.

Es zeigt sich eine deutliche Erwärmung im Sommer, insbesondere bei den höher gelegenen Stationen. Die Niederschläge verändern sich sowohl im Jahresgang als auch in der Jahressumme nur sehr gering, allerdings nimmt deren Variabilität zu. Als Folge der Temperaturänderungen zeigt sich ein früheres Abschmelzen der Schneedecke, wodurch die ursprünglichen Niederwässer im Winter wegfallen. Infolge der erhöhten Temperaturen treten nunmehr Niederwasserperioden im Spätsommer und Herbst auf.

Die Auswirkungen auf die Wasserkraft zeigen einerseits positive Effekte, da die Winterabflüsse erhöht werden, andererseits dürfte die Jahresabflussfracht infolge der erhöhten Verdunstung bei etwa gleich bleibenden Niederschlägen abnehmen. Die Auftrittszeiten von Hochwässern verschieben sich; bezüglich der Größe der Ereignisse sind regional unterschiedliche Ergebnisse zu beobachten. Eine Verschärfung der Hochwassergefahr ist aus den derzeit vorliegenden Daten nicht abzuleiten.

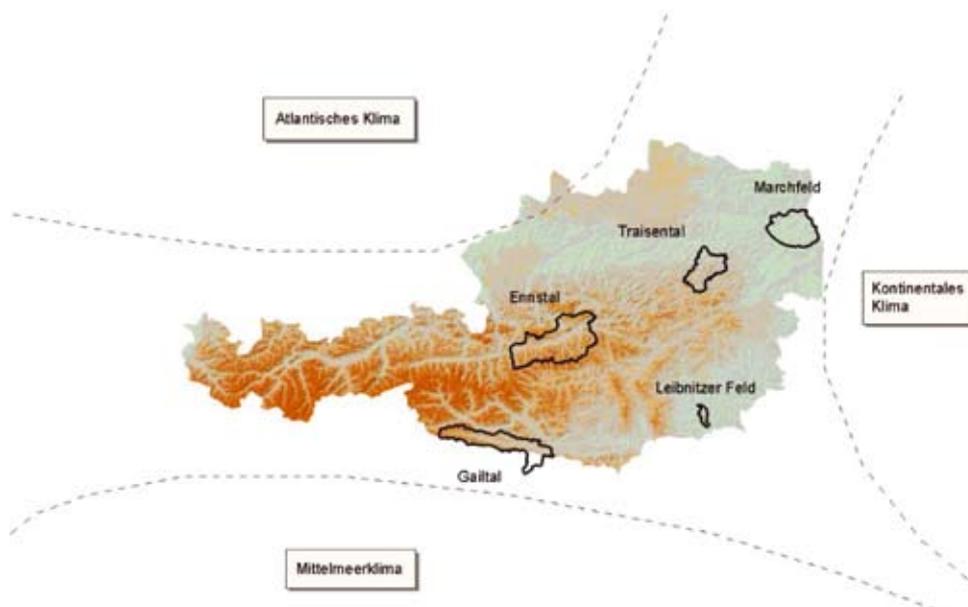
Die Auswirkungen auf das Grundwasserregime sind deutlich ausgeprägt. Die Grundwasserneubildung geht deutlich zurück und verschärft die wasserwirtschaftliche Nutzung in den Beckenlagen, insbesondere in niederschlagsarmen Gebieten.

## 1 Einleitung und Problemstellung

In den letzten Jahren traten mehrmals große Hochwasserereignisse in Österreich auf (2002, und 2005), von denen insbesondere das Hochwasserereignis 2002 in Nieder- und Oberösterreich katastrophale Schädigungen mit sich brachte. Der Gesamtschaden wurde allein für Österreich mit etwa 3,2 Milliarden € (BMLFUW, 2003) geschätzt, europaweit belaufen sich die Schäden auf 15–16 Milliarden € (Nachtnebel, 2003).

Im Gegensatz dazu war der Sommer 2005 durch eine intensive und lang andauernde europaweite Dürrephase gekennzeichnet, die höhere Schäden als das Hochwasser 2002 verursachte. Die Anzahl der Todesopfer infolge der Hitzewelle überstieg bei weitem die Anzahl der Hochwasseropfer. Mehrere Sturmtiefs über Mitteleuropa, wie Lothar im Jahre 1999 mit einer geschätzten Schadwirkung von 6 Mrd. USD (Swiss Re) und Kyrill im Jahre 2007 mit 10 Mrd. USD an volkswirtschaftlichen Schäden (Munich Re), verfestigten in der breiten Öffentlichkeit das Bild einer bereits stattfindenden Klimaveränderung. Daher war die Zielsetzung einer Arbeitsgruppe des ÖWAV, die möglichen Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Wasserwirtschaft in interdisziplinärer Weise zusammenzustellen. Dieser Artikel soll dazu einen Beitrag leisten.

Die alpinen Regionen stellen eine der sensibelsten Gebiete für Klimaänderungen dar, da es zu saisonalen Umlagerungen des Niederschlages kommt und zusätzlich eine große räumliche Variabilität des Klimas und der hydrologischen Prozesse besteht. Für die Alpen liegen u. a. Untersuchungen von Baumgartner et al. (1983), Furrer et al. (1980), Kuhn (1988), Kuhn et al. (1993), Auer (1990), Auer et al. (1993), Oeschger (1988), Koch und Rudel (1991), Haiden und Hantel (1991), Lang (1978), Schädler (1987, 1989), Nachtnebel et al. (1995, 1999, 2003), Wanner et al. (2000), Beniston und Jungo (2002), Beniston et al. (2003 a,b), Beniston (2004), Beniston und Stephenson (2004), Schär und Frei (2005), Raible et al. (2006) vor. In diesem Beitrag werden einige Flussgebiete und Regionen im Hinblick auf hydrologische und wasserwirtschaftliche Auswirkungen untersucht (*Bild 1*). Diese betreffen das Ennstal, das der zentralalpiner Region zuzuordnen ist, den Voralpenfluss Traisen, das Gailtal, das auch von mediterranen Tiefdruckgebieten beeinflusst ist, sowie die Beckenlagen des Leibnitzer Feldes und des Marchfeldes, wobei hier auch schon pannonische Klimateigenschaften erkennbar sind.



*Bild 1: Ausgewählte Einzugsgebiete und Regionen*

Dieser Beitrag stellt eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Literatur dar und bezieht auch die Ergebnisse des CCHydro-Projektes (Hebenstreit, 2000; Nachtnebel et al., 1999) und des nationalen Projektes HydKlima (Nachtnebel und Fuchs, 2003; Fuchs, 2005) mit ein.

Die meisten Klimastudien betreffen die globale Skala, wobei Rastergrößen von einigen Tausend Quadratkilometern typisch sind (Simmons and Bengtson, 1988; Matyasovszky et al., 1994; Deque et al., 2005; IPCC, 2005, 2007; Jones et al., 2001; IPCC, 1990–2007; Vidale, 2003; Roeckner et al., 2006), und verwenden verschiedene Emissionsszenarien für Treibhausgase (IPCC, 2007). Die Simulationsergebnisse liefern dann räumliche Mittelwerte für die Rasterelemente und können daher nicht direkt auf alpine Regionen übertragen werden. Wenige Studien beziehen sich auf die regionale Skala, da eine Reihe von Skalenproblemen in der Methodik bestehen. Zum Studium von möglichen regionalen Klimaänderungen stehen im Prinzip vier Methoden zur Verfügung, die sich auf

- Analogieschlüsse von historischen, beobachteten Veränderungen und deren Übertragung auf zukünftige Situationen
- die Auswertung längerer Datenreihen (Zeitreihenanalyse) (Brückner, 1910; Rudloff, 1980; Auer et al., 1988; Bradley und Jones, 1992; Pfister, 1992, 1994; van Storch und Navarra, 1999)
- die regionale Simulation der Klimaänderungen (Briffa, 1993; Frei et al., 2003, 2004, 2005; Boroneant et al., 2004; Busuioc et al., 2004; Giorgi et al., 2004; Pal et al., 2004; Kjellström, 2004; PRUDENCE, 2001; Kleinn et al., 2005; Rowell, 2006 und
- das statistische „Downscaling“ von großräumigen Klimaänderungen (Bardossy und Plate, 1992; Wilson et al., 1992; Bardossy, 1993; Matyasovszky et al., 1993; Brandsma und Buisson, 1997; Wilby, 1997; Matulla et al., 2004)

stützen.

Für die Klimafolgenforschung (Gleick, 1986; Lemmelär et al., 1990; Link 2001, Hagemann et al., 2004; Hirschi et al., 2005) bestehen ähnliche methodische Ansätze. Die hydrologische Betrachtungsskala setzt insbesondere im Alpenraum mit seiner variablen Topografie eine höhere räumliche Auflösung voraus. Ebenso sind lokale, kurz andauernde Ereignisse wie Gewitter und Starkregenereignisse wichtig. Derartige Prozesse werden in den Klimamodellen nicht direkt wiedergegeben, selbst die für Österreich wichtigen V-b-Wetterlagen, durch Tiefs über dem nördlichen Mittelmeer bewirkt, werden nur ansatzweise abgebildet. Aus diesen Gründen werden folgende Methoden für Impaktstudien angewandt:

- Analogieschlüsse, indem hydrologisch ähnliche Gebiete verglichen werden, die sich z. B. im Hinblick auf die Temperatur etwas unterscheiden.
- Sensitivitätsanalysen, die die Reaktion der hydrologischen Prozesse auf prozentuell variierte Inputs untersuchen,
- Zeitreihenanalysen. Meist sind diese zeitlich sehr begrenzt, sodass bestenfalls Trends in der Vergangenheit statistisch identifiziert werden können, und deren Fortschreibung problematisch ist (Manabe et al, 1987; Fürst und Nachtnebel, 2007).
- Verwendung von kleinräumigen Klimadatensätzen (Bardossy und Gaspary, 1990; Hebenstreit, 2000; Fuchs, 2005). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Zeitreihen aber eine entsprechende raum-zeitliche Korrelation aufweisen sollten, die durch die topografischen Gegebenheiten verursacht wird. Als Beispiel möge die räumliche Korrelation von Starkniederschlägen dienen, bzw. die Höhenabhängigkeit des Niederschlages in Staulagen, die Bildung von Inversionslagen. Alle diese Prozesse bestimmen wesentlich das hydrologische Geschehen und die Entstehung von Extremereignissen in kleineren bis mittleren Gebieten.

In diesem Beitrag wird ein stochastisches Downscaling (Bardossy und Plate, 1992; Nachtnebel et al., 1999; Hebenstreit, 2000; Nachtnebel und Fuchs, 2003; Fuchs, 2005) angewandt, und die gewonnenen Tagesreihen des Niederschlages und der Temperatur dienen als Input für verschiedene hydrologische Modelle, um damit die Klimafolgen zu analysieren (WMO, 1987; Zehe und Bardossy, 2004). Zuerst werden mithilfe von kontinuierlichen Niederschlags-Abflussmodellen die hydrologischen Reaktionen untersucht, wobei Jahresbilanzen, saisonales Verhalten und Veränderungen in Extremwerten untersucht werden. Bei der Anwendung der meteorologischen Reihen in Beckenlagen wird ein Bodenwasserhaushaltsmodell angewandt, das die Bodenfeuchte im Jahresgang sowie die Grundwasserneubildung ermittelt.

## 2 Methodik

In diesem Abschnitt wird kurz auf die angewandte Downscaling-Methode eingegangen und dann werden die beiden hydrologischen Modelle beschrieben,

### 2.1 Downscaling-Methodik

Der Vorteil dieser Methode wird darin gesehen, dass zusätzlich zu den Klimasimulationen für die Vergangenheit auch die lokalen Beobachtungen einfließen und damit mehr an Information ausgewertet wird.

Die Basis für die diversen Klimamodelle (BMO, GFDL, GISS, NCAR, OSU, ECHAM, HadCMx) sind die globalen Zirkulationsmodelle (GZM), die großflächig die grundlegenden Klimaprozesse simulieren, wobei eine horizontale Auflösung von hunderten Kilometern verwendet wird. Für die Erzeugung der hydrometeorologischen Zeitreihen wurden die Ergebnisse des ECHAM4-Modells des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg und des HadCM3-Modells des United Kingdom Meteorological Office in Bracknell verwendet. *Tabelle 1* zeigt eine Aufstellung der wichtigsten Modelldaten.

*Tabelle 1: Modelldaten ECHAM4, HadCM3 (Quelle: IPCC-TGCI, 1999)*

	ECHAM4	HadCM3
AGCM: Horizontale Auflösung	2,8° x 2,8° (T42)	2,5° x 3,75°
OGCM: Horizontale Auflösung	2,8° x 2,8°	1,25° x 1,25°
Gitterschichten AGCM/OGCM	19/11	19/20
Numerische Modellformulierung	spektral	grid
Startzeitpunkt	1860	1860
2 x CO <sub>2</sub> -Sensitivität	~2,6 °C	~3,0 °C
Flusskorrektur	Jahresmittel	keine

Vergleicht man den zeitlichen Verlauf des Jahresganges des simulierten Luftdruckes mit den Beobachtungen, so ergibt sich eine Präferenz für das HADCM3, da dieses eine gute Übereinstimmung zwischen beobachtetem Luftdruck und dem 1 x CO<sub>2</sub>-Szenario liefert, während der 2 x CO<sub>2</sub>-Fall sich durch einen höheren Luftdruck klar unterscheidet.

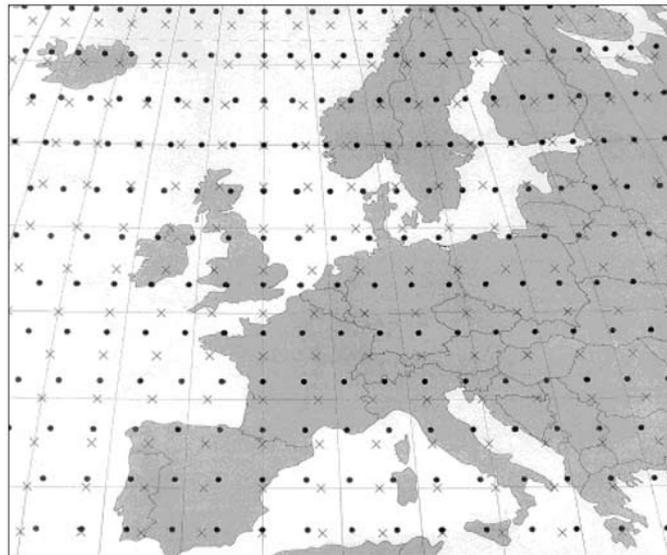


Bild 2 Raster des ECHAM4- und HadCM3-Modells

In der üblichen Klassifikation werden die Treibhausgase insgesamt betrachtet und die jüngere Vergangenheit durch den „1 x CO<sub>2</sub>-Fall“ charakterisiert. Modellsimulationen sind für den 1 x CO<sub>2</sub>-Fall sowie für höhere Treibhausgaskonzentrationen und für transiente Prozesse, also zunehmende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verfügbar. Der 2 x CO<sub>2</sub>-Fall entspricht dabei einer Verdopplung der gesamten Treibhausgaskonzentration bis etwa zum Ende dieses Jahrhunderts, wobei dies noch vom gewählten Emissionsszenario abhängt.

Tabelle 2: Entwicklung der Konzentration von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O (Dehn, 1999; IPCC, 1995)

	CO <sub>2</sub> [ppm]	CH <sub>4</sub> [ppm]	N <sub>2</sub> O [ppb]
vorindustriell	280	0,7	275
1994	358	1,72	312
2100 (IS92a)	700	3,62	417

Wegen der mangelnden räumlichen Auflösung der GZMs und ihres in einigen Regionen gegenläufig berechneten saisonalen Niederschlagsverhaltens erscheint eine direkte Verwendung dieser generierten Daten für hydrologische Fragestellungen nicht brauchbar, da dementsprechend auch das Abflussverhalten saisonal gegenläufige Charakteristik aufweisen würde. Es wird daher eine direkte Verknüpfung zwischen der großräumigen Druckverteilung, die bei den Klimamodellen gut übereinstimmen und auch mit den Beobachtungen vergleichbar sind (Simmons und Bengtson, 1988), mit den lokalen hydrometeorologischen Faktoren angestrebt.

In dieser Arbeit wurde eine semiempirische Methode (Bardossy und Caspary, 1990; Matyasovszky et al., 1993, Nachtnebel und Fuchs, 2003) verwendet, die ausgehend von den großräumigen Druckverteilungen eine Wetterlagenklassifikation (Baur et al., 1944; Baur, 1947; Hess und Brezowsky, 1969; Lamb, 1972; Kirchhofer, 1973, 1974; Schüepp, 1979; Lauscher, 1985; Rickli, 1995; Salvisberg, 1996; Steinacker, 1999; Gerstengarbe und Werner, 1999) vornimmt, in dem die Lage, Ausdehnung der Tief- und Hochdrucklagen sowie die Intensität und Richtung der Luftströ-

mungen berücksichtigt werden. Bauer et al. (1944) definieren eine Großwetterlage als die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes mindestens von der Größe Europas während eines mehrjährigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleichbleiben. Die Großwetterlagen beschreiben atmosphärische Zirkulationen, die in erster Linie Wärmeaustauschvorgänge sind. Daher sind sowohl Niederschlag und Temperatur mit der Richtung und Intensität der atmosphärischen Strömungen verbunden, wobei neben jahreszeitlichen Einflüssen auch noch topografische Faktoren und Bewölkungsgrad beeinflussend wirken. Hier wurden getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr 9 Klassen (Wetterlagen) verwendet:

### **Gruppe 1: antizyklonale Lagen**

Sie treten am häufigsten auf, wobei der Alpenraum im Bereich eines Hochdruckausläufers, verbunden mit Kaltluftvorstößen über Osteuropa liegt. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit und mittlere Niederschlagshöhe ist in allen Gebieten relativ gering, im Sommer in den Gebirgsregionen (Ennstal, Gailtal) aufgrund der Gewittertätigkeit etwas höher.

### **Gruppe 2: maritime Westlagen**

Merkmale sind (laut Rickli) eine große Wellenlänge der Westwinddrift sowie der Zustrom maritimer Polarluft in den Alpenraum. Im Winter bedeuten Westwetterlagen relativ milde Verhältnisse. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit ist in den Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes (Ennstal, Traisental) höher als etwa im Gailtal oder im Leibnitzer Feld.

### **Gruppe 3: Nordwest- und Nordlagen**

Die Lagen zeichnen sich durch nordwestliche bis nördliche Anströmung der Alpen aus, verbunden mit Frontdurchgängen und einem Druckanstieg über Westeuropa. Die steuernden Tiefdruckgebiete ziehen von der Nordsee über Südsandinavien zum Baltikum. Sie bewirken ganzjährig unterdurchschnittliche Temperaturen und weisen insbesondere im Nordstau sehr große Niederschlagswahrscheinlichkeiten auf. Die Gebiete im Süden sind bei diesen Wetterlagen trockener.

### **Gruppe 4: Antizyklonale Ost- und Südostlagen**

Ausschlaggebend für diese Wetterlagen sind eine meridional verlaufende Keilachse im Bereich oder direkt über den Alpen sowie östliche bis südöstliche Winde in Bodennähe. Der Alpenraum liegt dabei am Südwestrand eines Bodenhochs mit Kern zwischen Polen und Skandinavien. Diese Wetterlagen führen in den untersuchten Regionen ganzjährig zu sehr trockenen Verhältnissen, wobei die Temperaturen etwas über den langjährigen saisonalen Mittelwerten liegen.

### **Gruppe 5: Südlagen**

Kennzeichnend sind ein kurzweiliger Trog über Westeuropa und eine südwestliche bis südliche Anströmung des Alpenraumes, womit Föhnsituationen nördlich des Alpenhauptkammes verbunden sind. Luvseitig im Gailtal und im Leibnitzer Feld kommt es zu hohen Niederschlägen, insbesondere im Herbst. Die Wetterlagen treten vor allem im Frühjahr und Herbst auf.

### **Gruppe 6: Kontinentale Ostlagen**

Mit Ausnahme von SEZ zeichnen sich diese Großwetterlagen durch Höhenkaltluft über Mittel- und Osteuropa aus. Ein weiteres Kennzeichen ist die Entkopplung von der nordatlantischen Zirkulation. Bei diesen Wetterlagen treten in allen Gebieten relativ hohe Niederschlagswahrscheinlich-

keiten auf, wobei insbesondere im Sommer auch stärkere Niederschläge fallen. Die Temperaturen liegen im Herbst und Winter unter dem langjährigen saisonalen Mittelwert.

### **Gruppe 7: Südwestlagen**

Für die beiden langwelligen Großwetterlagen ist eine großräumige südwestliche Anströmung der Alpen charakteristisch. Dabei werden großräumige subtropische Luftmassen in den Alpenraum geführt, was zu starken positiven Temperaturanomalien führt. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit ist nur im Sommer aufgrund konvektiver Ereignisse relativ hoch, sonst ist sie eher gering.

### **Gruppe 8: Trog nördlich der Alpen**

Im Raum Nordsee–Südsandinavien–Baltikum herrscht tiefer Druck. Der Alpenraum liegt daher im Bereich einer Westströmung und damit auch im Einflussbereich maritimer Luftmassen. Damit verbunden sind hohe Niederschlagswahrscheinlichkeiten, insbesondere an der Alpennordseite, und mäßige bis große Niederschlagshöhen auch südlich der Alpen. Die Temperaturen liegen dabei etwas unter dem langjährigen saisonalen Durchschnitt.

### **Gruppe 9: südliche Westlagen**

Bei diesen Westwetterlagen ist die Frontalzone weit nach Süden verschoben. Damit ist auch der zyklonale Einfluss in den Alpen stärker, und es ergeben sich in den Gebieten höhere Niederschlagswahrscheinlichkeiten. Ansonsten sind die Unterschiede in der regionalen Ausprägung des Wettergeschehens zu Gruppe 2 relativ gering.

Die Abfolge von Wetterlagen wird durch einen Markov-Prozess beschrieben, wobei die Übergangswahrscheinlichkeiten aus den historisch beobachteten oder aus den simulierten zukünftigen Druckverteilungen abgeleitet werden. Änderung im lokalen Geschehen können dadurch durch Änderungen in der Auftrittshäufigkeit von Wetterlagen, in deren Dauer oder durch ihren Auftrittszeitpunkt bewirkt werden.

Anschließend wird eine bedingte statistische Verteilung zwischen einer bestimmten Wetterlage und den lokalen Niederschlags- und Temperaturbeobachtungen hergestellt. Es zeigt sich (Nachtnebel et al, 1999, 2003, 2004), dass bei bestimmten Wetterlagen häufigere und intensive Niederschläge auftreten, während andere Wetterlagen durch niederschlagsarme lokale Ausprägungen gekennzeichnet sind. Dieser Zusammenhang wird also anhand der Wetterlagen konditioniert und das räumliche beobachtete Muster der meteorologischen Variablen fließt ebenfalls ein. Dies bedeutet auch, dass eine bestimmte Wetterlage sehr unterschiedliche regionale Ausprägungen, z. B. südlich oder nördlich des Alpenhauptkamms, aufweisen kann. Implizit werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Wetterlagenklassifikation ist sowohl für den historischen als auch für den 1 x CO<sub>2</sub>- und 2 x CO<sub>2</sub>-Fall gültig.
- Die Wetterlagen sind saisonal abhängig und werden ergänzend zum Typ noch durch die mittlere großräumige Druckhöhe bzw. Druckhöhenunterschiede charakterisiert.
- Es besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen der Großwetterlage und dem kleinräumigen Wettergeschehen (Downscaling).
- Der statistische Zusammenhang gilt für alle Klimaszenarien und kann daher für Simulationen verwendet werden.

## 2.2 Hydrologisches Niederschlags-Abflussmodell

Es wird ein räumlich verteiltes und zeitlich kontinuierliches Modell angewandt, dessen Grundstock ähnlich dem HBV-Modell (Bergström, 1976, 1995; Nachtnebel und Fuchs, 2004) ist. Das kontinuierliche Abflussmodell arbeitet auf beliebigen Zeitschritten, doch werden hier aufgrund der Datenverfügbarkeit die Tageswerte der Temperatur und des Niederschlages verwendet. Um die räumliche Variabilität der Topografie und unterschiedliche Landnutzungsformen abzubilden, wird das gesamte Einzugsgebiet in Teileinzugsgebiete unterteilt. Diese werden in einzelne Höhenzonen, Landnutzungsklassen und nach den Bodentypen unterteilt. Durch Verschneidung dieser Informationen entstehen „hydrologisch homogene Zonen“ (Bild 3), von denen jede einzelne durch eine Speicherkaskade simuliert wird (Bild 4). Als Ergebnis erhält man für jede Zone die einzelnen Abflussanteile sowie die Speicherinhalte der Schneedecke im Boden und im Grundwasser.

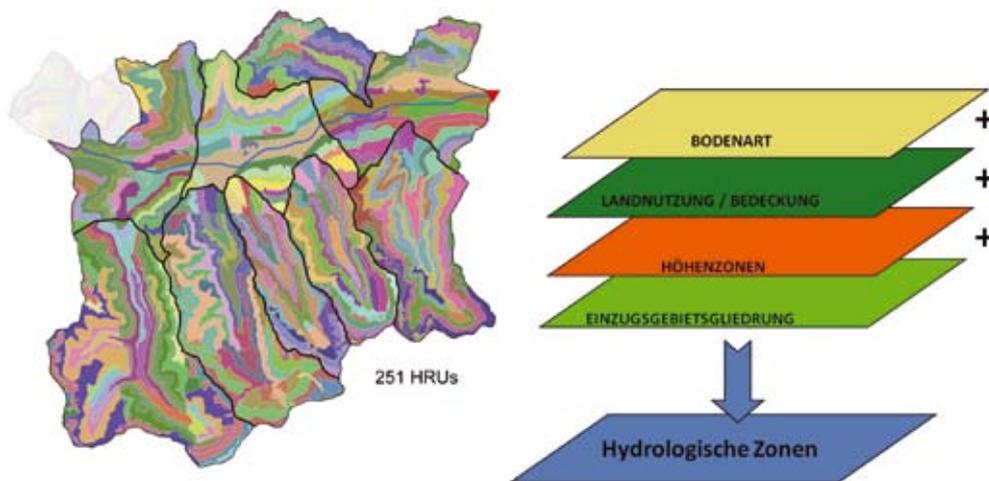


Bild 3: Räumliche Unterteilung von Einzugsgebieten und Ausweisung „Homogener Hydrologischer Zonen“

Die Summe der Abflusshöhen aus den 3 Speichern je Zeiteinheit ergibt die Gesamtabflussmenge, die noch durch einen vierten Linear-speicher zum Einzugsgebietsauslass geroutet wird. Für die Schätzung der diversen Schwellenwerte und Speicherkonstanten des Modells können einerseits längere Beobachtungsreihen verwendet werden oder raumbezogene Informationen, wie Bodenmächtigkeit und Bodentyp, herangezogen werden. Im Modell wird jeweils der aktuelle Systemzustand ermittelt, der die Füllungsgrade der einzelnen Speicher und den Rückhalt in Form von Schneedichte und Schneehöhe beschreibt.

Die potenzielle Verdunstung aus der Bodenzone wird nach Thornthwaite (1948) berechnet und der aktuelle Wert wird durch die Bodenfeuchte limitiert. In Zonen mit hohem Speicherinhalt des Bodens wirkt dann die potenzielle Verdunstung, während in trockenen Zonen die Verdunstung linear zum Welkepunkt hin abnimmt. Die Versickerung (QVS) aus der Bodenschicht in den tieferen Speicher (Grundwasserleiter im Talbereich) ist von der Bodenfeuchte abhängig und wird durch eine nichtlineare Gleichung beschrieben.

Im Bedarfsfall wird die Schneedecke auf die Bodenzone aufgesetzt. Der feste Niederschlag wird logarithmisch innerhalb einer Zone verteilt. Dies berücksichtigt Windverfrachtungen, Schneerutschun-

gen und Exposition und hat zur Folge, dass eine Zone nur schrittweise ausapert und zum Schmelzabfluss beiträgt. Der Schmelzwasseranteil wird nach der Grad-Tagesmethode berechnet, wobei noch die Speicherwirkung des Schnees selbst berücksichtigt wird. Diese ist von der Schneehöhe und Dichte abhängig. Weiters wird die Wiedergefrierung des flüssigen Anteiles in der Schneedecke berücksichtigt, wodurch es schrittweise zu einer Verdichtung des Schnees kommt (Braun, 1985). Für die einzelnen Speicher sind dann die Bilanzgleichungen aufzustellen und untereinander zu verknüpfen.

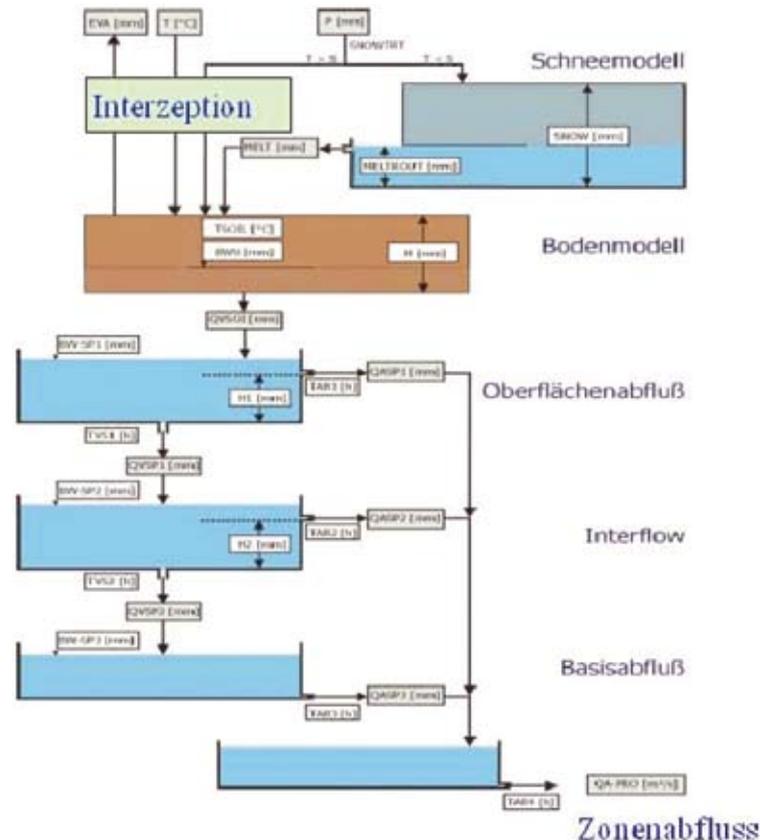


Bild 4: Aufbau des Abflussmodells

### 2.3 Modell für den Bodenwasserhaushalt

In den Beckenlagen wie dem Marchfeld oder dem Leibnitzer Feld, ist der Oberflächenabfluss vernachlässigbar und stattdessen dominieren die vertikalen Transportvorgänge. Bei der Bodenwasserhaushaltssimulation werden sämtliche Komponenten des Systems Boden – Vegetation – Atmosphäre anhand eines numerischen Simulationsmodells BOWA (Holzmann, 1994) beschrieben. Hierbei wird die Kenntnis der atmosphärischen Randbedingungen (Niederschlag, Temperatur etc.), der Lage des Grundwasserspiegels und des Aufbaus des Bodenprofils benötigt. Die klimatischen Prozesse bestimmen die obere Randbedingung für die Bodenwasserhaushaltssimulation.

Die Bilanzierung des Bodenwassers erfolgt anhand von Tageswerten, wobei die Berechnungsschritte jedoch wesentlich kleiner gewählt werden. Die vertikale Verteilung der Bodenfeuchte in einem Bodenprofil wird durch ein eindimensionales Finites Differenzenverfahren berechnet, das die Richardsgleichung (Koorevaar et al., 1983) approximiert. Dabei wird das Bodenprofil bis zur

Schotteroberkante durch homogene Bodenschichten approximiert. Inhomogenitäten werden durch unterschiedliche bodenphysikalische Eigenschaften der Schichten berücksichtigt (Bild 5).

Die obere Randbedingung wird durch Angabe der Infiltrationsrate definiert. Sie wird aus der Niederschlagsmenge abzüglich der Interzeption, Muldenverdunstung und Oberflächenabfluss (falls vorhanden) ermittelt. Die maximale Infiltrationsrate wird durch den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert der obersten Schicht ermittelt.

Die Untergrenze des Bodenprofils wird von einer (virtuellen) Schottererschicht gebildet. Es wird angenommen, dass in dieser Schicht aufgrund des überwiegenden Grobporenanteils kaum Wasser im Boden gehalten werden kann und eine vertikale Entwässerung (Versickerung) ins Grundwasser erfolgt. Ein kapillarer Hub aus dem Schotterkörper ist nicht möglich. Falls der Grundwasserspiegel in das Bodenprofil hineinreicht, liegt Grundwasseranschluss vor. In diesem Fall wird die untere Randbedingung durch konstante (gesättigte) Bodenfeuchtebedingungen charakterisiert.

Die Entnahme von Porenwasser erfolgt über die Pflanzenwurzeln als Transpiration. Hierbei wird angenommen, dass die Wurzeldichte und somit die Transpirationsaktivität linear mit der Tiefe abnimmt. Die potenzielle Verdunstung kann nach verschiedenen Formeln berechnet werden, wobei hier Penman (1956) angewandt wurde.

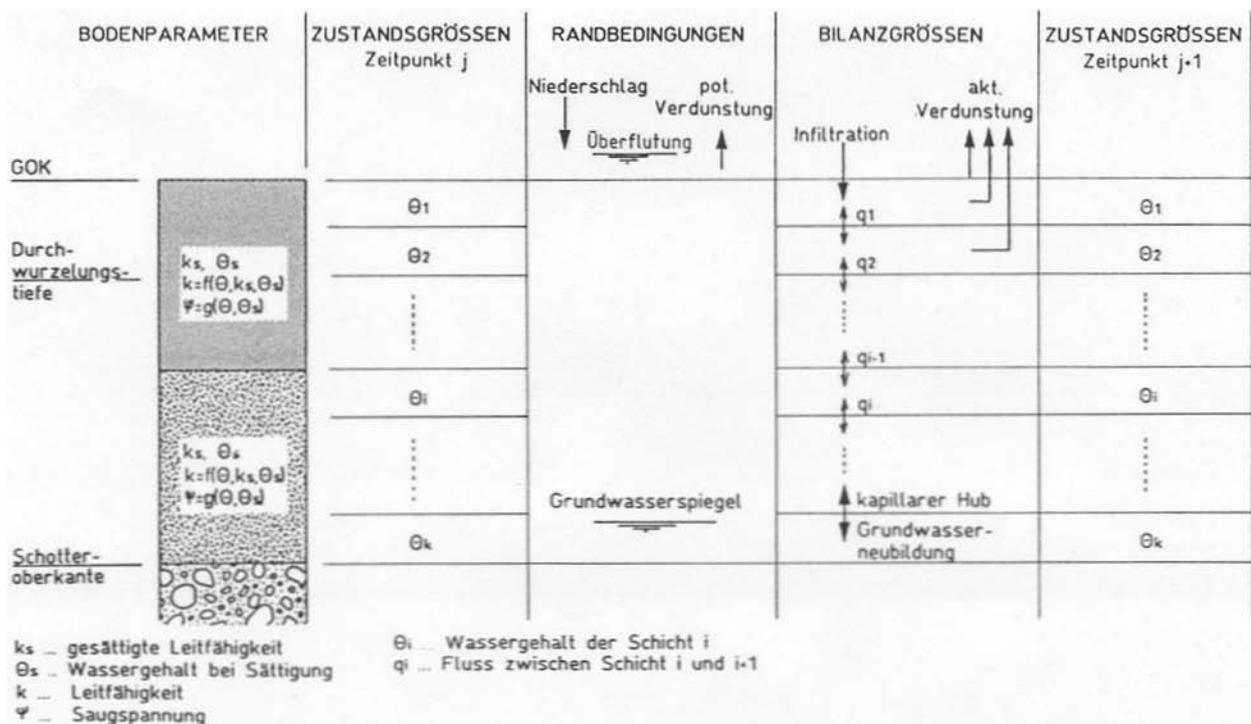


Bild 5 : Bodenwasserhaushaltsmodell

Die Kopplung der Modelle und die Verwendung verschiedener Datensätze im Downscaling sind in Bild 6 dargestellt.

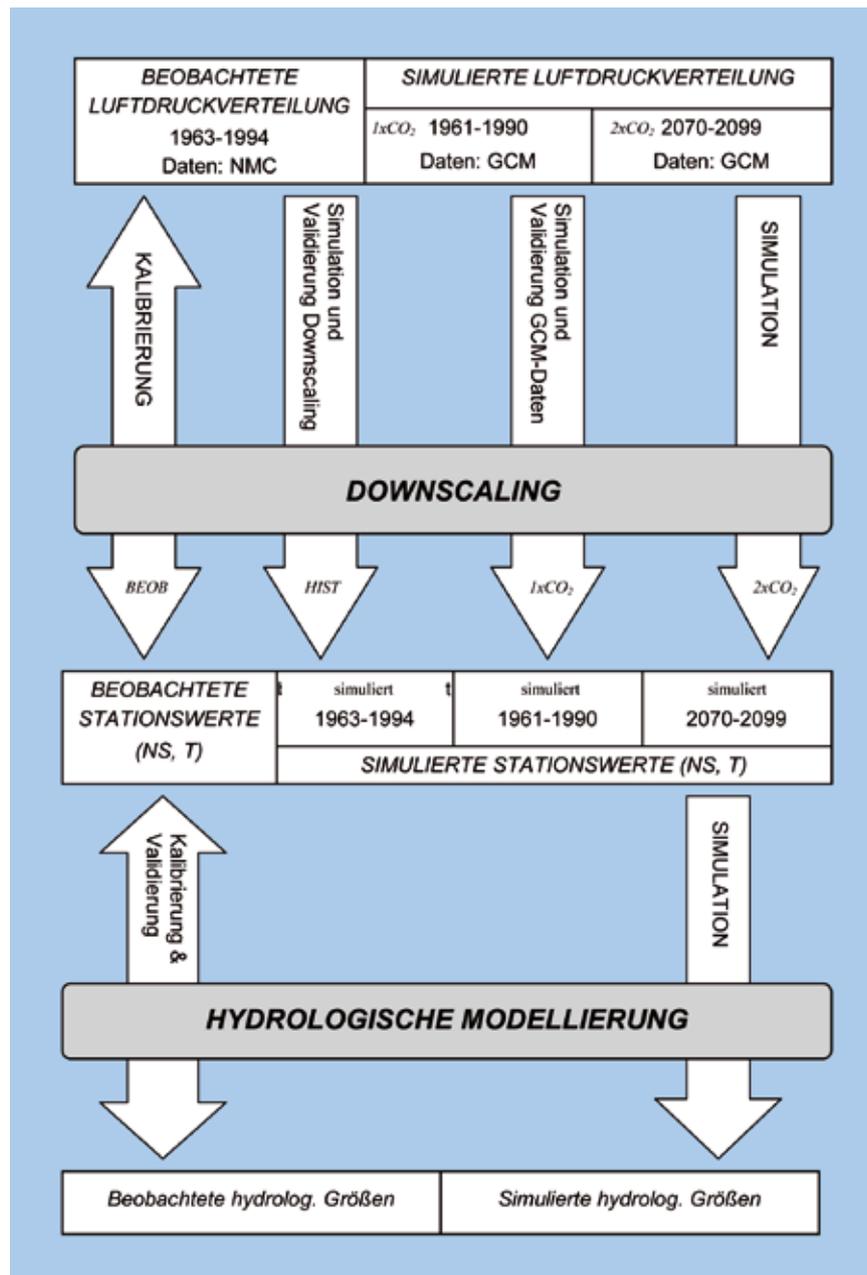


Bild 6: Kopplung von Downscaling mit hydrologischem Modell (Fuchs, 2005)

### 3 Ergebnisse für den Wasserhaushalt alpiner Gebiete

Alle Darstellungen sind einheitlich gestaltet: der erste Balken (schwarz) gibt die beobachteten Werte an, die Größe des blauen Balkens wurde aus den historischen gemessenen Druckverteilungen ermittelt, der dritte Balken (hellblau) wurde aus den Klimasimulationen für den 1 x CO<sub>2</sub>-Fall berechnet und der rote Balken stellt die Ergebnisse für den 2 x CO<sub>2</sub>-Fall dar. Weiters sind die Unsicherheiten, die aus der Anwendung der Methodik resultieren, durch Intervallbereiche dargestellt. Die ersten drei Balken sollten möglichst ähnliche Werte zeigen, da sie sich auf die gleiche Periode beziehen, aber mit unterschiedlichen Datensätzen berechnet wurden. Die Differenz zwischen Balken drei und vier gibt das eigentliche Klimasignal wider.

### 3.1 Temperatur

In allen Gebieten ist ein Temperaturanstieg von 2,5 bis 4 °C im Jahresmittel bis etwa zum Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten. In einzelnen Monaten kann die Änderung noch deutlicher ausfallen. Der Temperaturanstieg ist in den Sommermonaten etwas deutlicher ausgeprägt als in den Wintermonaten. Am geringsten ist die Temperaturzunahme in den Monaten Februar und März. In den Tallagen ginge demnach der Temperaturanstieg bis zu 4 °C, während in den hohen Lagen (über 2.000 m) der Anstieg bei 2–3 °C läge.

Als unmittelbare Folge zeigt sich im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall ein deutlicher Rückgang der Frosttage und der Tage mit Schneefall und Schneebedeckung, insbesondere in den Talbereichen, wo die Anzahl der Frosttage um die Hälfte reduziert werden kann. Ebenso nimmt die Verdunstung deutlich zu und die Jahresabflussfracht geht zurück. In vergletscherten Gebieten ist ein erhöhter Beitrag für die Sommerabflüsse durch Abschmelzvorgänge zu erwarten. In kleinen alpinen Einzugsgebieten kann dieser Effekt bedeutend sein, für die Gesamtbilanz Österreichs sind diese Effekte vernachlässigbar. Laut Kuhn (1988, 2008) sollte der Schmelzbeitrag durch Gletscher über die nächsten vierzig Jahre ansteigen und dann infolge der rapiden Verkleinerung der Gletscherfläche kontinuierlich abnehmen. In den hier dargestellten Einzugsgebieten bestand kein Gletschereinfluss.

### 3.2 Niederschlag

Generell ist keine eindeutige Niederschlagsveränderung aus den abgeleiteten Daten erkennbar. Sowohl die Niederschlagsmengen, als die saisonale Verteilung sind für den heutigen Fall und zukünftig ähnlich. Tendenziell wäre eine leichte Abnahme im Süden Österreichs möglich, während in den nördlichen Staulagen sogar Zunahmen zu erwarten wären.

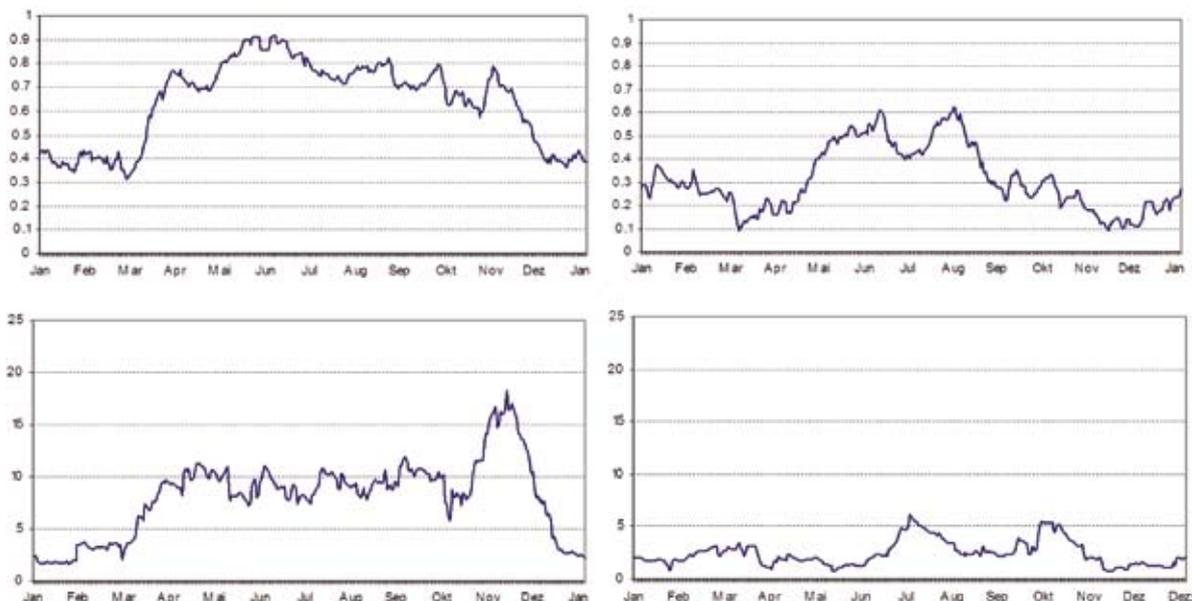
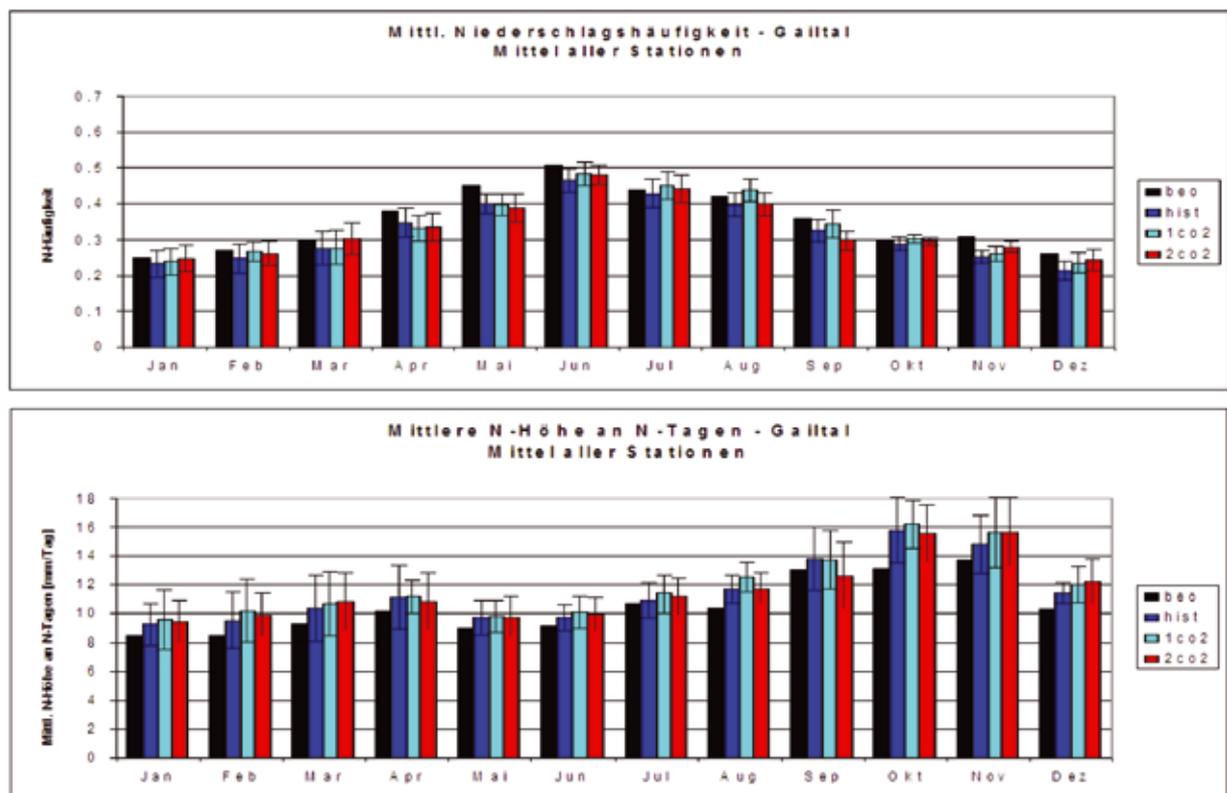


Bild 7: Niederschlagsverhalten im Gailtal bei verschiedenen Wetterlagen (WL)  
 oben: Wahrscheinlichkeit für Niederschlagstag ( $P > 0.1 \text{ mm}$ ) links WL3, rechts WL4  
 unten: mittlere Niederschlagsmenge, links WL3, rechts WL4

Um einen Eindruck von den Unsicherheiten in der Aussage zu geben, werden hier stellvertretend auch für die anderen Gebiete Zwischenschritte in der Berechnung erläutert. In *Bild 7* sind zwei Wetterlagen (3 und 4) herausgegriffen und die Wahrscheinlichkeit für Niederschlag und die mittlere Niederschlagsmenge für den historischen Fall dargestellt. WL 3 zeigt eine höhere Tendenz zu Niederschlägen, und wenn diese auftreten, dann haben sie auch noch eine deutlich höhere Intensität als WL4, insbesondere im November. Der Jahresgang im Niederschlag ist in *Bild 8* dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Fehler der Simulation (d. h. die Abweichungen zwischen beobachteten und mit historischen Luftdruckdaten simulierten Daten) beim Niederschlagsdownscaling etwa in der gleichen Größenordnung liegen wie die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für das 1 x CO<sub>2</sub>- und 2 x CO<sub>2</sub>-Szenario (*Bild 8*).

Vergleicht man nun für die Vergangenheit die downgescalten Niederschläge (*Bild 8*), so ist festzuhalten, dass die Niederschlagshäufigkeit bei der Simulation eher unterschätzt wird, während die mittleren N-Höhen an N-Tagen beinahe in allen Monaten überschätzt werden. Eine deutliche Überschätzung tritt vor allem im Herbst auf. Ursache dafür sind hauptsächlich die Glättungsalgorithmen im Downscalingverfahren, z. B. Abschätzung der Parameter unter Einbeziehung aller beobachteten N-Daten innerhalb eines bestimmten saisonalen Zeitreihenausschnittes, aber auch z. B. die Beschreibung der Parameterfunktion durch eine Fourier-Entwicklung begrenzter Ordnung. Das für die meisten österreichischen Gebiete typische Bewölkungs- und Niederschlagsminimum im Oktober, welches nicht nur durch die Großwetterlagen, sondern auch durch die sehr stabilen Luftschichtungen in diesem Monat bedingt ist und nur auf einige Wochen beschränkt bleibt, wird daher durch das Downscalingverfahren nur teilweise reproduziert.



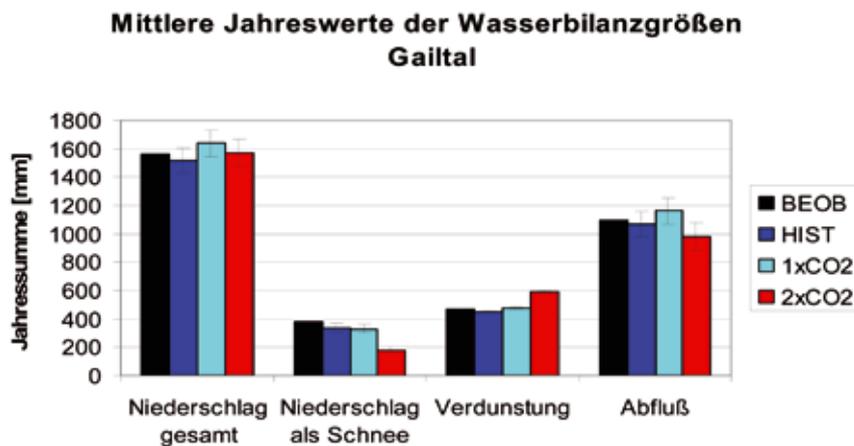
*Bild 8: Vergleich der beobachteten und simulierten Niederschlagswerte im Jahresgang*

Das Klimasignal (d. h. der Unterschied zwischen den Simulationsergebnissen für das 1 x CO<sub>2</sub>- und das 2 x CO<sub>2</sub>-Szenario) ist insgesamt relativ gering. Auffällig ist einzig eine deutliche Niederschlagsabnahme in den Monaten August und September. Diese N-Abnahme im Spätsommer ist im Wesentlichen auf die Zunahme der antizyklonalen Lagen (Hoch über Mitteleuropa, Hochdruckbrücke über Europa) im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall zurückzuführen. Insgesamt ist auch im Jahresniederschlag eine tendenzielle Abnahme abzuleiten.

Ein wesentlicher Unterschied zu den Ergebnissen des Temperatur-Downscalings ist neben dem schwachen Klimasignal auch die große Unsicherheit, welche durch das stochastische Verfahren induziert wird.

### 3.3 Veränderung im Abfluss und in der Wasserbilanz im Gailtal

Die Einflüsse der Klimaänderungsszenarien auf den Wasserhaushalt im Gailtal wurden anhand der modellierten Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss untersucht. Eine zusammenfassende Darstellung für Jahresmittel ist in *Bild 9* gegeben, während *Bild 10* den Jahresgang der Niederschläge und des Abflusses im Gebiet zeigt.



*Bild 9: Veränderung der Wasserbilanzkomponenten im Gailtal*

Der Jahresniederschlag würde demnach um 70–80 mm abnehmen, was etwa 5 % entspricht. Der Niederschlag in Form von Schnee nimmt hingegen deutlich ab und würde nur mehr 50 % des heutigen Durchschnittswertes betragen; die Verdunstung erhöht sich infolge der erhöhten Temperatur, so dass der Abfluss um bis zu 16 % gegenüber dem 1 x CO<sub>2</sub>-Fall abnehmen kann. Vergleicht man die Abflüsse bei geänderten Klimabedingungen mit dem heutigen Abflussmittel, so ist eine Reduktion um ca. 11 % zu erwarten.

Beim Gebietsniederschlag bestehen die bereits erwähnten geringen Veränderungen zwischen 1 x CO<sub>2</sub>-Fall und 2 x CO<sub>2</sub>-Fall. Leichte Niederschlagsrückgänge im Zusammenhang mit der Zunahme von antizyklonalen Wetterlagen im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall treten im August und September auf.

Sehr deutlich ist der Anstieg der aktuellen Verdunstung infolge der höheren Gebietstemperaturen. Die stärksten Zunahmen treten dabei im Frühjahr und im Herbst auf, wobei die Konfidenzbereiche sehr eng sind. Die aktuelle Verdunstung wird vor allem im Sommer nicht durch die zur

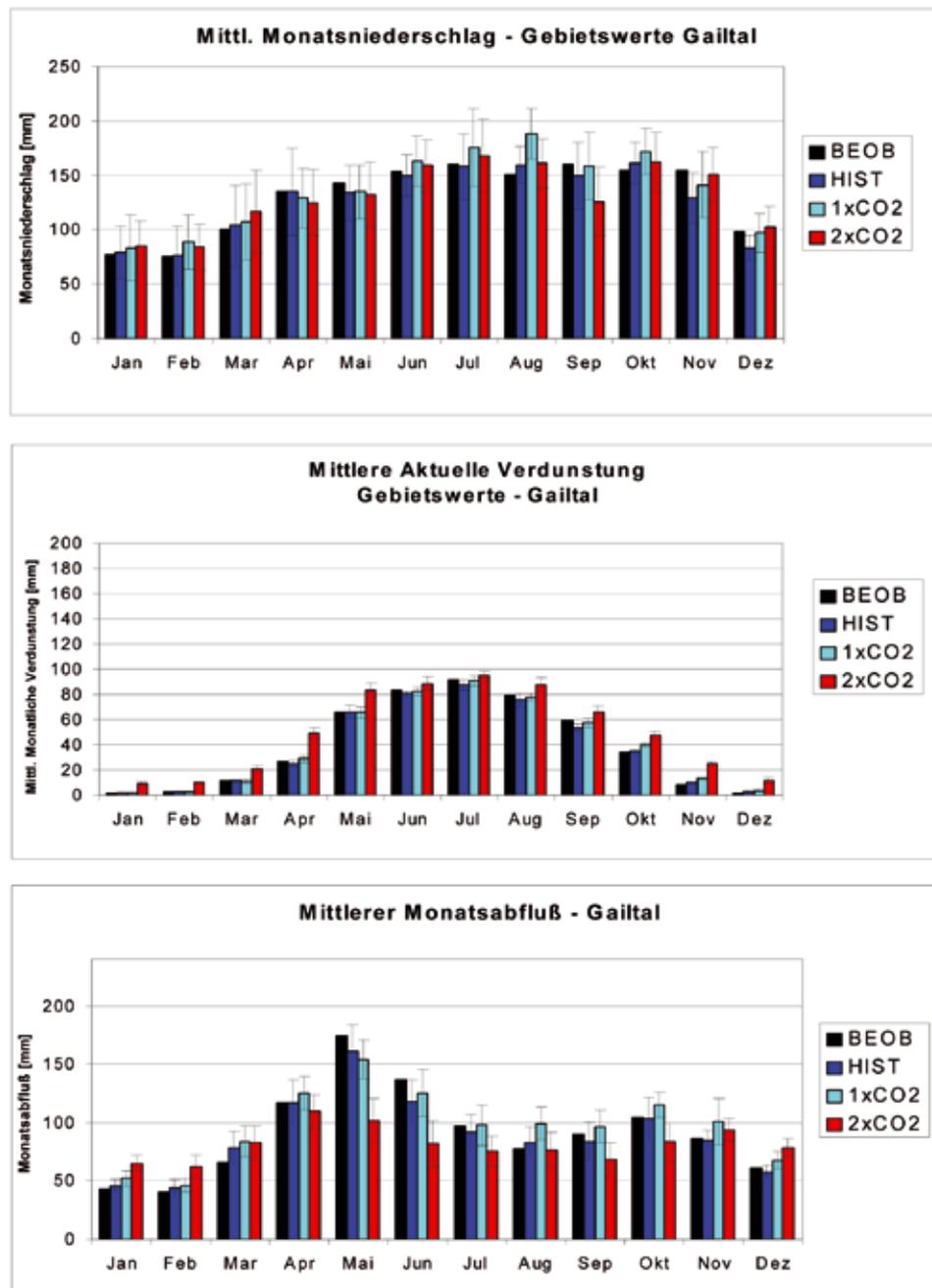


Bild 10: Vergleich von beobachteten, historischen (aus Druckbeobachtungen downgescalten Reihen), 1 x CO<sub>2</sub>- und 2 x CO<sub>2</sub>-Simulationen für den Gebietsniederschlag, die aktuelle Verdunstung und den Abfluss im Gaileinzugsgebiet

Verfügung stehende Verdunstungsenergie (potentielle Verdunstung) sondern vor allem durch die Verfügbarkeit von Bodenwasser limitiert. Daher ist in den Monaten Juni und Juli die Zunahme der aktuellen Verdunstung weniger stark als jene der Lufttemperaturen oder der potentiellen Verdunstung. Trotzdem ergibt sich über das gesamte Jahr eine deutliche Zunahme, welche sich entsprechend auf das Abflussgeschehen auswirkt.

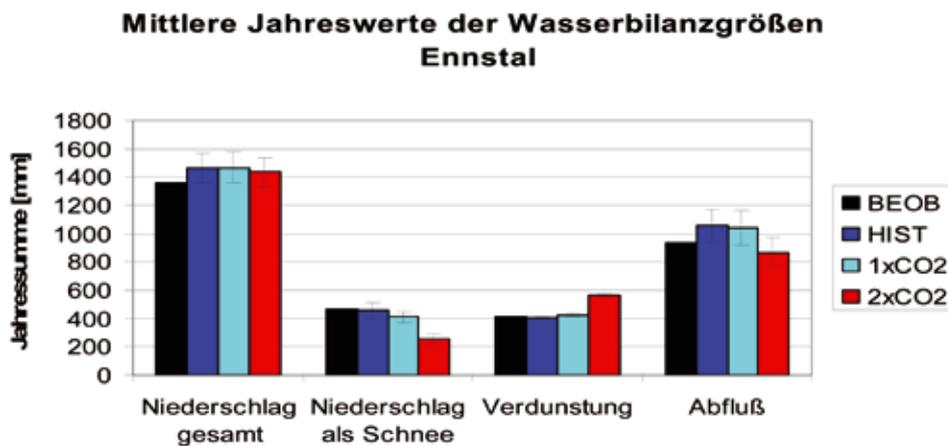
Beim Abfluss (Bild 10) zeigt sich von Frühjahr bis Herbst ein sehr starker Abflussrückgang und insgesamt eine deutliche Vergleichmäßigung des Abflussregimes im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall. Besonders deut-

lich ist der Rückgang in den Monaten Mai, Juni, September und Oktober, auch die Konfidenzintervalle zeigen in diesen Monaten keine Überlappung. Das Klimaänderungssignal ist in diesen Monaten also deutlich stärker als die durch das stochastische Downscalingmodell bedingten Unsicherheiten. Ursache dafür sind der verringerte Schneeschmelzbeitrag und die Zunahme der Verdunstung. Eine Zunahme des Abflussgeschehens im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall tritt nur in den Wintermonaten auf, und erklärt sich durch den größeren Anteil an flüssigen Niederschlägen.

Da weder die Standardabweichung noch die Extremwerte der Tagesniederschläge steigen, ist auch keine Verschärfung der Hochwassersituation zu erwarten.

### 3.4 Veränderungen in der Wasserbilanz und im Abfluss im Ennstal

Im Ennstal zeigen sich ähnliche Ergebnisse, doch sind auch Unterschiede zum Gailtal im Süden zu erkennen. Als Folge der Temperaturzunahme im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall zeigte die hydrologische Simulation eine deutliche Veränderung der Schneeverhältnisse im Gebiet. Der Anteil des Schneefalls am Gesamtniederschlag im Gebiet wird von derzeit ca. 400 mm im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall auf ca. 200 mm reduziert. Die jährlichen Schneehöhenmaxima sowie die Tage mit geschlossener Schneedecke gehen in allen Höhenzonen deutlich zurück. Hinsichtlich der Schneeverhältnisse ergibt sich eine Verschiebung um etwa zwei Höhenzonen nach oben, was einer Verschiebung in der Höhenlage um ca. 600–900 m entspricht. Der Gebietsniederschlag würde im oberen Ennsgebiet, bezogen auf den Pegel Liezen, um etwa 5 % abnehmen (1 x CO<sub>2</sub>-Fall – 2 x CO<sub>2</sub>-Fall), beim Vergleich mit den derzeitigen Niederschlagsverhältnissen wäre sogar eine leichte Erhöhung im Jahresmittel zu erwarten. In den nördlichen Staulagen und in höher gelegenen Gebieten kann sogar eine leichte Zunahme erfolgen. Der Anteil des festen Niederschlages geht auf fast die Hälfte zurück (*Bild 11*).



*Bild 11: Veränderung in den Bilanzkomponenten im Ennsgebiet (Pegel Liezen)*

Die mittlere Jahresverdunstung würde demnach von 410 mm auf 580 mm ansteigen, was wieder eine Reduktion des Abflusses um 12–15 % zur Folge hätte. Die Konfidenzintervalle für den Jahresabfluss sind dabei allerdings infolge der Unsicherheiten beim Niederschlagsdownscaling relativ breit.

Beim Abfluss zeigen sich hingegen in den Frühjahrs- und Sommermonaten eine sehr starker Abflussrückgang und insgesamt eine deutliche Vergleichmäßigung des Abflussregimes im 2 x CO<sub>2</sub>-

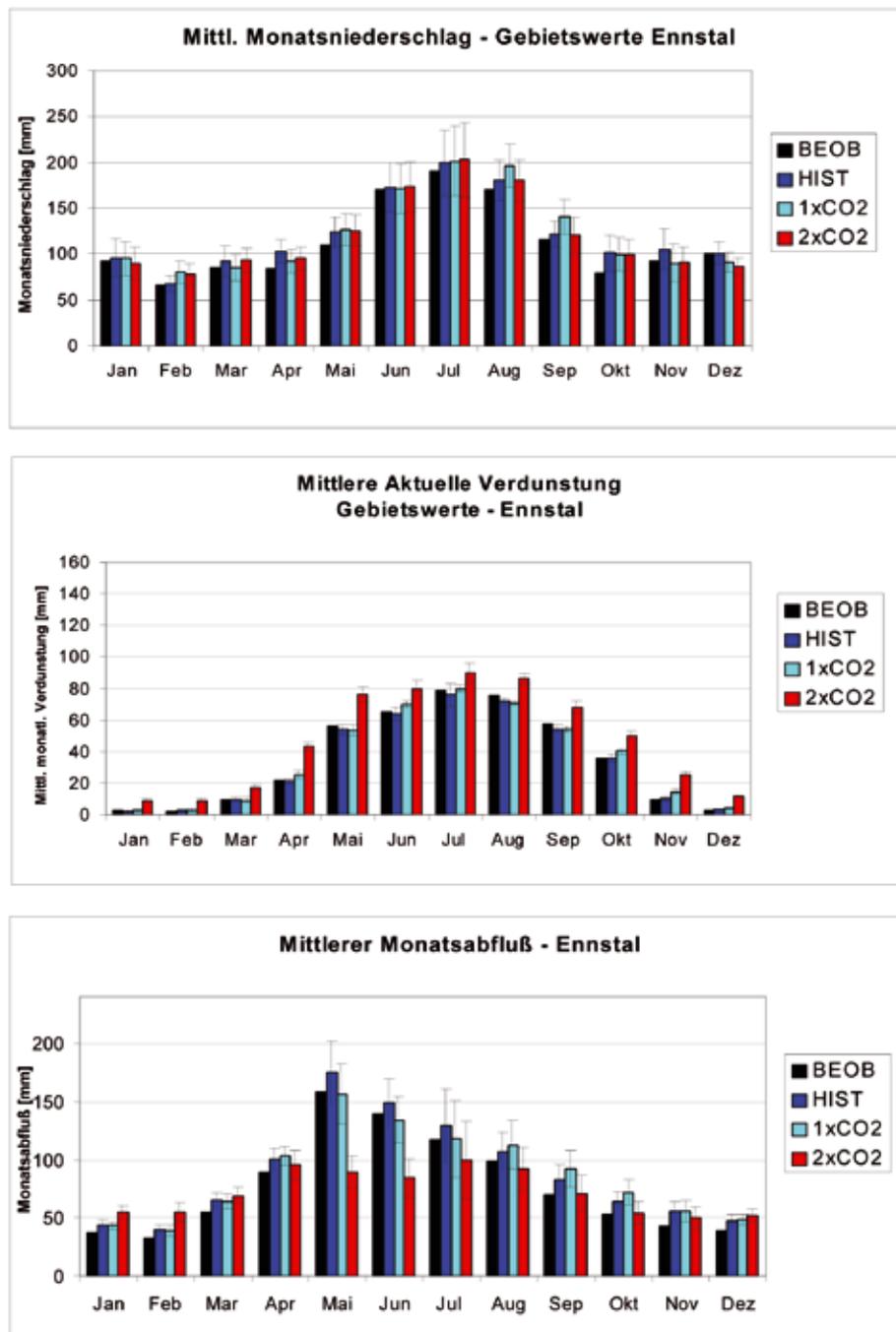


Bild 12: Jahresgang der Wasserbilanzkomponenten im Ennsgebiet

Fall. Besonders deutlich ist der Rückgang in den Monaten Mai und Juni, auch die Konfidenzintervalle zeigen in diesen Monaten keine Überlappung. Das Klimaänderungssignal ist in diesen Monaten also deutlich stärker, als die durch das stochastische Downscalingmodell bedingten Unsicherheiten. Ursache dafür ist der verringerte Schneeschmelzbeitrag und die Zunahme der Verdunstung. Eine Zunahme des Abflussgeschehens im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall tritt in den Wintermonaten auf und erklärt sich durch den größeren Anteil an flüssigen Niederschlägen.

Die Analyse der Tagesabflüsse zeigte, dass im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall kleinere Hochwässer weniger häufig auftreten, was zu einer deutlichen Verflachung der Abflussdauerlinie führt. Hinsichtlich der ex-

tremen Hochwässer ergaben sich im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall kaum Veränderungen, doch dürfte die Datenreihe auch zu begrenzt sein, um Veränderungen bei Extremereignissen erkennen zu können (Frei, 2003; Ferro et al., 2004; Collins, 2004). Eine Verschiebung ergibt sich allerdings hinsichtlich der Saisonalität der Hochwässer. So treten unter den für zukünftige Klimabedingungen simulierten hydrologischen Verhältnissen Winterhochwässer häufiger auf, während die Frühjahrs- und Sommerhochwässer deutlich seltener werden. Auch bei den Niederwässern zeigt sich im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall eine Verschiebung des saisonalen Auftretens. Winter- und Frühjahrsniederwässer werden seltener. Im Sommer und Herbst nimmt die Niederwasserhäufigkeit deutlich zu.

### 3.5 Veränderungen im Bodenwasserhaushalt im Leibnitzer Feld

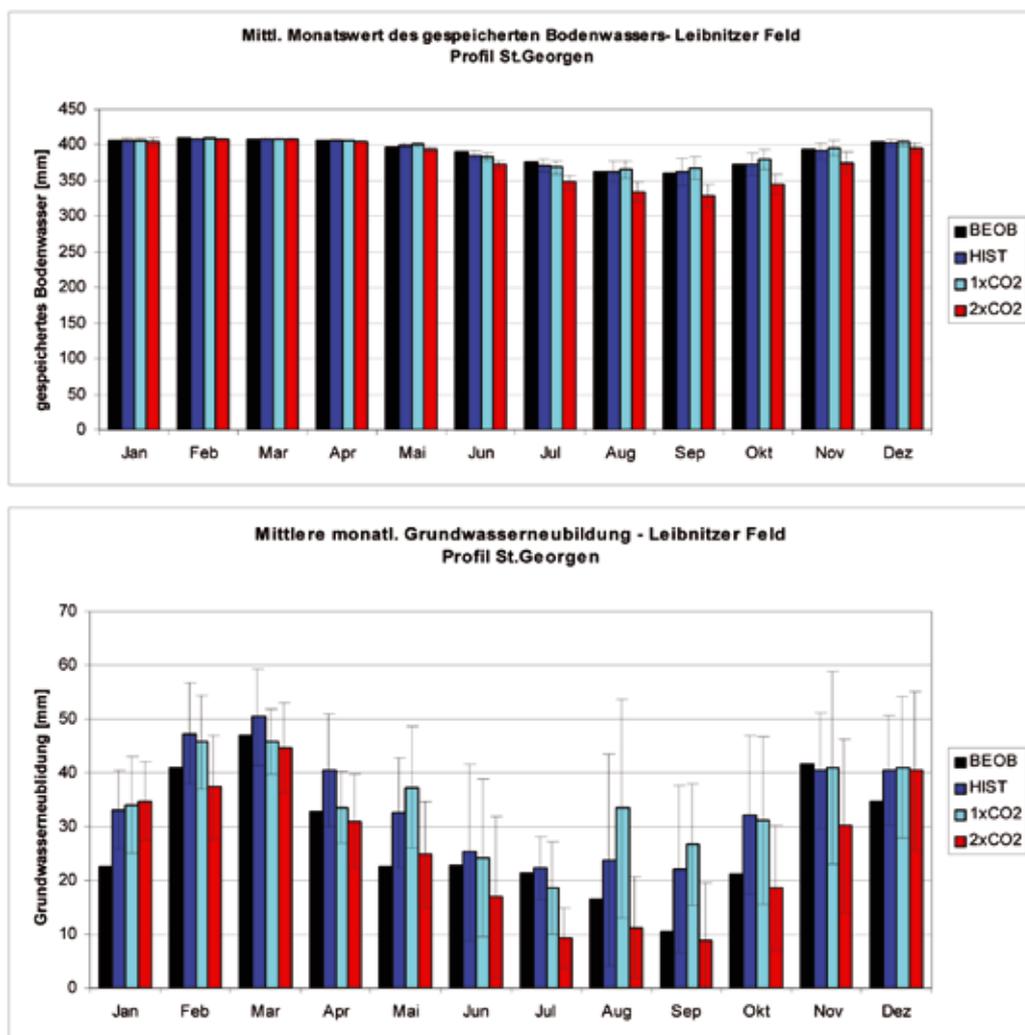
Beim Untersuchungsgebiet Leibnitzer Feld (Holzmann und Nachtnebel, 1995) handelt es sich um eine relativ kleine Region mit einheitlicher Topografie und geringen Unterschieden in der Höhenlage. In dieser Region sind daher die Abflusskomponenten, wie sie bei den alpinen Einzugsgebieten berechnet wurden, vernachlässigbar. Stattdessen dominieren die vertikalen Komponenten des Wassertransportes, d. h. es wird ein Bodenmodell angewandt, wie in *Kapitel 2.3* beschrieben. Es werden daher die Änderungen der Verdunstung, des Bodenwasserhaushaltes und der Grundwasserneubildung analysiert.

Bei guter Übereinstimmung zwischen beobachteten und aus historischen bzw. 1 x CO<sub>2</sub>-Daten simulierten Zeitreihen zeigt sich ein deutliches Klimaveränderungssignal im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall. Die Extremwerte nehmen um ca. 2 bis 4 °C zu, wobei die Zunahme in den Sommermonaten etwas stärker ausgeprägt ist als in den Wintermonaten. Die Zunahme des mittleren monatlichen Maximums der Tagestemperaturen liegt bei beiden Stationen in der gleichen Größenordnung, was aufgrund des geringen Höhengradienten nicht verwunderlich ist.

Die Fehler der Niederschlagssimulation (d. h. die Abweichungen zwischen beobachteten und mit historischen Luftdruckdaten simulierten Daten) beim Downscaling liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für das 1 x CO<sub>2</sub>- und 2 x CO<sub>2</sub>-Szenario. Die Niederschlagshäufigkeit wird bei der Simulation eher unterschätzt, während die mittleren Niederschlagshöhen an Regentagen beinahe in allen Monaten überschätzt werden. Das Klimaänderungssignal (d. h. der Unterschied zwischen den Simulationsergebnissen für das 1 x CO<sub>2</sub>- und das 2 x CO<sub>2</sub>-Szenario) ist insgesamt relativ gering. Auffällig ist einzig, wie bereits bei den vorangegangenen Einzugsgebieten festgestellt, eine Niederschlagsabnahme in den Monaten August und September. Diese Niederschlagsabnahme im Spätsommer (Stöckli und Vidale, 2004; Rowell und Jones, 2006) ist im Wesentlichen auf die Zunahme der antizyklonalen Lagen (Hoch über Mitteleuropa, Hochdruckbrücke über Europa) im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall zurückzuführen.

Verwendet man nun diese Daten als Input für ein typisches Bodenprofil im Leibnitzer Feld, so lassen sich daraus Veränderungen im Bodenwasserhaushalt und in der Grundwasserneubildung ableiten. Infolge der im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall deutlich erhöhten Temperatur nimmt die Verdunstung zu, was für alle Komponenten gilt, auch für die Interzeptionsverdunstung. Eine die Transpiration und damit auch das Pflanzenwachstum hemmende Limitierung des Bodenwassers durch die Zunahme der Interzeptionsverdunstung tritt offensichtlich auch bei den höheren Temperaturen im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall nicht auf. Trotzdem ist das in den Sommermonaten im Boden gespeicherte Wasser im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall deutlich geringer.

Aus *Bild 13* wird deutlich, dass derzeit die Grundwasserneubildung im Leibnitzer Feld hauptsächlich in den Monaten Oktober bis Mai erfolgt, mit einem Maximum im März, wobei aber auch hier die Konfidenzintervalle extrem breit sind. In diesen Monaten sind die Infiltrationsraten infolge der verringerten Interzeption und Interzeptionsverdunstung relativ hoch, während die Transpiration sehr gering ist. Der Großteil des Niederschlags in diesen Monaten kann daher bis in tiefere Bodenbereiche versickern. Zwischen der Simulation mit beobachteten Daten und den Downscaling-Szenarien (historisch, 1 x CO<sub>2</sub>) ergeben sich bei der Berechnung der Grundwasserneubildungsraten größer Abweichungen. Zwischen 1 x CO<sub>2</sub>-Fall und 2 x CO<sub>2</sub>-Fall zeigt sich eine deutlich Abnahme, vor allem in den verdunstungsstarken Sommermonaten und Herbstmonaten, während die Grundwasserneubildung im Winter kaum abnimmt. Im 2 x CO<sub>2</sub>-Fall kommt es damit zu einer stärkeren Saisonalität der Grundwasserneubildung mit sehr geringen Werten im Sommer und relativ hohen Werten im Winter. Insgesamt geht die jährliche Neubildungsrate um etwa 25 % zurück. In einzelnen Jahren ist dieser Effekt noch ausgeprägter.



*Bild 13: Jahresgang in der Bodenfeuchte und der Grundwasserneubildung im Leibnitzer Feld*

## 4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Da die derzeit vorliegenden Simulationen des Einflusses steigender Konzentrationen von Treibhausgasen überwiegend auf grobmaschigen Rastergittern beruhen, wurde ein stochastisches Downscaling-Verfahren auf einige Regionen Österreichs angewandt, um mit räumlich höher aufgelösten und raum-zeitlich korrelierten Zeitreihen des Niederschlages und der Temperatur hydrologische Modelle zu betreiben. Damit wurden die zeitliche Entwicklung der Schneedecke, die Abflussbildung und der Bodenwasserhaushalt für verschiedene meteorologische Situationen berechnet. Aus dem Vergleich der Daten für den  $1 \times \text{CO}_2$ -Fall, der die jüngere Vergangenheit beschreibt und den  $2 \times \text{CO}_2$ -Fall, der eine Verdopplung der Treibhausgaskonzentration annimmt, berechnet.

Generell zeigte sich, dass die Temperatur in allen Gebieten im Jahresmittel zwischen 2,5 bis maximal  $4^\circ\text{C}$  steigen wird, in den Sommermonaten etwas ausgeprägter als in den Wintermonaten. Dennoch reichen diese Veränderungen aus, um die heutigen Schneeverhältnisse um 600–900 Höhenmeter zu verschieben. In den untersuchten alpinen Gebieten (Gail, Enns) geht der feste Gebietsniederschlag um 30–50 % zurück.

Beim Niederschlag sind keine ausgeprägten Veränderungen zu erkennen. Im Süden wurde eine tendenzielle Abnahme berechnet, im oberen Ennsgebiet blieb der Niederschlag nahezu gleich; in einigen höheren Lagen und in Staulagen war eine leichte Zunahme zu verzeichnen. Bei einigen Simulationen zeigte sich eine Tendenz zu höheren Niederschlägen im Spätwinter und Frühjahr. Eine Zunahme von extremen Tagesniederschlägen konnte nicht festgestellt werden, was aber auch durch die Begrenzung auf Tageswerte in der Berechnung begründet sein kann.

Durch die gestiegene Temperatur nahm auch die Evapotranspiration in allen Regionen deutlich zu, sodass eine niedrigere Bodenfeuchte resultierte. In niederschlagsreichen Regionen wie dem Leibnitzer Feld bleibt im Mittel die verbleibende Bodenfeuchte aber noch immer über kritischen Schwellenwerten. In niederschlagsarmen Gebieten, wie dem östlichen und nordöstlichen Niederösterreich sind die größten und kritischsten Auswirkungen zu erwarten. Während im Leibnitzer Feld die Grundwasserneubildung um 25 % abnimmt, würde sie im Marchfeld um mehr als 60 % zurückgehen und nahezu bei Null liegen.

Durch die erhöhte Temperatur kommt es zu einer saisonalen Verschiebung des Abflussgeschehens. Während bisher die abflussärmsten Monate im Winter lagen, sollten diese zukünftig im Spätsommer, eventuell Frühherbst, eintreten, da im Winter der Niederschlag vermehrt in Form von Regen auftritt und damit den Abfluss erhöht. Die Schneeschmelze tritt früher als derzeit ein, wenngleich sie auch etwas gedämpfter erfolgt, da insgesamt weniger Schnee gespeichert wird. In hochalpinen Lagen mit Vergletscherungen ist ein anderes Bild zu erwarten. Die Schmelzbeiträge von den Gletschern sind zwar auf die gesamtösterreichische Wasserbilanz vernachlässigbar, in kleinen Einzugsgebieten kann dieser Beitrag aber deutlich ausfallen. Kuhn (2007) gibt für den Zeitraum 1969 bis 1999 eine Abnahme der vergletscherten Fläche von 567 auf 471  $\text{km}^2$ , an etwa 17 % entspricht. Das entsprechende Volumen nahm von 22 auf ca. 17  $\text{km}^3$  ab, was einer durchschnittlichen Abnahme der Eisdicke um 10 m entspricht. Der maximale Schmelzabfluss in demnach in ca. 40 Jahren zu erwarten, da immer größere Anteile der Gletscher abschmelzen.

Für die Wasserkraftnutzung wäre in unvergletscherten Einzugsgebieten eine Reduktion der Jahres-

energieerzeugung von 3-10 %, örtlich auch mehr, zu erwarten. Teilweise wird dieser Effekt durch ein ausgeglichenes Wasserdargebot kompensiert, da die Winterabflüsse um etwa 5–10 % steigen. In den höheren und teilweise vergletscherten Gebieten können sich insgesamt der Jahresabfluss und die Energieerzeugung erhöhen.

In Bezug auf die Hochwasserhäufigkeit und deren Auftrittszeiten sind folgende Aussagen zu treffen. Aufgrund der simulierten Datenreihen, die sich über mindestens 30 Jahre erstreckten, konnte keine Zunahme von Extremereignissen erkannt werden. Die Zunahme von Winterhochwässern ist wahrscheinlich, doch sind dies überwiegend keine wirklichen Extremereignisse.

## 5 Literatur

- Auer I., (1990) Zeitliche Variationen von Niederschlagssummen in alpinen Regionen Österreichs, 21. Int. Tag. f. alpine Meteorologie, Engelberg
- Auer I., R. Böhm, H. Mohnl (1988) Die troposphärische Erwärmungsphase des 20. Jahrhunderts im Spiegel der 100-jährigen Meßreihe des alpinen Gipfelobservatoriums auf dem Sonnblick, CIMA-88, Tagungsber. des 20. Congresso internazionale di meteorologia alpina, Sestola, It., Vol. 1, Beitr. 1-C17, Italen met. ser.
- Auer, I., R. Böhm, I. Dirmhirn, N. Hammer, E. Koch, H. Mohnl, E. Putz, C. Retitzky, E. Rudel, G. Skoda und P. Weihs (1993) Klimareihen: Analyse und Interpretation von Klimadaten in Bestandsaufnahme Anthropogene Klimaänderungen: Mögliche Auswirkungen auf Österreich - Mögliche Maßnahmen in Österreich. Österreichische Akademie der Wissenschaften, 1993:.. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften
- Bardossy A. und H. J. Caspary (1990) Modellkonzept zur Folgenabschätzung von Klimaänderungen für den regionalen Wasserhaushalt, Institut für Wasserwesen, Mitteilungen Universität der Bundeswehr, München, Band 38/a, pp 11-22
- Bardossy, A. und E. Plate (1992) Space Time Model for Daily Rainfall Using Atmospheric Circulation Patterns. Water Resour. Res. 28: 1247-1260
- Bardossy, A. (1993) Stochastische Modelle zur Beschreibung der raum-zeitlichen Variabilität des Niederschlags. Mitt. Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Univ. Karlsruhe, Bd. 43, Karlsruhe.
- Baumgartner, A., E. Reichel und G. Weber (1983) Der Wasserhaushalt der Alpen: Niederschlag, Verdunstung, Abfluß und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931-1960. Oldenbourg Verlag, München, Wien
- Baur, F. (1947) Musterbeispiele europäischer Großwetterlagen. Dieterich, Wiesbaden.
- Baur, F., Hess, P. und H. Nagel (1944) Kalender der Großwetterlagen Europas 1881-1939. Bad Homburg
- Beniston, M., und P. Jungo (2002) Shifts in the distributions of pressure, temperature and moisture in the alpine region in response to the behavior of the North Atlantic Oscillation. Theoretical and Applied Climatology, 71, 29-42.
- Beniston, M., F.Keller, und S. Goyette (2003a) Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impacts studies, Theoretical Applied Climatology, 74, 19-31.
- Beniston.,M., F. Keller, B. Koffi, und S. Goyette (2003b) Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions, Theoretical and Applied Climatology, 76, 125-140.
- Beniston, M. (2004) Climatic Change and its Impacts: An Overview Focusing on Switzerland. Kluwer Academic Publishers (now Springer Publishers), 296 pp.
- Beniston, M., und D. B. Stephenson (2004) Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions, Global and Planetary Change, in press

- Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund, Sweden, Bulletin Series A No. 52
- Bergström, S. (1995) The HBV model. In: Singh VP (ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 443-476
- BMLFUW (2003) Habersack H. und Fuchs, H.: Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002. WP Ökonomische Aspekte TP 01, Datenbasis der Schadensbilanz 2002.
- Boroneant, C., G. Plaut, F. Giorgi und X. Bi, (2004) Extreme precipitation over the Maritime Alps and associated weather regimes simulated by a regional climate model: Present day and future climate scenarios. Submitted to Theoretical and Applied Climatology.
- Bradley, R. S. und Jones, P. D. (1992) Climatic Variations over the last 500 years. In Climate since A.D. 1500. Routledge, New York.
- Brandsma T. und T.A. Buishand (1997) Statistical linkage of daily precipitation in Switzerland to atmospheric circulation and temperature, Journal of Hydrology (198)1-4 pp. 98-123
- Braun, L. (1985) Simulation of Snowmelt-Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland, Züricher Geographische Schriften Heft 21, Geographisches Institut der ETH Zürich
- Briffa, K. R. (1993) The Simulation of Weather Types in GCMs: A Regional Approach to Control-Run Validation, in Analysis of Climate Variability, Hrsg. H. von Storch, A. Navarra, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York.
- Brückner, e. (1910) Postglaziale Klimaänderungen und Klimaschwankungen im Bereich der Alpen, S 99-108 aus Penck, A.: Die Alpen im Eiszeitalter, Leipzig
- Busuioc, A., F. Giorgi, X. Bi und M. Ionita (2004) Comparison of regional climate model and statistical downscaling simulations of different winter precipitation change scenarios over Romania. Submitted to Theoretical and Applied Climatology.
- Collins, M. (2004) Extreme weather and climate events, Weather, Vol. 59, 5, p. 138.
- Déqué, M., R.G. Jones, M. Wild, F. Giorgi, J.H. Christensen, D.C. Hassell, P.L. Vidale, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, F. Kucharski und B. van den Hurk (2005) Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. Clim. Dyn., 25(6), 653-670.
- Dehn, M.. (1999) Szenarien der klimatischen Auslösung alpiner Hangrutschungen, Simulation durch Downscaling allgemeiner Zirkulationsmodelle. Bonner Geographische Abhandlungen, Asgard-Verlag, Sankt Augustin.
- Ferro, C.A.T. und J. Segers (2004) Extremes of stationary time series. In Statistics of Extremes: Theory and Applications by J Beirlant, Y Goegebeur, J Segers and J Teugels. London: Wiley.
- Frei, C. und J. Schmidli (2003) Scenarios of European precipitation change in the 21st century: An evaluation of and predictions from Regional Climate Models. Proc. of the 6th International Workshop on Urban Precipitation, 4-6 Dec. 2003. Pontresina, Switzerland.
- Frei, C. (2003) Statistical limitation for diagnosing changes in extremes from climate model simulations. Proc. of the 14th Sympos. on Global Change and Climate Variations. AMS Annual Meeting. Long Beach CA. Feb. 9-13, 2003.
- Frei, C., J.H. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, R.G. Jones, und P.L. Vidale (2004) Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, J. Geophys. Res., 108, NO. D3, 4124, doi:10.1029/2002JD002287.
- Frei, C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli and P. L. Vidale (2005) Future Change of Precipitation Extremes in Europe: An Intercomparison of Scenarios from Regional Climate Models, J. Geophys. Res., Res. III, Art. No D06105

- Fuchs, M. (2005) Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie verschiedener Regionen in Österreich. Dissertationsschrift am Inst.f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstr. Wasserbau, Univ. f. Bodenkultur.
- Furrer G., B. Gamper-Schollenberger und J. Suter (1980) Zur Geschichte unserer Gletscher in der Nacheiszeit - Methoden und Ergebnisse. Aus: Oeschger, H.: Das Klima, 91-107.
- Fürst J. und H.P. Nachtnebel (2007) Hydrologischer Atlas Österreichs – HAÖ: Trends in Niederschlag und Abfluss. Im Auftrag des BMFLFUW, Wien.
- Furrer, G., B. Gamper-Schollenberger, und J. Suter (1980), Zur Geschichte unserer Gletscher in der Nacheiszeit- Methoden und Ergebnisse, Aus: Oeschger, H.: Das Klima, 91-107
- Gerstengarbe, F.-W. und P.C. Werner (1999) Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998). Nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.  
([www.pik-potsdam.de/~uwerner/gwl/gwl.pdf](http://www.pik-potsdam.de/~uwerner/gwl/gwl.pdf))
- Giorgi, F., X. Bi und J. Pal (2004) Means, trends and interannual variability in a regional climate change experiment over Europe. Part I: Present day climate (1961-1990). *Clim. Dyn.*, 22(6-7), 733-756.
- Giorgi, F., X. Bi und J. Pal (2004) Means, trends and interannual variability in a regional climate change experiment over Europe. Part II: Future climate scenarios. *Clim. Dyn.*, 23(7-8), 839-858.
- Gleick, P.H. (1986) Methods for Evaluating the Regional Hydrologic Impacts of Global Climate Changes, *J. Hydrol.* 88, 97-116
- Hagemann, S., und D. Jacob (2004) European discharge as simulated by a multi-model ensemble, Proceedings of WCRP Regional Climate Modelling Workshop, Lund, 29.3.-2.4.2004, Lund eRep. *Phys. Geogr.*, ISSN No. 0348-3339
- Haiden, Th. und M. Hantel (1991) Klimamodelle: Mögliche Aussagen für Österreich, In: Bestandsaufnahme Anthropogene Klimaänderungen: Mögliche Auswirkungen auf Österreich - Mögliche Maßnahmen in Österreich. Hrsg. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Hebenstreit K. (2000) Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugs-gebiete. Dissertationsschrift an der Univ. f. Bodenkultur, Wiener Mitteilungen Bd. 160.
- Hess, P. und H. Brezowsky (1969) Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes NR. 113, Bd. 15, 2. Neu bearbeitete und ergänzte Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. Main, Germany.
- Hirschi, M., S.I. Seneviratne und C. Schär (2005) Seasonal variations in terrestrial water storage for major mid-latitude river basins. *J. Hydrometeorol.*, 7 (1) 3960
- Holzmann, H. und H.P. Nachtnebel (1995) Analyse und Quantifizierung der Komponenten des Wassertransportes für ausgewählte Böden im Leibnitzer Feld. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Jahrg. 47, Heft 7/8
- Holzmann, H., Nachtnebel, H. P. (1994) Verknüpfung von GIS und Bodenwasserhaushaltsmodell *BOWA*. Wiener Mitteilungen, Bd. 123, Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1990) *Climate Change: The IPCC Impacts Assessment*, Commonwealth of Australia
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1992) *Confronting Climate Change, Risks, Implications and Responses*, University of Cambridge
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1995) *Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS1992 Emission Scenarios*, University of Cambridge
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996) *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1998) *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge University Press, 1998.

- IPCC-TGCI (1999) Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaption Assessment. Version 1, Prepared by Carter, T.R., Hulme, M., & Lal, M., Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment. ([http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru\\_data/support/guidance.pdf](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/support/guidance.pdf))
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Climate Change 2007. Synthesis Report
- Jones, R., J. Murphy, D. Hassell, und R. Taylor (2001) Ensemble mean changes in a simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modelling system HadAM3H/HadRM3H
- Kirchhofer, W. (1974) Classification of European 500 mb patterns. Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr.43, Genf.
- Kirchofer, W. (1973) Classification of European 500 mb patterns, Meteor. Zentralanstalt, Arbeits No.3, Zürich
- Kjellström, E. (2004) Recent and future signatures of climate change in Europe. *Ambio* 23, 193-198.
- Kjellström, E. (2005) Daily variability in temperature and precipitation: recent and future changes over Europe. In: L. Bärring (ed.) Proceedings from Regional-scale climate modeling WORKSHOP. High-resolution climate modeling: Assessment, added value and applications. Lund, Sweden, 29 March - 2 April 2004. Lund eRep. Phys. Geogr., No. 5, May 2005.
- Kleinn, J. C. Frei, J. Gurtz, D. Lüthi, P.L. Vidale, und C. Schär (2005) Hydrologic Simulations in the Rhine Basin driven by a Regional Climate Model, *J. Geophys. Res.*, 110, D04102, doi:10.1029/2004JD005143
- Koch, E., E. Rudel (1991) Mögliche Auswirkungen eines verstärkten Treibhauseffekts, *Wetter und Leben*
- Koorevaar, P., G. Menelik und C. Dirksen (1983) *Elements of Soil Physics*. Amsterdam - Oxford - New York - Tokio: Elsevier
- Kuhn, M. (1988) Folgen einer langfristigen Erwärmung für Schnee und Eis, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, Nr. 94, 87-98.
- Kuhn, M., G. Markl, G. Kaser, F. Obleitner und H. Schneider (1985) Fluctuations of Climate and Mass Balance: Different Responses of Two Adjacent Glaciers, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 21, 409-416
- Kuhn, M., Oberleitner F., Nachtnebel H.P. und G. Reichel (1993) Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt Österreichs. In ÖAW (Hrsg.) Bestandsaufnahme Anthropogene Klimaänderung: Mögliche Auswirkungen auf Österreich – Mögliche Maßnahmen in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Kuhn M. (2008) Die Alpengletscher im Klimawandel: mögliche Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft. Vortrag beim ÖWAV, 2007.
- Lamb, H.H. (1972) *British Isles Weather Types and Register of the daily sequence of Circulation Patterns 1861-1971*. Geophys. Mem., Nr.116, Meteorological Office, London.
- Lang, H. (1978) Über die Bedeutung der Mitteltemperatur als hydrometeorologischer Informationsträger, 14. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Rauris 1976, *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, Wien, Heft 31
- Lauscher, F., (1985) *Klimatologische Synoptik Österreichs mittels der ostalpinen Wetterlagenklassifikation*. *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, 64, Wien.
- Lemmelär, H. Liebscher, F. Nobilis (1990) Studies and Models for Evaluating the Impact of Climate Variability and Change On Water Resources within the WMO-regional Association VI (Europe), WMO, Regional Association VI, Working group on hydrology
- LINK (2001) The Climate Impacts LINK Projects. Homepage: [www.cru.uea.ac.uk/link](http://www.cru.uea.ac.uk/link)
- Manabe S., R.T. Wetherald (1987) Large Scale Changes of Soil Wetness Induced by an Increase in Atmospheric Carbon Dioxide, *J. Atmos. Sci.* 44, 1211-1235
- Matulla C., H. Formayer, P. Haas und. H. Kromp-Kolb (2004) Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21 Jahrhunderts. *ÖWAV*, 56, H. 7/8.
- Matyasovszky, I., I. Bogardi, A. Bardossy und L. Duckstein (1993) Estimation of Local Precipitation Statistics Reflecting Climate Change. *Water Resources Research*, VOL. 29, NO. 12, p 3955-3968

## Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich

- Matyasovszky, I., I. Bogardi und L. Duckstein (1994) Comparison of Two General Circulation Models to Downscale Temperature and Precipitation under Climate Change, *Water Resources Research*, VOL. 30, NO. 12, p 3437-3448
- Nachtnebel H.P., K. Hebenstreit, I. Bogardi und I. Matyasovszky (1995) *Klimaänderung und Wasserwirtschaft*. Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 56b, München
- Nachtnebel H.P., K. Hebenstreit und W. Diernhofer (1999) Final Report CCHYDRO. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien  
[http://iw.hw.boku.ac.at/climate\\_change\\_deu.html](http://iw.hw.boku.ac.at/climate_change_deu.html)
- Nachtnebel, H.P., K. Hebenstreit, W. Diernhofer und M. Fuchs (1999) Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51, 9/10, Wien
- Nachtnebel H.P. (2003) New Strategies for Flood Risk Management after the Catastrophic Flood in 2002 in Europe. Proc. 3rd IASA-DPRI Conference on Integrated Disaster Risk Management, Kyoto, Japan.
- Nachtnebel H.P. und M. Fuchs (2003) Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluß von Szenarien einer möglichen Klimaänderung. Abschlussbericht. Auftragsforschung des BMFWV und BMUJF.  
<http://iw.hw.boku.ac.at/forschung/Bericht1.pdf>
- Nachtnebel H.P. und M. Fuchs (2004) Assessment of hydrological changes in Austria due to possible climate change (in German). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 56, 7/8: 79-92
- Nachtnebel H.P. (2004) Linking Large Scale Meteorological Data with Hydrological Processes in an Alpine Basin. p. 30-48. In: *Scaling Problems in Hydrology*; D. Gutknecht, M. Hantel und H.P. Nachtnebel (Eds.) Austrian Academy of Sciences. ISBN: 3-7001-3334-0. Vienna, Austria.
- Oeschger H., A. (1988) Klimaschwankungen und -änderungen, vermutbare Ursachen und Folgen, *Österreichische Wasserwirtschaft* 40, Heft 5/6
- Pal, J., F. Giorgi, und X. Bi (2004) Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters*, 31, L13202, doi:10.1029/2004GL019836.
- Penman, H. L. (1956) Estimating Evaporation. *Transactions of the American Geophysical Union*, Volume 37, pp. 43-46.
- Pfister, C. (1992) Monthly temperature and precipitation in Central Europe from 1525-1979. In *Climate since A.D. 1500*. Routledge, New York.
- Pfister, C. (1994) Climate in Europe during the late Maunder Minimum Period (1675-1715). In *Mountain Environments in Changing Climates*. Routledge, London.
- PRUDENCE (2001) Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects.  
<http://prudence.dmi.dk>
- Raible, C.C., C. Casty, J. Luterbacher, A. Pauling, J. Esper, D. Frank, U. Büntgens, A. C. Roesch, M. Wild, P. Tschuck, P.-L. Vidale, C. Schär, und H. Wanner (2006) Climate variability - observations, reconstructions and model simulations for the Atlantic - European and Alpine Region from 1500-2100 AD, *Clim. Change*, 79, 9-29
- Rickli, R. (1995) Gruppierung Europäischer Großwetterlagen nach alpin-synoptischen Kriterien. Arbeitsbereich zuhänden des Nationalen Forschungsprogrammes 31 "Klimaänderung und Naturkatastrophen". Geographisches Institut Universität Bern.
- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese, und U. Schulzweida (1996) The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. Max Planck Institut für Meteorologie, Report No. 218, Hamburg.
- Rowell, D.P. und Jones, R.G. (2006) Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Climate Dynamics*, 27, 281-299
- Rowell, D.P. (2005) A scenario of European climate change for the late 21st century: seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics*, 25, 837-84

## Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich

- Rudloff H. (1980) Klimaentwicklungen in den letzten Jahrhunderten im mitteleuropäischen Raum. S. 125-127 aus: Oeschger H.: Das Klima, Springer Verlag
- Salvisberg, E. (1996) Wetterlagenklimatologie-Möglichkeiten und Grenzen ihres Beitrages zur Klimawirkungsforschung im Alpenraum. Geographica Bernensia, Bern.
- Schädler, B. (1987) Long Water Balance Time Series in the Upper Basins of Four Important Rivers in Europe - Indicators for Climatic Changes?, IAHS-Publications 168, 209-219
- Schädler, B. (1989) Water Balance Investigations in Swiss Alpine Basins - Tool for the Improved Understanding of Impacts of Climatic Changes on Water Resources?, Conference on Climate and Water, Volume 1, Helsinki, 1-14
- Schär C. und C. Frei (2005) Orographic precipitation and climate change. In: U. M. Huber, H. K. M. Bugmann and M. A. Reasoner (eds): Global Change and Mountain Regions: A State of Knowledge Overview. Springer, Dordrecht, 255-266.
- Schüepp, M. (1979) Witterungsklimatologie. Klimatologie der einzelnen Wetterlagen. Klimatologie in der Schweiz, Bd.3, Zürich.
- Simmons, A.J. und L. Bengtson (1988) Atmospheric General Circulation Models: Their Design and Use for Climate Studies, in Physically-Based Modelling and Simulation of Climate and Climatic Change, Vol. II, NATO ASI Ser., edited by M. Schlesinger, Boston, Kluwer Academic, 627-652
- Steinacker, R. (1999) An Eastern Alpine Flow Regime Classification, internal report, Institut für Meteorologie und Geodynamik der Universität Wien.
- Stöckli R. und P.L. Vidale (2004) Modeling seasonal water and heat exchanges at European Fluxnet sites. Theor. Appl. Climatol., 80, (2-4), 245-257
- Thorntwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification on climate. Geogr. Rev. 38
- Vidale P.L., D. Lüthi, Frei C., Seneviratne S. und C. Schär (2003) Predictability and uncertainty in a regional climate model, 2003: J. Geophys. Res., 108(D18), 4586, doi: 10.1029/2002JD002810.
- Von Storch H. und Navarra A. (1999) Analysis of Climate Variability, Applications of Statistical Techniques. 2<sup>nd</sup>, Updated and Extended Edition. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Wanner H., Gyalistras D., Luterbacher J., Rickli R., Salvisberg E. und C. Schmutz (2000) Klimawandel im Schweizer Alpenraum. VDF Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Wilby, R.L. & Wigley, T.M.L. (1997) Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Progress in: Physical Geography, 21, 530-548.
- Wilson, L. L. et al. (1992) A Hierarchical Stochastic Model of Large Scale Atmospheric Circulation Patterns and Multiple Station Daily Precipitation, J. Geophys. Res., 97: 2791-2809
- WMO (1987) Water Resources and Climatic Change: Sensitivity of Water-Resources Systems to Climate Change and Variability, Proc. Norwich meeting, WCAP-4, Genf, 50pp
- Zehe E. Stehlik J. und A. Bardossy (2004) Hydrologische Auswirkungen eines Klimaänderungsszenarios im Rheineinzugsgebiet. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft ½.

### **Anschrift des Autors:**

o.Univ.-Prof. DI Dr. Hans-Peter Nachtnebel  
Universität für Bodenkultur Wien  
Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt  
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau  
Muthgasse 18, 1190 Wien  
Tel. +43-1-36006-5501  
E-Mail: hans\_peter.nachtnebel@boku.ac.at

# Harte und weiche Fakten zum Klimawandel – ein Überblick

*Reinhard Böhm*

## 1 Einleitung

„Das Klima der Erde ist aus dem Gleichgewicht“ – diese Aussage beherrscht seit einiger Zeit die öffentliche Meinung. Da das Klima der Erde jedoch ein höchst diffiziles, von zahlreichen äußeren Einflüssen und auch internen Rückkopplungen gesteuertes System ist, das noch dazu eine große räumliche und zeitliche Variabilität auf unterschiedlichsten Skalen zeigt, ist es nicht nur für den Laien, sondern auch für den Fachmann schwer, einen Überblick zu gewinnen. Fragen wie „natürlicher oder anthropogener Klimawandel“, „wärmeres Klima = Katastrophenklima“ werden zwar in der öffentlichen Debatte oft als „erwiesene Tatsachen“ gehandelt und daraus sofort Schuldzuweisungen abgeleitet und meist noch erstaunlich simple „Lösungsvorschläge“ angeboten, in Wahrheit ist die Sache jedoch meist nicht so einfach – weder im Sinn von Verstehen noch im Sinn von „das Problem lösen“.

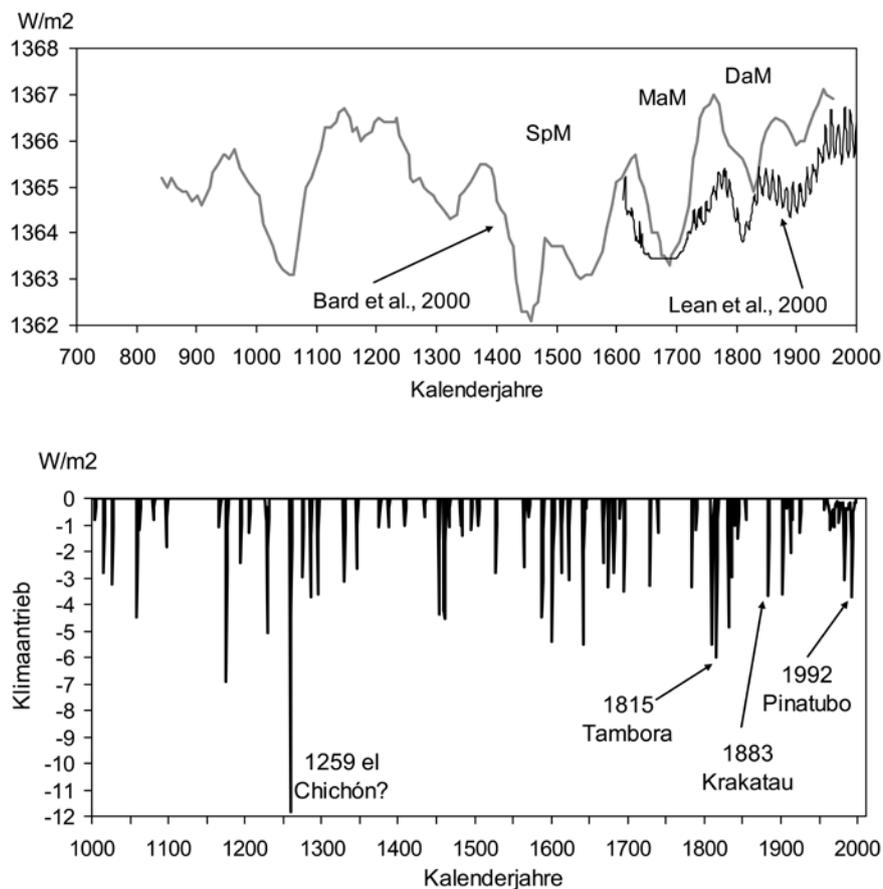
Der hier versuchte Beitrag eines kurzen Überblicks kann daher nur als Anregung verstanden werden, bei Interesse selbst weiter in die Tiefe zu gehen. Günstig dafür ist die Tatsache, dass die Zunft der Klimatologen der Erde im Rahmen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) alle fünf bis sechs Jahre den Versuch unternimmt, einen Überblick über den „state of the art“ unserer Wissenschaft zu geben. Im Jahr 2007 ist der vierte dieser Serie von „Assessment Reports“ erschienen – 3 Bände mit insgesamt 3.000 Seiten, die gratis von [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) heruntergeladen werden können. Was den Alpenraum betrifft, kann ich auf die Arbeit der Gruppe der ZAMG zurückgreifen, der ich selbst angehöre. Auf dieser Basis werde ich versuchen, alle notwendigen Verkürzungen in Kauf zu nehmen, und einen Überblick über das weite Land des Klimawandels zu geben, wie er sich aus naturwissenschaftlicher Sicht darstellt. Wenn die davon nur schwer zu trennenden politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekte interessieren, kann auf Böhm, 2008 verwiesen werden.

## 2 Klimaantriebe

Wenn man die Vergangenheit des Klimas der Erde verstehen und seine Zukunft vorhersagen will, ist die Grundvoraussetzung dafür, die „Klimaantriebe“ zu kennen, die von außen her auf das Klimasystem einwirken. Erst dann kann man versuchen, das Wissen um die physikalischen Gesetze, die die Bewegungen, die Energieflüsse, die Zustandsgrößen der Atmosphäre (Luft), der Hydrosphäre (flüssiges Wasser), der Kryosphäre (Schnee und Eis) und der Lithosphäre in ein „Klimamodell“ zu pressen, das dann ein virtuelles raum-zeitliches Abbild des Klimas der Erde erzeugt. Dieses wird dann in die Vergangenheit gerechnet, mit Daten des globalen Klimamessnetzes verglichen und nach dieser Evaluierung auch in die Zukunft hinein laufen gelassen.

Bei der Simulation der Vergangenheit kann man auf direkt gemessene oder indirekt rekonstruierte physikalische Klimaantriebe zurückgreifen, deren für das letzte Millennium wichtigste in den *Bildern 1 und 2* dargestellt sind. Auf der längeren Zeitskala von Jahrmillionen und Jahrhunderttausenden sind noch andere als die hier im Vordergrund stehenden Klimaantriebe wirksam, wie etwa die Kontinentalverschiebung oder die veränderlichen Erdbahnparameter. Für diese Zusammenstel-

lung werden wir uns auf diejenigen Faktoren beschränken, die in den letzten und den kommenden Jahrhunderten im Vordergrund stehen. *Bild 1* zeigt oben die zeitlichen Veränderungen der früher „Solarkonstante“ genannten, von der Sonne gelieferten Energie, die als kurzweilige Strahlung an der Obergrenze der Erdatmosphäre eintrifft. Das untere Diagramm zeigt die (abkühlende) Wirkung von Vulkanausbrüchen durch die Rückstreuung an den durch explosive Vulkanausbrüche in hohe Luftschichten geschleuderten „Aerosolen“. Diese beiden natürlichen Faktoren haben bis vor etwa 50 Jahren vorwiegend die Klimavariationen des letzten Jahrtausends beherrscht, die mit einem „mittelalterlichen Wärmeoptimum“ begannen, dann in eine „kleine Eiszeit“ übergingen, von der sie sich mit steigender Solarintensität schließlich wieder bis Mitte des 20. Jahrhunderts etwa auf den Stand des Mittelalters „erholten“.



*Bild 1: Natürliche Klimaantriebe im letzten Jahrtausend:*

*Oben: zwei Rekonstruktionen der zeitlichen Variabilität der „Solarkonstanten“:*

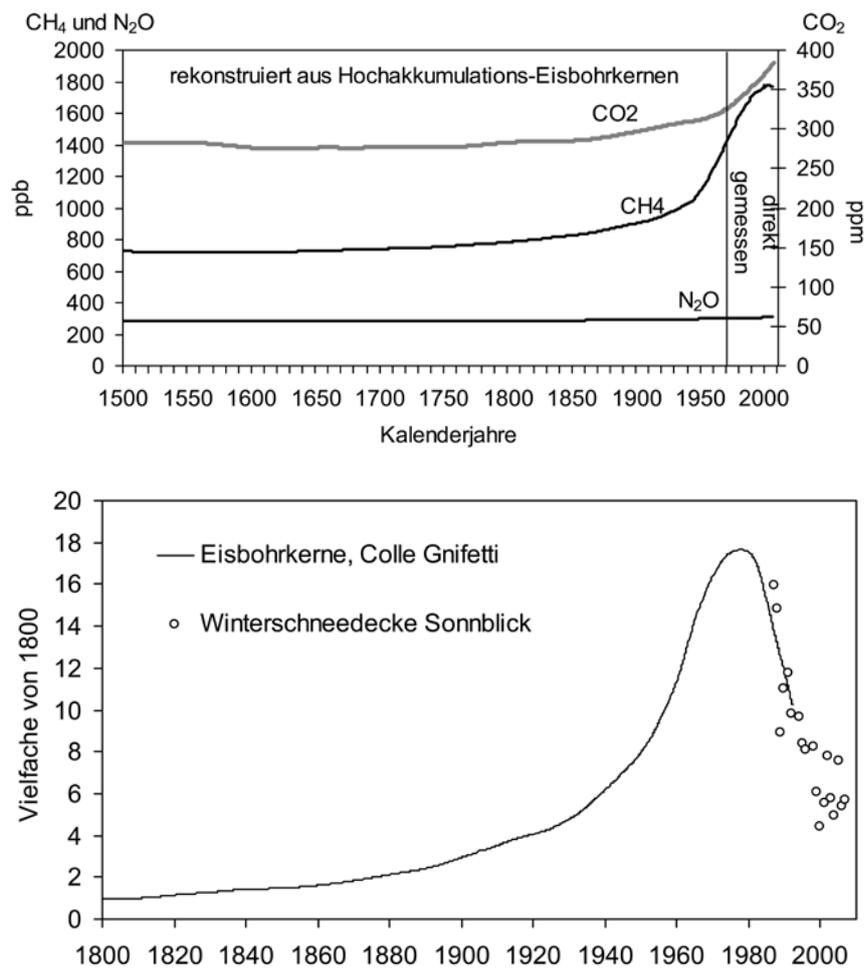
*Schwarz: aus den direkten Sonnenfleckenbeobachtungen (Lean et al., 2000)*

*Grau: abgeleitet aus kosmogenen Baumjarring- $^{14}C$ - und  $^{10}Be$ -Isotopenreihen aus Eisbohrkernen (Bard et al., 2000). SpM = Spörer-Minimum, MaM = Maunder-Minimum, DaM = Dalton-Minimum*

*Unten: 1.000-jährige Rekonstruktion des Klimaantriebes durch Vulkanausbrüche, die Schwefeldioxid in die Stratosphäre schleuderten, aus verschiedenen Eisbohrkernen und aus direkten Messungen (Crowley, 2000)*

Dann begann der Mensch mit ins Klima einzugreifen, allerdings durchaus ambivalenter, als es dem gängigen Klischee „anthropogene Klimaerwärmung“ entspricht. Durch das Verbrennen fossiler

Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) und durch Aktivitäten im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelproduktion (Nassfeldanbau, Wiederkäuer etc.) wurden vor allem die zwei „Leittreibhausgase“ Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) in der Atmosphäre in immer höheren Konzentrationen angereichert. Deren erwärmende Wirkung wurde jedoch in den ersten Jahrzehnten der extremen, und zunächst auf schmutzigen (z. B. Schwefel emittierenden) Technologien beruhenden Wirtschaftsentwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg „maskiert“. Diese z. B. Sulfat-Aerosole hatten (wie die durch die Vulkane freigesetzten) in Summe eine abkühlende Wirkung auf das Erdklima, die bis etwa 1980 dauerte. Erst die großen Anstrengungen zur Luftreinhaltung bewirkten, in Kombination mit dem Zusammenbruch der Schwer- und Rüstungsindustrie im früheren Ostblock, eine Trendwende dieses anthropogenen Klimaantriebes, die im unteren Diagramm von *Bild 2* zu sehen ist.



*Bild 2: Zusätzliche Klimaantriebe durch den Menschen:*

*Oben: Entwicklung der drei langlebigen Treibhausgase 1500–2007 aus Eisbohrkernen und aus direkten Messungen, Quelle: Robertson et al, 2001 (aktualisiert)*

*Unten: Sulfatgehalt im Firn und Eis der Hochalpen. Kombiniert aus den stark geglätteten Daten eines Eisbohrkerns (Colle Gnifetti, 4.450 m, Monte Rosa Gipfelzone) seit 1800 mit jährlichen Messungen im Winterschnee im Sonnblickgebiet (3.100 m, Hohe Tauern) seit 1982*

*Quellen: Wagenbach, pers. Mitt, 2008 und Schöner, 1995 (aktualisiert bis 2007)*

Die Treibhausemissionen allerdings konnten nicht reduziert werden, was meiner Einschätzung nach auch für die Zukunft nicht in nennenswertem Ausmaß zu erwarten ist. Zu eng ist wohl das „Komfortgas“ CO<sub>2</sub>, das unsere Räume heizt, unsere Maschinen und Fahrzeuge antreibt mit unserer Zivilisation verbunden, zu stark ist der Aufholbedarf der Mehrheit der Erdbevölkerung in dieser Hinsicht, und zu eng ist wohl auch das Methan mit der Ernährung der Menschheit verbunden. Dies führte nach 1980 zum nun tatsächlich erfolgten Eintritt ins „anthropogene Treibhausklima“, das uns wahrscheinlich auch die nächsten Jahrhunderte begleiten wird, bis weiterer technologischer Fortschritt die dann zurückgehenden Reserven an „gespeicherter fossiler Solarenergie“ (nichts anderes sind die drei fossilen Energieträger) zu ersetzen vermag.

Dass der langfristige und großräumige Temperaturverlauf mit gekoppelten globalen Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodelle (AOGCMs, genauere Beschreibung im Schlussabschnitt), denen die beschriebenen Klimaantriebe vorgegeben werden, bereits gut simulierbar ist, zeigen die beiden Zeitreihen in *Bild 3*. Die oben beschriebenen Charakteristika des Klimas des letzten Millenniums werden vom Modell Erik (benannt nach dem Wikinger Erik dem Roten) sehr ähnlich zu dem simuliert, was etwa durch hunderte Baumringanalysen im Alpenraum rekonstruiert worden ist. Wir finden in beiden Fällen exakt datierte einzelne Jahre, wie das extreme „Jahr ohne Sommer“ (1816), wir finden mitten im „Klimaoptimum“ des Mittelalters einen beinahe gleich kalten Sommer, der typisch ist für ein ganzes kaltes Jahrhundert, das im überwiegend warmen Mittelalter eingebettet ist (das 11. Jahrhundert). Wir sehen die allmähliche Abkühlung im 14. und 15. Jahrhundert und den endgültigen Absturz in die Kernperiode der „Kleinen Eiszeit“ in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Für die Diskussion „natürliches versus anthropogenes Klima“ ist anzumerken, dass bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts die heißesten Sommer und auch das mittlere Temperaturniveau gerade das der mittelalterlichen Warmzeit erreicht hatte, und dass in den letzten 20 Jahren die Temperaturkurve aus dem „natürlichen Bereich“ der letzten 1.250 Jahre hinauszuwachsen beginnt.

### 3 Gegenwärtige Trends

Bleiben wir vorerst noch auf dem sichereren Grund der gemessenen Klimatrends. *Bild 4* verdeutlicht den beschriebenen Übergang vom natürlichen zum anthropogen mitbestimmten Klima für den Großraum Alpen und im globalen Mittel, die in diesem Fall bereits durch direkte instrumentelle Messungen an mehr als hundert (Alpenraum) bzw. mehr als tausend (global) Stellen des seit 250 Jahren Mitteleuropa, seit 150 Jahren die gesamte Erde in ausreichender Dichte abdeckenden Klimamessnetzes. Wir erkennen in der Abbildung die noch kühle letzte Phase der „kleinen Eiszeit“, den Ende des 19. Jahrhunderts einsetzenden natürlich bedingten Erwärmungstrend, der schließlich um 1940–1950 – synchron mit einem Maximum der solaren Einstrahlung (vergleiche *Bild 2*) einen vorläufigen Höchstwert erreichte (Ellipse 1). Die erste anthropogene (Aerosol-) Periode kühlte das Klima weltweit und noch stärker regional ab, was z. B. verbreitet zu einer beginnenden Vorstoßperiode der Gletscher führte. Um 1980 stießen drei Viertel der österreichischen Gletscher wieder vor. Dieser Gletschervorstoß wurde jedoch sehr plötzlich durch die starke Erwärmung der Phase 3 unterbrochen, die auf die bereits beschriebene Art und Weise hauptsächlich auf den Einfluss der Treibhausgase zurück zu führen ist.

Neben diesem beschriebenen Trend, der in Mitteleuropa etwa doppelt so stark war wie im globalen Mittel (+2 °C seit 1890 gegenüber +1 °C), sei auf die regional viel stärkere kurzfristige (hochfre-

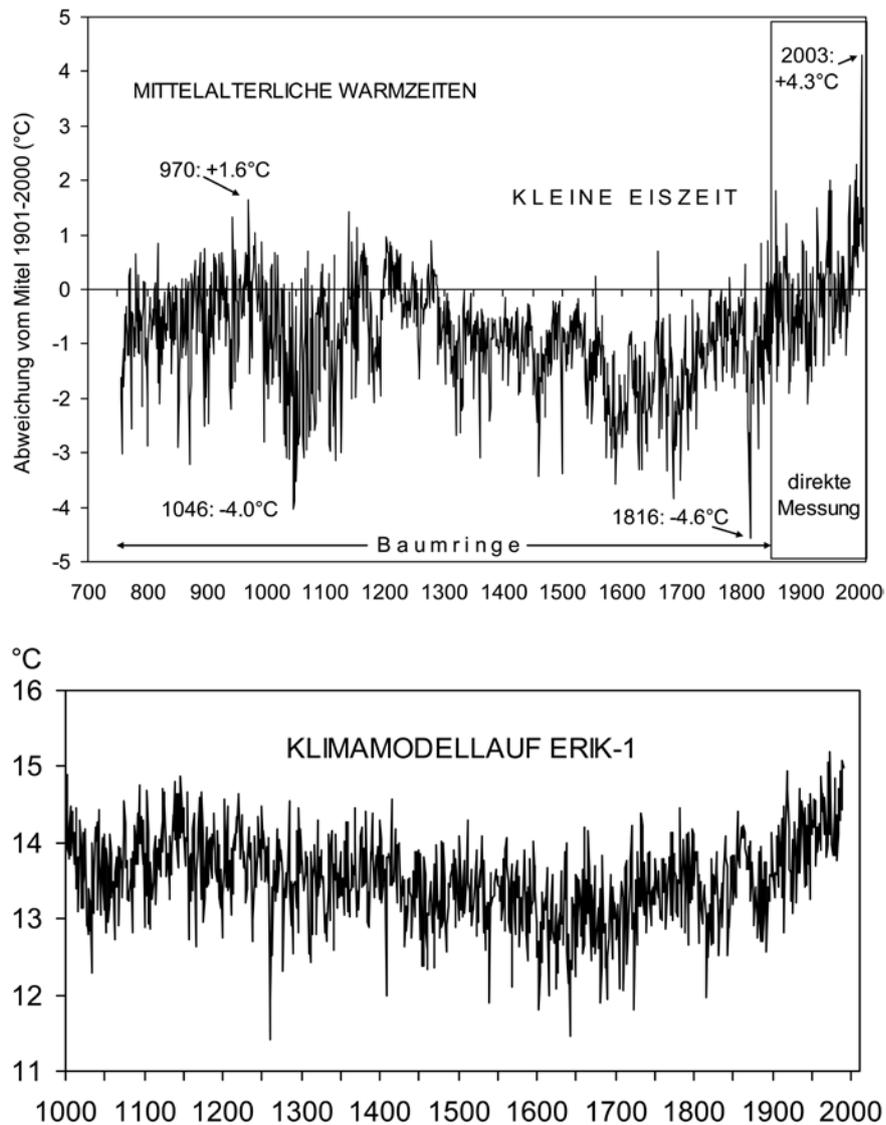
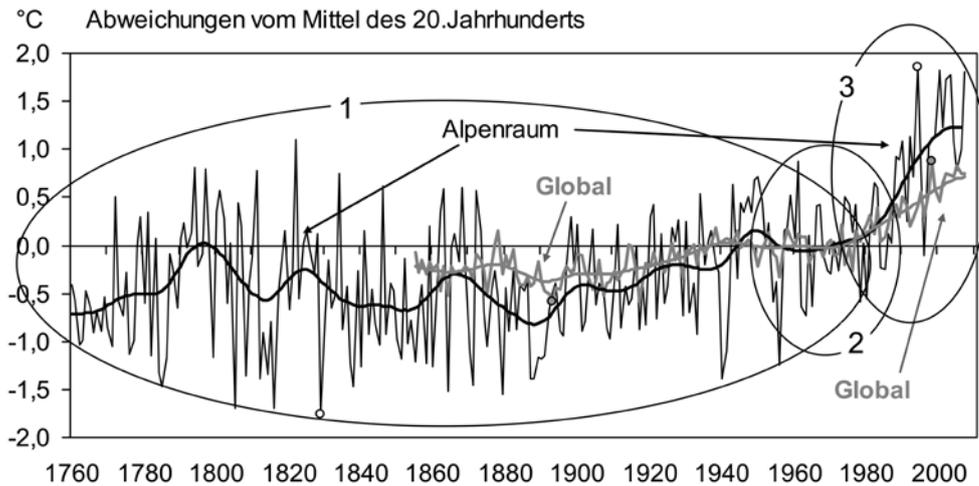


Bild 3: Klimamessung, Klimarekonstruktion und Klimamodellierung für das letzte Millennium:  
 Oben: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperaturen (Juni–September) in den Alpen seit dem Jahr 755 n. Chr.  
 755–1850: rekonstruiert aus Hunderten Jahrringdichtereihen (Büntgen et al., 2006),  
 1851–2006: direkt gemessene hochalpine HISTALP-Daten (Auer et al., 2007).  
 Unten: Klimamodellauf ERIK-1 für die Sommermitteltemperaturen (Juni–September) der Jahre 1000–1990 für Festlandeuropa (10°W–40°E, 35°N–70°N) (Zorita et al., 2004)

quente) Variabilität hingewiesen, die umso stärker die langfristigen Hintergrundtrends übertönt, je mehr man ins Regionale und Lokale geht. Diese Tatsache sei stets bedacht, wenn wieder ein extremer Winter (sowohl einen extrem milden als auch einen extrem kalten und schneereichen haben wir in den Nordalpen ja in den letzten drei Jahren erlebt) oder ein „Jahrtausendsommer“ (2003) zu voreiligen Schlüssen über die Langfristtrends verleiten. Einzelfälle aber auch zu kurze Zeitreihen erlauben in der Klimatologie nie statistisch signifikante Tendaussagen, im Fall des räumlich und zeitlich noch variableren Niederschlages in noch stärkerem Maß als für den gezeigten Fall von Jahresmitteln der Temperatur.



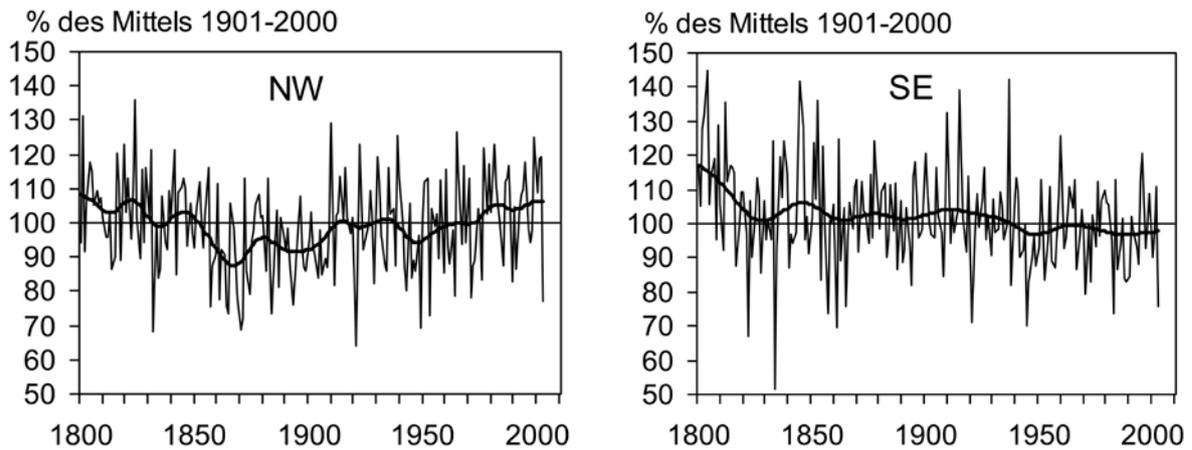
*Bild 4: Direkt gemessene Jahresmittel der Lufttemperatur im Großraum Alpen 1760–2007 (schwarz) und im globalen Mittel 1858–2007 (grau). Dargestellt sind Anomalien zum Mittel des 20. Jahrhunderts. Alpenraum: 4–19°E, 43–49°N, Mittel aus 124 Einzelreihen; Global-Land: Mittel aus 2000 Festland und Inselstationen*  
 1: letzte natürliche Periode – solarer und vulkanischer Einfluss dominant  
 2: erster merklicher menschlicher Einfluss – die Aerosolperiode  
 3: Eintritt ins Treibhauszeitalter  
 Quellen: Auer et al., 2007 und Jones et al., 1999 (aktualisiert)

Während bei der Temperatur der Langfristtrend im Großraum Alpen auch für Unterregionen repräsentativ ist (die +2° gelten sowohl für Perugia, Wien, Marseille oder Bern und genau so für die Hochalpinen Observatorien auf dem Säntis, der Zugspitze oder auf dem Sonnblick), zeigt sich bei den Niederschlagstrends in *Bild 5* ein markanter Unterschied zwischen langfristig ansteigendem Trend im Nordwesten des Alpenbogens und langfristiger Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Südosten. Die Größenordnung beider gegenläufiger Trends liegt bei 10–15 % pro Jahrhundert, während die Kurzfristvariabilität bei ±50 % liegt.

Ohne hier auf die Entwicklungen der anderen Klimaelemente ausführlich eingehen zu können, sei lediglich erwähnt, dass ein regionaler Anstieg der Sonnenscheindauer registriert werden konnte, der durch ein nordwärts Wandern des subtropischen Hochdruckgürtels vor allem im Sommer verursacht worden ist, und der auch die regional stärkere Erwärmung gegenüber der globalen erklärt. Beim Wind zeigte sich in den letzten 130 Jahren insgesamt ein allerdings nicht signifikanter leichter Rückgang nach stürmischeren Verhältnissen zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Beim Anteil des Schneefalls am Gesamtniederschlag manifestierte sich der Erwärmungstrend in einem Rückgang wieder in der Größenordnung von 10–15 %, allerdings mit systematischen jahreszeitlichen Unterschieden in unterschiedlicher Seehöhe nach dem Schema: Rückgang im Winterhalbjahr im Tal, in den Übergangsjahreszeiten in den mittleren Seehöhen von 1.500–2.000m und winterliche Stabilität in der Gletscherregion, die aber im Sommer sensitiv reagierte.

#### 4 Extremwerte

Wohl die größte Diskrepanz zwischen harten wissenschaftlichen Fakten und deren Wahrnehmung durch die Öffentlichkeit besteht auf dem Gebiet der extremen Ausformungen des Klimas. Unter



*Bild 5: Regionale Trendunterschiede beim Niederschlag:  
 Regionaler Jahresniederschlag 1800–2007, gemittelt aus je 50 Einzelreihen.  
 Links: nordwestlich des Alpenbogens (Frankreich, Schweiz, Süddeutschland, Vorarlberg, Tirol), rechts: südöstlich des Alpenbogens (Ungarn, Slowenien, Kroatien, Bosnien, Friaul, Veneto, Kärnten, West- und Oststeiermark).  
 Dargestellt sind die Einzeljahre und der 30-jährig geglättete Verlauf  
 Quellen: HISTALP-Datenbank, Auer et al., 2006*

dem allgemein akzeptierten Schlagwort „das Klima wird immer verrückter“ hat in sich ein Dogma festgesetzt, das gerade bei den weichsten Fakten ansetzt, die die klimatologische Wissenschaft derzeit (noch?) zu bieten hat. Weiche Faktenlage bei den Extremwerten herrscht sowohl bei der Klimarekonstruktion der Vergangenheit, als auch bei der Klimamodellierung – in beiden Fällen begründet durch eine Tatsache, die im Kapitel 8.5.4 des Working Group 1 Reports von IPCC-2007 (Model Simulation of Extremes) so beschrieben ist:

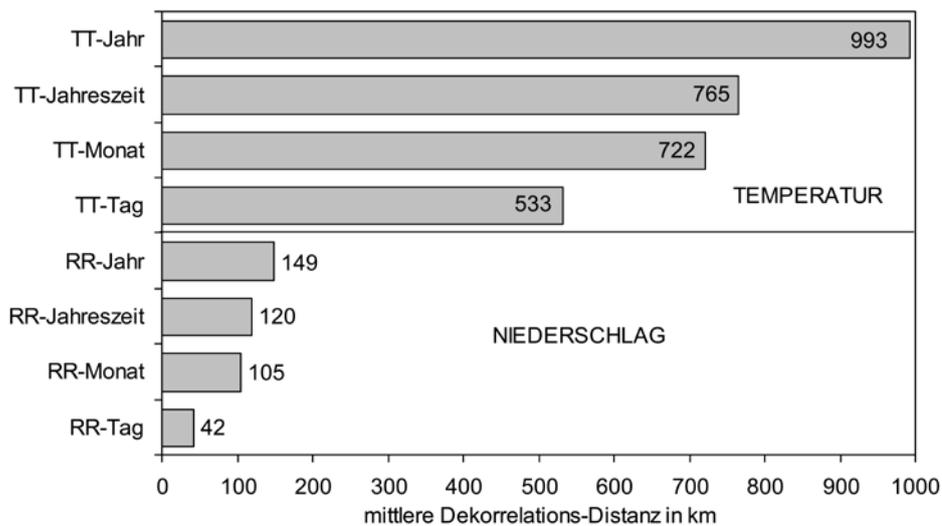
*Because most AOGCMs have coarse resolution and large-scale systematic errors, and extreme events tend to be short lived and have smaller spatial scales, it is somewhat surprising how well the models simulate the statistics of extreme events in the current climate, including the trends during the 20<sup>th</sup> century. This is especially true for the temperature extremes, but intensity, frequency and distribution of extreme precipitation are less well simulated.*

Ich habe es absichtlich beim englischen Originaltext belassen, erstens um dem Vorwurf der Manipulation zu entgegnen, zweitens aber, weil ich ein Fan der Zwischentöne bin, die diese Sprache bietet. Dieses „*somewhat surprising*“ und das „*less well*“ sind schon kleine Meisterstücke. Im Original des Textes, bevor der mühsame Prozess des „peer reviewing“ durchgeführt werden musste, war noch etwas direkter von „*serious deficiencies in the simulation of precipitation*“ die Rede, und zwar „*both in the intensity and the distribution of precipitation*“.

Im Hinblick der Analyse eventueller Trends von Extremwerten in der Vergangenheit kommen noch zwei zusätzliche Herausforderungen dazu. Zum einen erfordern die Gesetze der Statistik lange und räumlich dichte Zeitreihen, um zu signifikanten Ergebnissen zu kommen, gerade wenn die sehr seltenen sehr starken Ausreißer das Ziel der Analyse sind. Und genau diese langen Zeitreihen erfordern als *conditio sine qua non* die sorgfältige Homogenisierung dieser Zeitreihen. Wie wir zeigen konnten (Auer et al., 2007) erfährt eine durchschnittliche Klimazeitreihe im Durchschnitt

alle 20 bis 30 Jahre eine Diskontinuität (Verlegung, Instrumenten- oder Technologiewechsel, Änderung der Umgebung und zahlreiche andere Gründe), deren Stärke das eigentliche Klimasignal erreichen oder auch übertreffen kann. Und gerade für die zur Analyse von „short lived“ Extremwerten besonders benötigten Klimazeitreihen von Tageswerten (oder noch kürzerer Zeitspannen) zeigen eine zweite Besonderheit der entsprechenden Feldverteilungen: Sie dekorrelieren räumlich viel stärker, als längerfristige Mittelwerte oder Summen. *Bild 7* zeigt das exemplarisch für die Tages- bis Jahreswerte von Temperatur und Niederschlag, wobei hier noch die zusätzliche besondere „Empfindlichkeit“ des Klimatelements Niederschlag hervortritt.

Da zur Homogenisierung der Zeitreihen (= Anpassung früherer an den aktuellen „Zustand“ einer Messreihe) hoch-korrelierte Zeitreihen benachbarter Referenzreihen benötigt werden, zeigt *Bild 6* den Hauptgrund für die derzeit leider noch gegebene Tatsache, dass es homogenisierte Klimazeitreihen auf Tagesbasis kaum noch gibt. Das gilt sowohl international als auch für den Alpenraum oder Österreich. Für einige Subregionen Österreichs arbeitet unsere Gruppe gerade an der Erstellung räumlich dichter Tagesreihen für das 20. Jahrhundert, und eine internationale COST-Aktion („HOME“ siehe Anhang) hat u. a. das Problem der Homogenisierung von Tagesreihen zum Gegenstand.



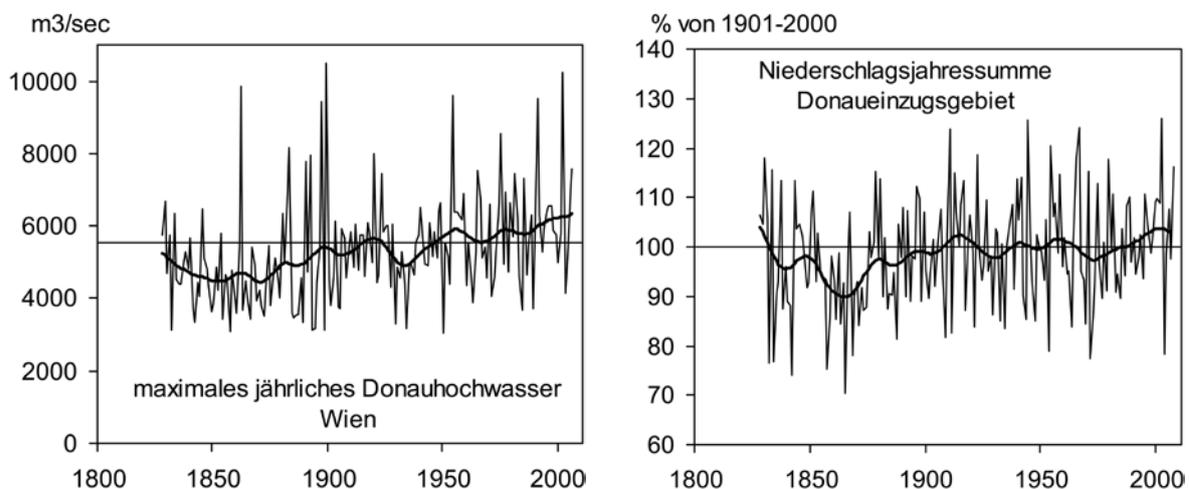
*Bild 6: Räumliche Dekorrelation auf 50 % gemeinsame Varianz im Europäischen Klimamessnetz von Jahres-, Jahreszeiten-, Monats- und Tageswerten von Temperatur und Niederschlag*  
 Quelle: Scheifinger et al., 2003 (interner Projektbericht ALP-IMP)

Spiegelbildlich dieselben Probleme zeigen sich bei der Trendanalyse der Extremwerte. Deren große räumliche und zeitliche Variabilität rückt lokale Ergebnisse in den Vordergrund und verdeckt den Überblick auf die Gesamtsituation. Naturgemäß eröffnet das in der öffentlichen, aber leider auch in der wissenschaftlichen Debatte ein weites Feld entbehrlichen Streits, widersprüchlicher Ergebnisse und das osmotische Eindringen weltanschaulicher Argumentation in ein wissenschaftlich noch nicht befriedigend aufgearbeitetes Thema. Immer kann in den zweifellos real vorhandenen, aber noch nicht flächen- und zeitabdeckend analysierten Mustern der Extremwert-Verteilungen gerade das Ereignis oder Ergebnis herausgesucht werden, das am besten die jeweilige Position untermauert – „picking“ heißt der dafür existierende Fachausdruck. Um nicht in genau diese Falle zu tappen, werden in der Folge nur kurz einige vorläufige Ergebnisse vorgestellt, wobei das bisher

Gesagte die notwendige Einschränkung im Hinblick Verallgemeinerung klargestellt haben sollte.

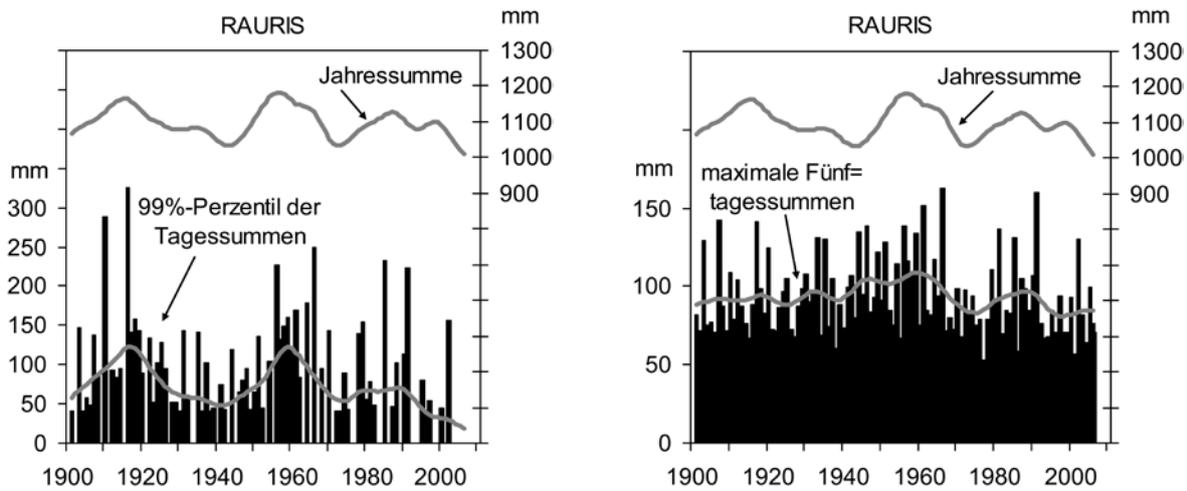
Ein interessantes vorläufiges Ergebnis, das unsere laufenden diesbezüglichen Projekte erbracht haben bzw. gerade erbringen (Foralps, A Tale of Two Valleys), ist vor allem beim Niederschlag der überraschend enge Zusammenhang zwischen Trends von Extremwertindizes auf Tagesbasis und den entsprechenden Trends von Mittelwerten, bis hinauf zu Jahresmitteln. *Bild 7* bringt ein Beispiel für extremen Tagesabfluss und Niederschlag im großen Donaeinzugsgebiet des Pegels Nussdorf (Wien), *Bild 8* einen Vergleich von Niederschlagsjahressummen und Tageswertsindizes-Klimareihe in den Hohen Tauern. Es scheint somit, zumindest für den Großraum Alpen, nicht so zu sein, dass Trends der Extremwerte auch in ganz andere Richtungen gehen können, als die der Mittelwerte. Es ist also nicht unbedingt zu erwarten, dass zum Beispiel in Gegenden mit generell fallendem Niederschlagstrend (wie etwa im Südosten des Alpenbogens) ein Anstieg der Starkregen zu erwarten ist oder, im umgekehrten Fall in Regionen mit Niederschlagszunahme (wie etwa im Nordwesten des Alpenbogens) die Trockenperioden häufiger werden.

Dieser Befund gilt auch für die Temperatur: Also mit generellem Erwärmungstrend steigen die Extremwerte, die sich auf Hitze beziehen und im gleichem Maß ist ein Rückgang der Kälteindizes zu beobachten. Beides nicht notwendigerweise in linearer Form, speziell wenn Schwellwertsüber- oder -unterschreitungen analysiert werden, sind nichtlineare Zusammenhänge die Regel.



*Bild 7: Links: Zeitreihe der jährlich größten Durchflussmengen der Donau bei Wien, 1828–2006, Quelle: Godina R, Hydrographisches Zentralbüro, Wien, 2008, persönliche Mitteilung Rechts: Flächenmittel der Jahressummen des Niederschlages im Einzugsgebiet der Donau oberhalb Wiens, Quelle: 28 langjährige HISTALP-Niederschlagsreihen, Auer et al., 2007 Alle Reihen für Einzeljahre (dünn) und 30-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpassfilter)*

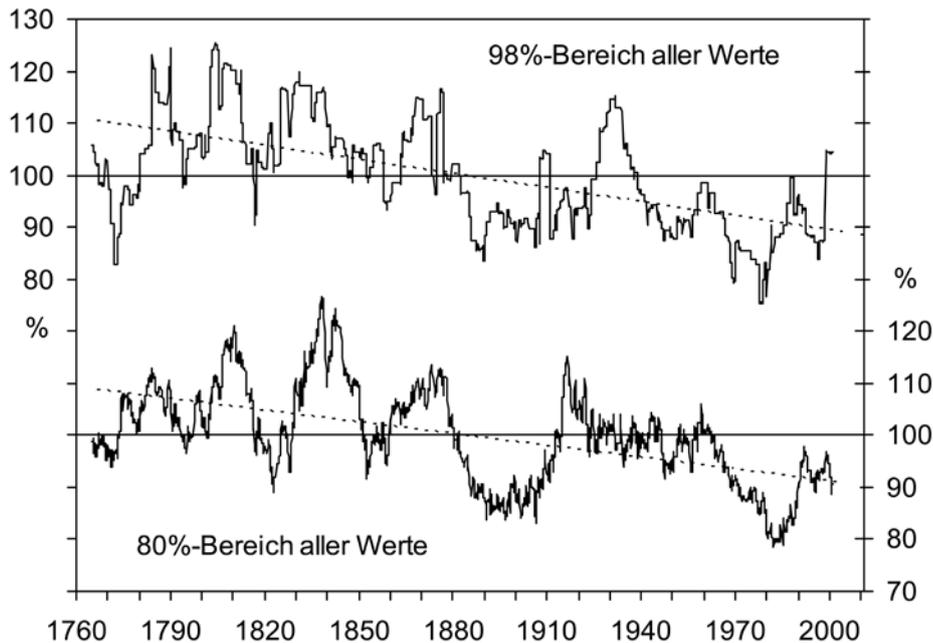
Der vorläufige Befund der Ähnlichkeit der Trends von auf Tageswerten beruhenden Extremwerten und denen der Mittel- oder Summenwerte lässt auch einem weiteren vorläufigen Ergebnis erhöhte Bedeutung zukommen, das eine noch unveröffentlichte Untersuchung an den längsten HISTALP-Monats-, -Jahreszeiten- und -Jahresreihen von Luftdruck, Temperatur und Niederschlag erbracht hat. Es wurden die längsten Zeitreihen der Region (jeweils 20 bis 30 Reihen), die alle in die frühe instrumentelle Periode zurückreichen (vor 1840) nach einem hier nur kurz skizzierbaren Verfahren auf langfristige Veränderungen der Variabilität untersucht.



*Bild 8: Ähnlichkeit zwischen der gesamten Jahressumme des Niederschlages (die 20-jährig geglätteten Linien oben in den Abbildungen) und von zwei Niederschlags-Extremwertindizes für den inneralpinen Ort Rauris (Einzeljahre und 20-jährig geglättet, unten). Links: Summe der Tagesniederschläge, die in der Klimanormalperiode 1961–90 nur noch von 1 % aller Fälle übertroffen werden (= 99%-Perzentil). Rechts: maximale Fünftagesummen eines Jahres  
Quelle: Auer et al., 2008a und b*

Das Verfahren wurde auf alle einzelnen Reihen getrennt angewendet, um die statistisch zu erwartende Erhöhung der Varianz mit abnehmender Reihenanzahl zu vermeiden. Bei der Jahreszeiten- und Jahresanalyse wurden zunächst die Trends selbst durch Hochpassfilterung eliminiert (Filterweite 30 Jahre), dann in übergreifenden Zeitfenstern von 30 Jahren Quantile (von 1 % bis 99 %) berechnet. Dadurch konnten mit den Interquantilbereichen verteilungsfreie Zeitreihen der Klimavariabilität erzeugt werden. Analysiert wurden jeweils die 80%-, 90%- und 98%-Interquantilbereiche. Für jahresgangbereinigte (durch Normalisierung) sequentielle Monatsreihen wurde das analoge Verfahren auf der Basis von 10-jährigen (= 120 monatlichen) Zeitfenstern durchgeführt.

Bei Luftdruck und Temperatur ergaben sich regional sehr ähnliche Verläufe der Interquantil-Zeitreihen, beim Niederschlag reagierten der mediterrane, der atlantische und der kontinentale Bereich des Großraums Alpen regional und jahreszeitlich unterschiedlich. Generell wurde überraschenderweise sowohl in den letzten 200 Jahren als auch in den letzten 50 Jahren keine generelle Steigerung der Klimavariabilität beobachtet, wie sie in der Öffentlichkeit als Selbstverständlichkeit vorausgesetzt wird. Speziell bei der Temperatur sind die Trends der Variabilität (= der „Verrücktheit des Klimas“) in allen Jahreszeiten und in allen Subregionen rückläufig. *Bild 9* illustriert das am Beispiel der sequentiellen Monatsreihen der Lufttemperatur, gemittelt über alle 24 Langzeitreihen. Beim Niederschlag liegen jahreszeitlich und regional unterschiedliche Trends der Variabilität vor, wobei die markantesten Zunahmen der Variabilität typischerweise dort beobachtbar sind, wo auch die Trends der Niederschlagsmengen zunehmen, zum Beispiel im Herbst und Winter der Subregion nordwestlich des Alpenbogens. *Tabelle 1* zeigt das exemplarisch für den 90%-Interquantilbereich und den Langfristtrend vom 19. zum 20. Jahrhundert.



*Bild 9: Zeitreihen der Variabilität des Temperaturklimas im Großraum Alpen von 1760 bis 2006: 80%- und 98%-Quantilbereich in Zeitfenstern von 120 Monaten, die in Monatsschritten über standardisierte 30-jährig hochpassgefilterte sequentielle Monatsreihen der Temperaturen der 24 vor 1840 beginnenden instrumentellen Messreihen der Region bewegt wurden. Dargestellt ist hier das Mittel über alle diese Langzeitreihen.  
Quelle: Zwischenergebnis einer laufenden Untersuchung der Arbeitsgruppe Klimawandel der ZAMG-Wien*

*Tabelle 1: Prozentuelle Änderungen (Grundwert 19. Jahrhundert) der Klimavariabilität (Interquantilbereich 90 %) vom 19. zum 20. Jahrhundert auf Jahreszeiten- und Jahresbasis in drei Subregionen des Großraums Alpen für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag  
Quelle: wie Bild 9*

	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	
	FRL	FRL	FRK	SOM	SOM	SOM	HER	HER	HER	WIN	WIN	WIN	JAHR	JAHR	JAHR	
Temp.	-16.0	-14.9	-13.2	-20.0	-7.6	-2.3	-3.2	-9.7	+0.3	-7.4	-12.0	-6.2	-28.9	-23.8	-11.5	%
Nied.	-6.1	-3.0	-9.0	+1.7	+8.9	-2.4	-0.3	+14.1	-5.8	+8.8	+13.5	-2.6	-4.6	+5.3	-3.7	%

Will man die Charakteristika der Trends von Klimaextremwerten zusammenfassen, muss an erster Stelle auf die noch großen Forschungsdefizite hingewiesen werden, die vor allem auf der ungenügenden Dichte von Langzeit-Messreihen beruhen. Die vorläufigen Ergebnisse aus dem Großraum Alpen zeigen einen generellen Rückgang der Temperatur-Variabilität bei gleichzeitig steigenden Temperaturen. Beim Niederschlag liegen regional und jahreszeitlich unterschiedliche Trends der Variabilität vor, es scheinen jedoch die Trends der Extremwerte analog zu denen der über längere Zeiträume akkumulierten Summen zu verlaufen. In jedem Fall sind die Langfristtrends der Veränderungen der Variabilität bzw. der Extremwerte wesentlich geringer als die Kurzfristvariabilität selbst – ein Faktum, auf das auch bei den Trends der Klimaelemente selbst bereits hingewiesen worden ist.

## 5 Die nächsten 100 Jahre

State of the Art zur Simulation des künftigen Klimas sind so genannte gekoppelte globale Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodelle (AOGCMs), die eine digitalisierte Erde samt Ozean, Lufthülle, manchmal auch schon Erdoberfläche samt Pflanzenkleid, in denen tatsächlich in einer gewissen räumlichen Auflösung (derzeit horizontal bereits weniger als 100 km, vertikal 20 bis 30 Ozeanschichten, und ebenso viele Atmosphärenschichten) und einer darauf abgestimmten zeitlichen Taktfrequenz (Minuten bis Stunden) das Wetter der gesamten Erde für die kommenden 100 Jahre oder für die vergangenen 1.000 Jahre abläuft. Diese Modellläufe berechnen somit, was das Klimasystem intern mit den äußeren Antrieben so anstellt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit also, welche Energiemengen von den Ozeanen vom Äquator Richtung Pole transportiert werden, wie viel flüssiges Wasser durch Verdunstung in die Atmosphäre gelangt, wie viel einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung von Schneeoberflächen in Sibirien oder der Antarktis ins Weltall reflektiert wird und auch, welche Energiemengen in Form langwelliger (Wärme-) Strahlung durch die Treibhausgase am Entweichen aus der Erdatmosphäre gehindert werden, welche Energiemengen in Erwärmung und welche in Bewegung (Stürme) umgesetzt werden und vieles anderes mehr.

Derlei Simulationsrechnungen sind mit einem gigantischen Rechenaufwand verbunden, dem auch die schnellsten derzeit zur Verfügung stehenden Rechenanlagen nicht gewachsen sind. Und es sind die derzeit schnellsten Rechenanlagen, die in einer Handvoll internationaler Großrechenzentren dazu zur Verfügung stehen, und diese Super-Computer brauchen für einen typischen Klima-Lauf Monate ihrer CPU-Zeit! Man muss daher notwendigerweise Abstriche machen. Diese gehen einerseits in Richtung räumlich-zeitliche Auflösung des Rechengitters, andererseits müssen die bekannten physikalischen Zusammenhänge vereinfacht werden, um sie schnell genug rechnen zu können. Das alles führt zu einer unterschiedlichen Fähigkeit der Klima-Simulationsrechnungen, mit unterschiedlichen Ausformungen des Klimas zurecht zu kommen. Auf einer Skala von gut über mittelmäßig zu schlecht bis gar nicht liefern die modernen AOGCMs bereits brauchbare Ergebnisse für globale bis kontinentale Muster vor allem der Temperatur, und zwar über deren Mittel über längere Zeiträume. Schlechter werden sie, wenn man ins Regionale bis Lokale geht und hier vor allem, wenn der Wasserkreislauf ins Spiel kommt. Hier werden die Fakten zunehmend „weich“. Schwierigkeiten bei der Simulation der Wolkenbildung, besonders bei den kleinräumigen konvektiven Vorgängen, machen Aussagen über Starkregen, Hagel, Gewitter oder Tornados nur sehr bedingt bis gar nicht möglich. Gerade diese extremen Ausformungen des Wetters stehen aber in der Klimadebatte im Vordergrund (Stichwort „das Klima wird immer extremer“).

Zur Modellierung der Klimavergangenheit stehen die rekonstruierten Klimaantriebe zur Verfügung, wie sie für das letzte Jahrtausend in den *Bildern 1 und 2* gezeigt und besprochen worden sind. *Bild 3* zeigte eine Realisierung für die letzten 1.000 Jahre Sommer-Frühherbst-Temperaturen für Europa, und wie diese recht gut den Verlauf einer auf Baumringen beruhenden Temperaturrekonstruktion aus alpinen Hochlagen wiedergeben. Eine rechnerisch-physikalische Simulation des künftigen Klimaverlaufs setzt eine Abschätzung des künftigen Verlaufs der Klimaantriebe voraus. Typischerweise werden dazu AOGCMs zweimal laufen gelassen, einmal ohne Veränderung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen äußeren Antriebe und einmal unter dem Einfluss von erwarteten Konzentrationsänderungen der anthropogenen Treibhausgase, die sich aus Abschätzungen der künftigen politischen, wirtschaftlichen, sozialen und technologischen Entwicklungen ergeben. IPCC hat dazu zahlreiche „Entwicklungsfamilien“ abgeleitet, deren Unterschiede zu-

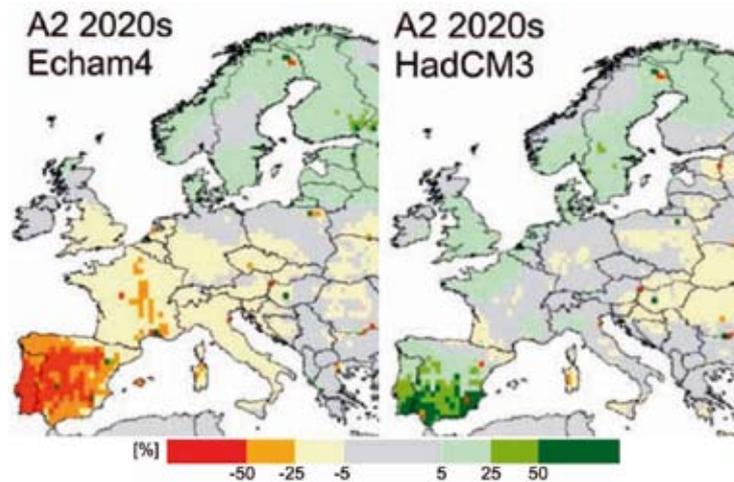
mindest eine ebenso hohe zusätzliche Unsicherheit zu der aus den mathematisch-physikalischen Modellunsicherheiten resultierenden hinzufügt. Das faszinierende daran ist jedoch, dass man auf diese Weise verschiedene Zukunftswelten virtuell durchspielen kann, und so die Möglichkeit besteht, die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf das Erdklima abzuschätzen. Tabelle 2 ist ein Versuch, die drei wesentlichen Szenarien-Familien der Entwicklung der Menschheit im 21. Jahrhundert kurz zusammenzufassen. Als Leitszenario wird von IPCC das mit A1B bezeichnete verwendet, die die mit „business as usual“ oder „hässliche Globalisierung“ charakterisierbare A2-Welt zeigt, welche Erwärmung nach oben hin absteckbar ist. Die „schöne neue Welt“ des geplanten und global umgesetzten Umweltbewusstseins läuft unter B1 und führt zur geringsten Treibhausgasbelastung.

*Tabelle 2: Kurzbeschreibung der drei am häufigsten verwendeten IPCC-Zukunftsszenarien der globalen Entwicklung im 21. Jahrhundert nach Nakicenović und Swart, 2000*

A1-Familie	<p>Schnelles Wirtschaftswachstum in einer mobilen, global stark vernetzten, immer mehr zusammenwachsenden Welt. Einkommensunterschiede zwischen Individuen und zwischen Ländern bzw. Regionen vermindern sich.</p> <p>Höhere Investitionen in Bildung und Forschung. Höhere Lebenserwartung und bessere Gesundheit führen weltweit zu kleineren Familien. Bis 2050 steigt die Erdbevölkerung auf 9 Mrd., dann fällt sie bis zum Jahr 2100 auf 7 Mrd.</p> <p>Neue Technologien werden schnell eingesetzt. Energieeffizienz steigt an. Sehr unterschiedliche Energieprioritäten, im „Marker-Szenario“ A1B wird ein ausbalancierter Mix aus verschiedenen Energiequellen benutzt.</p>
A2-Familie	<p>Wenig globale Vernetzung in einer regional differenzierten, kulturell pluralistischen Welt. Verglichen mit A1 insgesamt weniger Wirtschaftswachstum, anhaltend große Einkommensunterschiede zwischen Individuen bzw. zwischen Ländern und Regionen.</p> <p>Fertilitäts- und Sterblichkeitsraten entwickeln sich weniger stark als in den A1-Welten. Die Erdbevölkerung wächst weiter und erreicht im Jahr 2100 15 Milliarden.</p> <p>Der Energiemix ist ebenfalls differenzierter als in der A1-Welt und orientiert sich hauptsächlich an der regionalen Verfügbarkeit. Große Teile der Wirtschaftsentwicklung müssen in die Nahrungsproduktion investiert werden, dadurch gibt es in den anderen Sektoren weniger Weiterentwicklung als in A1, auch im Energiesektor.</p>
B1-Familie	<p>Das Hauptmerkmal der B1-Entwicklungslinien ist ein hohes Umwelt- und Sozialbewusstsein, das in einem global kohärenten Trend zu nachhaltiger Entwicklung führt.</p> <p>Nach unruhigen bis chaotischen Jahrzehnten setzen sich Gemeinschafts-Werte gegenüber Individualismus durch, dabei spielen gesteuerte Erziehung und starke politische Steuermechanismen eine führende Rolle.</p> <p>Reduzierter Konsum und starke Konzentration auf erneuerbare Energieformen führen zu den bedeutendsten Erfolgen auf dem Sektor der Eindämmung der Treibhausgasemissionen. Die Erdbevölkerung entwickelt sich ähnlich wie in den A1-Szenarios, aber aus anderen Gründen, hauptsächlich wegen der erhöhten Sicherheit durch das soziale Engagement der Gesellschaft.</p>

Dass man bei der Umsetzung der aus den sozio-ökonomisch-politischen Szenarien abgeleiteten Treibhausgasantrieben in AOGCMs noch mit großen Unsicherheiten umgehen können muss, und zwar wie schon erwähnt auch infolge der noch existierenden Unzulänglichkeiten der Klimamodelle auf manchen Gebieten, illustriert *Bild 10*. Es zeigt die überaus unterschiedlichen Ergebnisse von zwei der besten derzeit zur Verfügung stehenden Modelle für die erwarteten Veränderungen des mittleren Jahresabflusses auf der Iberischen Halbinsel für die Zeit um 2020. Die bereits erwähnten Unzulänglichkeiten der Niederschlagsmodellierung führen zu sogar konträren Aussagen

einer Zunahme der Wasserführung der Flüsse um bis zu 50 % im Fall des einen Modells und zu einer Abnahme um bis zu -50 % in der Simulation durch das andere Modell.



*Bild 10: Simulation der Veränderung der Wasserführung der Flüsse Europas für die 2020er-Jahre unter Annahme eines „business as usual“-Treibhausgasverlaufs (IPCC-Szenario A2) in Prozent. Links: Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg  
Rechts Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, UK.  
(IPCC-2007, WG-2 Report, Ausschnitt aus fig.12.1)*

Es gibt zurzeit zwischen 10 und 20 „state of the art“ globale transiente Simulationsrechnungen des Erdklimas der kommenden 100 Jahre. Die räumliche Auflösung konnte in den letzten 10 Jahren von 100 km in Richtung 50 km gedrückt werden. Auf die Details kann hier nicht eingegangen werden, eine ausführliche Beschreibung findet man in den Kapiteln 8 bis 11 des Working Group 1 Reports von IPCC-2007. Die von den AOGCMs bereits erreichte räumliche Auflösung zwischen 100 und 50 km ist für regionale Zwecke bereits brauchbar und wird in IPCC-2007 auch gegenüber den Versuchen, die Auflösung höher zu treiben, empfohlen.

Für lokale Anwendungen muss man die Ergebnisse der globalen Modellrechnungen herunter skalieren (verfeinern), das vor allem dann, wenn die Extremwerte interessieren, die per Definition kleinräumig sind, besonders beim Niederschlag. Die physikalisch elegantere Methode und auch die, die dem Verständnis der Vorgänge dienlicher ist, ist das „dynamische Downscaling“, das in den Rahmen einer größeren, globalen Realisierung ein feinmaschigeres Modell setzt und die vorgegebenen Strukturen der globalen Ergebnisse hinunterrechnet. Derzeit bewegt man sich in Richtung einer Auflösung von wenigen km, allerdings mit noch sehr unterschiedlichen und teils widersprüchlichen Ergebnissen. Die neueste Entwicklung geht in Richtung kompressibler Berechnung, was einen wesentlichen Schritt in Richtung mehr Realitätsnähe bedeutet (CLM-Modelle). Die zurzeit noch eher schwachen und zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse des dynamischen Downscalings, gerade im komplizierten Gelände des Alpenraums, machen die verschiedenen Methoden des „statistischen Downscalings“ interessant, ganz besonders, wenn es in kleine Einzugsgebiete geht. Dabei werden statistische Zusammenhänge gemessener Klimadaten zum Herunterrechnen benutzt.

Vor allem dank der steigenden Computer-Performance ist zu erwarten, dass in Zukunft derjenige Schritt auch für die Klimamodellierung möglich sein wird, der vor etwa 10 Jahren die Wetterprognose grundlegend verbessert hat, und der eine Qualitäts- und damit Vertrauensabschätzung ermöglicht: die Ensemble-Prognose (eine große Anzahl von Parallelrealisierungen der Zukunft). Derzeit ist das Hauptproblem die nur ungenügende Verifizierung der Modellergebnisse über die nicht ganz logische Annahme, dass eine gute Realisierung der Gegenwart (im Vergleich zu Messdaten) auch für die der Klimazukunft zutreffend ist. Was der aktuelle Forschungsstand für das Klima des 21. Jahrhunderts erwartet, sei nun zum Schluss im regionalen Maßstab (Mitteleuropa und hier speziell die für Österreich interessanten Fakten) stichwortartig skizziert:

## 6 Zusammenfassende Darstellung für Mitteleuropa

Im regionalen Maßstab Mitteleuropas macht sich bereits bei allen Klimaelementen der bekannte Zusammenhang des Anstiegs der hochfrequenten Klimavariabilität gegenüber den langfristigen Klimatrends bemerkbar. Das bewirkt, dass die folgenden langfristigen Aussichten noch längere Zeit durch das kurzfristige „Rauschen“ der Schwankungen von Jahr zu Jahr „maskiert“ sein werden.

### Besser belegte Aussichten bis 2100:

- Anhaltender Temperaturanstieg um 3 °C (A1B Szenario), stärker im Sommer im mediterranen Bereich, im Winter im nordöstlichen Bereich der Region. Das ist mehr, als der in den letzten 150 Jahren beobachtete Temperaturanstieg in der Region um rund 2 °C. Szenarienvariabilität etwa  $\pm 1$  °C (B1 +2°, A1 +4° und mehr).
- Zunahme aller Arten von positiven Temperaturextremwerten (heiße Tage, absolute Maxima etc.) bei etwa analoger Abnahme der negativen Temperaturextremwerte (Frost, absolute Minima etc.)
- Kaum Änderungen der Wind- und Sturmtätigkeit (das gilt nur für Mitteleuropa, in anderen Teilen Europas herrscht Uneinigkeit unter den Modellen). Die Erwartung der Nichtzunahme der Sturmtätigkeit in der Zukunft deckt sich mit dem Datenbefund der vergangenen 130 Jahre (*Matulla et al., 2007*)
- Anhaltender Rückgang des Anteils der festen Komponente des Niederschlags
- Bodenfeuchte zunehmend beeinflusst von der Temperatur (Verdunstung) und weniger vom Niederschlagsangebot
- Weiterer Gletscherrückgang der aktiven Alpengletscherfläche auf 40 bis 50 % (von 1980) bis 2050, auf 15–20 % bis 2100

### Schlechter belegte Aussichten bis 2100:

- Tendenziell eher Niederschlagszunahme nördlich der Alpen, Abnahme südlich der Alpen, die Grenze zwischen Zu- und Abnahme weiter im Süden im Winter, weiter im Norden im Sommer. Die Größenordnung der Änderungen liegt in Mitteleuropa im Bereich –5 bis +10 % im Winter, bei –5 bis –20 % im Sommer. Das ist etwas mehr als das, was wir aus den gemessenen regionalen Langfristtrends der letzten 200 Jahre kennen, die 10 %/100 Jahre nicht übertroffen haben.
- Zunahme der sommerlichen stabilen Schönwetterlagen durch weitere Nordostwärts-Verlagerung des Subtropenhochs (laut MPI-Modellen, Hadley-Modelle zeigen das nicht).

### **Kaum belegte Aussichten:**

- Änderung der konvektiven Niederschläge, Gewitter, Hagel, Tornados, Muren, also der meisten kleinräumigen Extremausformungen des Klimas, die schlecht bis zum Teil gar nicht in der Modellphysik der großräumigen Modelle enthalten sind, und beim Downscaling Schwierigkeiten machen. Mehr dazu in *IPCC-2007, chapt. 8*
- Vorsicht gerade bei den Extremwerten vor interessengesteuerten Meinungen (exemplarisch dargestellt in *Pielke jr. et al., 2008*).

## **6.1 Österreich**

### **Besser belegte Aussichten bis 2100:**

- Anhaltender Temperaturanstieg um 3–3.5 °C (A1B-Szenario), regional im Winter im Westen 3°, im Osten 3.5°, im Sommer im Norden 3.3°, im Süden 3.8° Szenarienvariabilität etwa  $\pm 1$  °C (B1 +2°, A1 +4° und mehr).
- Gletscher: stärkerer Rückgang als im Alpendurchschnitt, bis 2100 nur noch rund 10 % der aktiven Gletscherflächen von 1980
- Alles andere wie für Mitteleuropa beschrieben.

### **Schlechter belegte Aussichten:**

- Tendenziell dieselbe subregionale Differenzierung beim Niederschlag wie oben für Mitteleuropa angegeben, nur mit engeren Bereichen der Zahlenwerte: +5 bis +10 % im Winter, –7 bis –12 % im Sommer. Diese saisonale Aufgliederung lässt eine Dämpfung des in Österreich üblichen Jahresgangs des Niederschlags um 10 bis 20 % erwarten (geringeres Sommermaximum, höheres Winterminimum). Die Messbefunde der Vergangenheit lassen einen relativ scharfen Übergang von der Nord- zur Südcharakteristik am Alpenhauptkamm erwarten. Im Wesentlichen wird eine Fortsetzung der aus den letzten 150 Jahren gegebenen Niederschlagstrendmuster erwartet (*Auer et al., 2007*).

### **Kaum belegte Aussichten:**

- Gleiche Aussage wie für Mitteleuropa.
- Im Einzelfall können, sozusagen in „Handarbeit“, vertrauenswürdige lokale Abschätzungen unternommen werden, wie zum Beispiel eine (flächendeckend noch nicht vorhandene) indirekte Quantifizierung der künftigen Entwicklung des Prozentanteils des Schnees am Gesamtniederschlag für die Hohen Tauern: (interne Unterlage des ZAMG-Projekts „A Tale of Two Valleys“)
- Abnahme des Schneeanteils vom Mittel des 20. Jahrhunderts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (A1B):
  - In 1.000 m Seehöhe: Im Winter von 80 % auf 58 %, Frühling von 38 % auf 16 %, im Sommer gleich bleibend bei 0 %, im Herbst von 29 % auf 6 %
  - In 2.000 m Seehöhe: Im Winter von 90 % auf 70 %, im Frühling von 86 % auf 66 %, im Sommer von 17 % auf 5 %, im Herbst von 59 % auf 18 %
  - In 3.000 m Seehöhe: Im Winter von 99 % auf 97 %, im Frühling von 99 % auf 97 %, im Sommer von 64 % auf 34 %, im Herbst von 99 % auf 94 %

## Danksagung

Der hier unternommene Versuch einer zusammenfassenden Darstellung des Klimawandels ist wegen der geforderten Kürze notwendigerweise rudimentär. Die Überblicksarbeit war nur möglich durch zahlreiche Detailarbeiten, deren einfache Auflistung ebenfalls den Rahmen sprengen würde. Es sei deshalb nur auf einige wenige Grundlagen verwiesen:

Für die Klimazukunft wurde in erster Linie auf die breit angelegten Zusammenfassungen in den IPCC-Reports 2007, insbesondere WG-1 und WG-2 verwiesen.

Für die anderen Bereiche konnte auf Grundlagenarbeiten einer Reihe abgeschlossener und noch laufender Forschungsprojekte der Klimaabteilung der ZAMG zurückgegriffen werden: CLIVALP (FWF, P15076-N06), ALP-IMP (EU-FP5, EVK-CT-2002-00148), FORALPS (Interreg-Alpine-IIIb Alpine Space, I/III/3.1/21), A Tale of two Valleys (BMWf-Programm proVision, 133-111), HISTALP-2007 (ZAMG-BMWf 4426/07-9), Ö-Schnee-200 (ZAMG-BMWf 4426/07-21), COST ES Projekt 0601 HOME, HOMDAY (ZAMG-BMWf 4426/07-23).

Für die Förderung sei an dieser Stelle nochmals gedankt.

## 7 Literatur

- Auer I, Jurkovic A, Orlik A, Böhm R, Korus E, Sulis A, Marchetti A, Dolinar M, Nadbath M, Vertacnik G, Vicar Z, Pavcic B, Geier G, Rossi G, Leichtfried A, Schellander H, Gabl K, Zardi D, 2008a. High quality climate data for the assessment of Alpine climate, its variability and change on regional scale – Collection and analysis of historical climatological data and metadata. *Technical Report of WP5*, Interreg-IIIb- Alpine Space Project Foralps, I/III/3.1/21, 67 pages plus 7 annexes
- Auer I et al., 2008b. Endbericht des BMWf- proVision Projekts „A Tale of two Valleys. In Arbeit
- 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
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T. 2006. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *Int. J. Climatol.* **25** 139-166
- Bard E, Raisbeck G, Yiou F, Jouzel J, 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *TELLUS B* **52**: 985-992
- Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C, Weyss G, 2007. Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. *ZAMG-Morava, Wien*, 111 Seiten
- Böhm R, 2008. Heiße Luft, Reizwort Klimawandel – Fakten-Ängste-Geschäfte. VABENE, Wien-Klosterneuburg, 261 Seiten
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J, 2006. Summer temperature variations in the European Alps: AD 755-2004. *Journal of Climate* **19**: 5606-5623
- Crowley TJ, 2000. Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science* **289**: 270-277

## Harte und weiche Fakten zum Klimawandel – ein Überblick

- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the 4<sup>th</sup> Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 996 Seiten
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.. Working Group II Contribution to the 4<sup>th</sup> Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 976 Seiten
- Jones PD, New M, Parker DE, Martin S and Rigor IG, 1999: Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Reviews of Geophysics* **37**: 173-199
- Lean J, 2000. Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters* **27**: 2425-2428
- Matulla C, Schöner W, Alexandersson H, von Storch H, Wang XL, 2007. European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics* **29**: DOI 10.1007/s00382-007-0333-y
- Nakicenović N and Swart (eds.), 2000. Special report on emission scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, UK, 599 Seiten
- Pielke RA Jr, Gratz J, Landsea CW, Collins D, Saunders MA, Musulin R, 2008. Normalized Hurricane Damage in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review* **9/1**: 29-42. DOI: 10.1061/ASCE1527-6988(2008)9:1(29)
- Robertson A, Overpeck J, Rind D, Mosley-Thompson, Zielinski G, Lean J, Koh D, Penner J, Tegen I, Healy R, 2001. Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years. *Journal of Geophysical Research – Atmosphere* **106**: D14 p14783 (2000JD900469)
- Schöner W., 1995. Schadstoffdepositionen in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern). *Dissertation, Universität Salzburg*, 130 Seiten plus Karten- und Tabellenanhänge
- Zemp M, 2006. Glaciers and Climate Change. Spatio-temporal Analysis of Glacier Fluctuations in the European Alps after 1850. *Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie und Geomorphodynamik* **49**: 67 Seiten plus 5 Publikationen und Programme im Anhang. Universität Zürich
- Zorita E, von Storch H, Gonzalez-Rouco FJ, Cubasch U, Luterbacher J, Legutke S, Fischer-Bruns I, Schlese U, 2004. Climate evolution in the last five centuries simulated by an atmosphere-ocean model: global temperatures, the North Atlantic Oscillation and the Late Maunder Minimum. *Meteorologische Zeitschrift* **13**: 271–289

### **Anschrift des Autors:**

Dr. Reinhard Böhm  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38, 1190 Wien  
Tel. +43-1-36026-2203  
E-Mail: reinhard.boehm@zamg.ac.at

# Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich

*Andreas Gobiet und Heimo Trubetz*

## 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, aber 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 CO<sub>2</sub>-Konzentration nahm in diesem Zeitraum von etwa 280 auf 379 ppm (2005) 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 in der Lage, die wichtigsten physikalischen 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, regionale Klimamodelle und Downscaling

### 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 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 200 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 Klimamodelle integriert. Dazu gehören beispielsweise turbulente Prozesse in der atmosphärischen Grenzschicht, konvektive Niederschläge („Sommergewitter“) und Strahlungstransfer.

Die Funktionsweise von GCMs ist der von Wettermodellen, welche zur Prognose des Wetters über wenige Tage eingesetzt werden, sehr ähnlich. Im Unterschied zu Wettermodellen berechnen Klimamodelle aber den Zustand des Klimasystems über viele Jahrzehnte, was zu wichtigen Einschränkungen bei der Interpretation ihrer Ergebnisse führt. Es ist bekannt, dass Wettervorhersagen nur für wenige Tage sinnvoll sind und dass sich Wettermodelle nach dieser teilweise prognostizierbaren Zeitspanne schnell vom tatsächlichen Zustand der Atmosphäre entfernen. Die Ursache dieses Verhaltens sind chaotische Komponenten des Wetter- und Klimasystems, welche nach kurzer Zeit über die deterministischen Anteile überhand nehmen. Für Klimamodelle folgt daraus, dass das berechnete Wetter an einem bestimmten Tag weit in der Zukunft keineswegs das tatsächliche noch unbekanntes Wetter dieses Tages beschreibt. Wetterprognosen für das Ende des Jahrhunderts können selbst die besten Klimamodelle nicht erstellen. Die Aussagekraft von Klimamodellen beschränkt sich also auf die auf der Zeitskala von Jahrzehnten nicht-chaotischen Anteile des Klimasystems. Sie beschreiben statistische Kenngrößen des Wetters, die sich auf mehrere Jahrzehnte beziehen, wie beispielsweise mittlere Temperaturen oder Niederschlagssummen einer bestimmten Jahreszeit in den letzten drei Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts und die typische Variabilität dieser Klimaparameter. Abgesehen von dieser prinzipiellen Einschränkung können Klimamodelle auch in der Beschreibung der statistischen Klimaparameter fehlerhaft sein und jede Klimasimulation ist mit Unsicherheiten behaftet. Die Erforschung und Quantifizierung dieser Unsicherheiten (siehe dazu auch Abschnitt 3) ist heute ein wichtiges Forschungsthema und ermöglicht es einzuschätzen, wie viel Vertrauen wir zu Klimaszenarien haben sollen – ein wichtiges Thema, insbesondere wenn es um Entscheidungen über (kurzfristig betrachtet) 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 teilwei-

se 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 mit Hilfe von dynamischen und/oder empirisch-statistischen Methoden zu verfeinern.

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 Vorhersagen angewendet, da die Fähigkeit der regionalen Modelle, über längere Zeiträume sinnvolle Ergebnisse zu liefern, angezweifelt wurde. Ende der 1980er-Jahre wurden die ersten RCMs entwickelt. Pionierarbeit auf diesem Gebiet leisteten *Dickinson et al.* [1989] und *Giorgi* [1990], als die US-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. 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 höherer Auflösung sind zwar technisch möglich und mit „nicht-hydrostatischen“ Klimamodellen auch sinnvoll durchführbar, aber in ihrer Qualität derzeit noch nicht gut untersucht. Diesbezüglich ist eine weitere Entwicklung der Modelle nötig und auch 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.

Die Methoden der empirisch-statistischen Regionalisierung beruhen auf der Annahme, dass regionale und lokale Klimaeffekte vom großskaligen Zustand der Atmosphäre bestimmt sind. Mithilfe verschiedenster statistischer Modelle werden großskalige atmosphärische Felder aus GCMs, welche den Zustand der Atmosphäre in der Vergangenheit beschreiben („Prädiktoren“), mit lo-

kalen Klimaparametern, die aus Messungen gewonnen werden („Prädiktanden“), in Verbindung gebracht. Aufgrund dieser statistisch etablierten Zusammenhänge kann in Folge aus mit GCMs erzeugten großskaligen Zukunftsszenarien der Prädiktand, d. h. eine simulierte zukünftige Messung abgeleitet werden, welche die lokalen Klimabedingungen repräsentiert. 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 neuronale Netze, multiple lineare Regression, kanonische Korrelation 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 angepasst werden und es werden Daten erzeugt (simulierte Messungen), die für Nutzer aus der Klimafolgenforschung oft 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. Es ist aufgrund der hohen Anpassbarkeit und der Vielfalt von statistischen Modellen auch nicht möglich, allgemeine Aussagen über die Qualität statistischer Downscaling-Methoden zu treffen. Qualitätsanalysen müssen daher für jede Anwendung einzeln durchgeführt werden. Heutzutage werden die empirisch-statistischen Methoden vermehrt dazu eingesetzt, um Ergebnisse regionaler Klimamodelle nachzubehandeln. 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 ist das EU-Projekt PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects, <http://prudence.dmi.dk>), das sich zum Ziel gesetzt hat, eine Reihe hoch aufgelöster Klimaszenarien für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) für Europa zu erzeugen, ihre Zuverlässigkeit zu analysieren und ihre Anwendbarkeit auf Impactstudien zu demonstrieren. Fortgesetzt wird diese Arbeit derzeit im EU-Projekt ENSEMBLES ([www.ensembles-eu.org](http://www.ensembles-eu.org)), das darauf abzielt, durch Ensembles von globalen und regionalen Klimasimulationen die Unsicherheiten bzw. die Verlässlichkeit regionaler Klimaszenarien zu quantifizieren. In den USA wird derzeit ein ähnliches Projekt durchgeführt (NARCCAP, [www.narccap.ucar.edu](http://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](http://www.clavier-eu.org)) und CECILIA ([www.cecilia-eu.org](http://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](http://www.circeproject.eu)) widmet sich ähnlichen Aufgaben in der Mittelmeerregion.

In Österreich wurden die Möglichkeiten der regionalen Klimamodellierung und ihrer Anwendbarkeit auf den Alpenraum seit Mitte 2003 im Projekt reclip:more (Research for Climate Protection: Model Run Evaluation, <http://systemsresearch.arcs.ac.at/projects/climate>) untersucht [Loibl et al., 2007]. Hier wurde 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:more wurden 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 – ein Klimaszenario für die 2040er-Jahre für den Alpenraum – sind mittlerweile verfügbar und werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Ab Herbst 2008 wird, aufbauend auf den Erfahrungen aus reclip:more, im Rahmen des durch den neuen Klima- und Energiefonds geförderten Projekts reclip:century ein Satz von durchgehenden Klimaszenarien von 1951–2050 für den Alpenraum erstellt, wobei insbesondere auch die Abschätzung der Unsicherheiten dieser Szenarien vorangetrieben wird. Diese Szenarien sollen die Grundlage für die weiterfolgende Klimafolgenforschung in Österreich bilden.

### 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  $\pm 1$  °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 Niederschlagsszenarien 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 reclip:more

Da die Alpen eine Klimascheide darstellen, die 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 Niederschlagsszenarien, welche in der Lage sind kleine Subregionen des Alpenraums zu differenzieren, bedürfen einer feineren räumliche Auflösung als die PRUDENCE-Simulationen (Gitterpunktabstand 50 km, das entspricht einer effektiven Auflösung von mindestens 150 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 (Gitterpunktabstand 10 km). Die zusammengefassten Ergebnisse des Projekts können im Bericht von *Loibl et al.* [2007] und einige detaillierter 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 *Bild 1*) 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 pro Jahrzehnt) im Herbst. Diese Ergebnisse stimmen qualitativ und quantitativ gut mit den zuvor beschriebenen PRUDENCE-Ergebnissen überein. 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  $\pm 0.25$  °C (je nach Saison etwas unterschiedlich). *Déqué et al.* [2007] haben 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 höchstens  $\pm 1.25$  °C.

Die zu erwartenden Niederschlagsänderungen im Alpenraum (siehe *Bild 2*) 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). Da sich diese Werte auf die Mitte des Jahrhunderts beziehen, sind sie nicht direkt mit den PRUDENCE-Ergebnissen vergleichbar, weisen aber ähnliche Grundcharakteristiken auf: zunehmende Niederschläge im Winter und abnehmende Niederschlä-

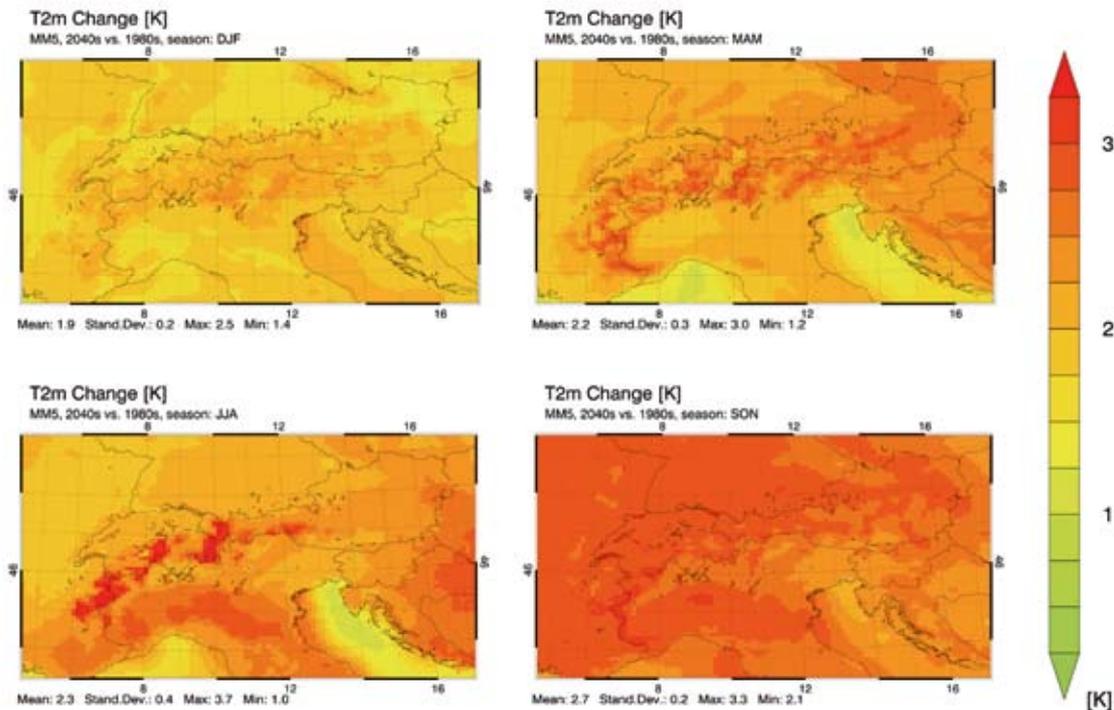


Bild 1: Temperaturszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November)

ge im Sommer südlich der Alpen. Im Unterschied zu PRUDENCE zeigen die reclip:more-Ergebnisse aber auch im Herbst deutliche Niederschlagsrückgänge südlich der Alpen. Die Größenordnung der Niederschlagsänderung ist unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeiträume als konsistent zu bezeichnen. Die Spannweite der drei reclip:more-Simulationen beträgt je nach Saison maximal  $\pm 5\%$ . Laut Déqué et al. [2007] trägt das regionale Klimamodell im Alpenraum 30–50 % zur Gesamtunsicherheit bei, woraus sich eine Gesamtunsicherheit von  $\pm 10\%$  bis  $\pm 15\%$  ergibt. Diese Abschätzung zeigt, dass die Klimaänderungssignale des Niederschlags im Alpenraum nur teilweise als signifikant zu betrachten sind.

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. Bild 3 zeigt die Niederschlagsänderungen in klimatologisch motivierten Subregionen. Je nach Saison und Subregion ergeben sich Änderungen von bis zu 30 %. Die Unsicherheiten derart kleinregionaler Klimaänderungssignale ist derzeit noch schwer einzuschätzen, allerdings zeigen erste Untersuchungen, dass die Unsicherheiten bei Verfeinerung der Skala nicht stark zunehmen. Bestätigen sich diese Ergebnisse, sind viele subregionale Niederschlagsszenarien als hoch signifikant zu betrachten.

## Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich

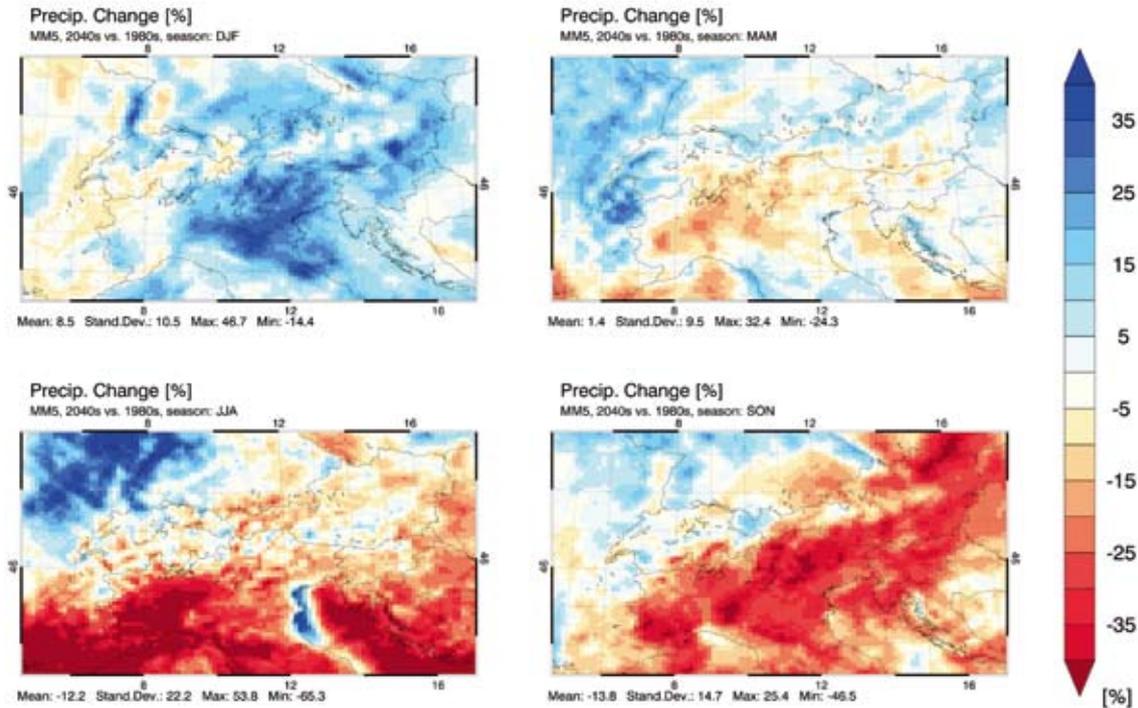


Bild 2: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990). Oben links: Winter (Dezember, Jänner, Februar), oben rechts: Frühling (März, April, Mai), unten links: Sommer (Juni, Juli, August), unten rechts: Herbst (September, Oktober, November)

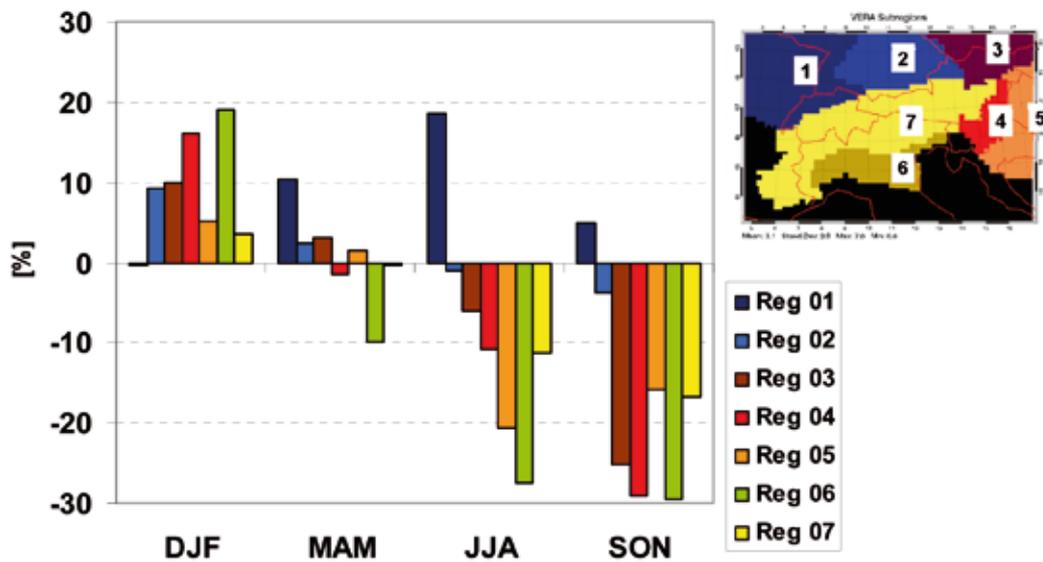


Bild 3: Niederschlagsszenario für 2041–2050 (Vergleichsperiode 1981–1990) in Subregionen des Alpenraums. Die Ergebnisse sind in % angegeben

### 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-Projekts 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 Nieder-

schlagsintensität 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.

#### 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 0.3 bis 0.45 °C pro Jahrzehnt zu rechnen, wobei die stärkeren Zunahmen im Sommer und im Herbst zu erwarten sind. 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 deutliche Trennlinie des Klimawandels dar, was in diesem Gebiet regional detaillierte Untersuchungen nötig macht. In Subregionen rund um die Alpen werden Niederschlagsänderungen von +20 % im Winter (vornehmlich, aber nicht ausschließlich im Nordwesten) und –30 % im Sommer und Herbst (vornehmlich im Süden und Osten der Alpen) erwartet. Zusätzlich gibt es Anzeichen für vermehrtes Auftreten von Hitzewellen und starken Niederschlägen, wobei aber die Verlässlichkeit dieser Aussagen und ihre kleinregionalen Charakteristika noch nicht gut untersucht sind.

Derzeit stehen zur Analyse des zukünftigen Klimawandels in Europa hauptsächlich die Ergebnisse des EU-Projekts PRUDENCE zur Verfügung. Neuere Ergebnisse, insbesondere eine erweiterte Abschätzung der Unsicherheiten, sind ab 2009 aus dem EU-Projekt ENSEMBLES zu erwarten. 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 (reclip:more-Ergebnisse stehen auf Anfrage für die Klimafolgenforschung zur Verfügung, siehe auch Gobiet *et al.* [2008] für eine erste Anwendung in Bezug auf Grundwasserneubildung in der Steiermark). Im Herbst 2008 startet das Folgeprojekt reclip:century, welches durchgehende Klimaszenarien des Alpenraums in hoher räumlicher Auflösung von 1951–2050 erarbeiten und besonderes Augenmerk auf die Bandbreiten der Unsicherheit legen wird. Diese Simulationen werden sich auch für Extremwertanalysen eignen und sollen die Basis für die weiterführende Klimafolgenforschung in Österreich werden.

#### 5 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.
- 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.
- Schmidli, J., C. Frei, 2005, Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20<sup>th</sup> 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.
- Von Storch, H., F. W. Zwiers, 2003, *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 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 der Autoren:**

Dr. Andreas Gobiet

Mag. Heimo Truhetz

Universität Graz

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel

Leechgasse 25, 8010 Graz

Tel. +43-316-380-8448 bzw. -8442

E-Mail: andreas.gobiet@uni-graz.at bzw. heimo.truhetz@uni-graz.at

# Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte

*Ernst Rudel*

## 1 Einleitung

Durch zahlreiche Kommentare und Medienberichte haben Fragen nach Variationen und Trends bezüglich extremer Klima-Ereignisse auch in Österreich sehr stark an Bedeutung gewonnen. Besonders die Tatsache, dass es zu immer teurer werdenden ökonomischen Schäden im Zuge extremer Wetterereignisse kommt, ist für viele Menschen Anlass, auch eine erhöhte Frequenz derartiger „Wetterkapriolen“ anzunehmen.

Medienberichte (z. B. im *Spiegel*) oder „Expertenaussagen“ zeichnen in der Öffentlichkeit ein scheinbar eindeutiges Bild einer stetigen Zunahme der Extremwerte:

- „Ungewöhnlich starke Niederschläge kommen in Deutschland beispielsweise heute doppelt so häufig vor wie noch vor 100 Jahren. Das kann man mit Messreihen in den Alpen exakt nachweisen.“ (*Der Spiegel*, 2005)
- „Heute gibt es in der Wissenschaft keine Zweifel mehr daran, dass das Klima immer extremer wird!“ (Erwin Mayer, Klimaexperte von Greenpeace)
- „Der Hurrikan Katrina mit der Zerstörung von New Orleans ist der endgültige Nachweis der Katastrophen, die uns in Zukunft durch den Klimawandel drohen“ (Klaus Töpfer, UNEP, ehemaliger deutscher Umweltminister).

Angenommen, die Menschheit und ihre Aktivitäten wären wirklich überwiegend mittelbar und damit endogen an einer Klimaveränderung und an der Zunahme der Extreme beteiligt, bestünde rein theoretisch die Chance, durch aktives Bemühen diesen Einfluss zu vermindern oder gänzlich abzustellen und die von uns verursachte erhöhte Gefahr wieder einzudämmen.

Der Nachweis dieser Frequenzänderung gestaltet sich aber äußerst schwierig, da weltweit ein Mangel an qualitativ hochwertigen Zeitreihen meteorologischer Daten von Einzelereignissen vorliegt. Nur wenige Staaten haben tägliche Daten in digitaler Form, die mehr als 50 Jahre zurückreichen und deren Qualität durch geeignete statistische Bearbeitungen einigermaßen als gesichert angesehen werden kann. Arbeiten und Analysen zeigen oftmals kurze Zeitreihen (< 50 Jahre), über die eine Gerade gelegt wird, die ansteigende Werte zeigt. Das wird häufig schon als eindeutiger Nachweis der Zunahme von Wetterextremen angesehen. Aussagen über die Klimavariabilität und die Extreme des Klimas setzen aber eine genaue Kenntnis und ein gutes Verständnis des Klimas der Vergangenheit voraus. Dieses Wissen bildet erst die notwendige Basis zum Verstehen der künftigen Klimaänderungen. Erst wenn sich diese signifikant aus der Bandbreite der vergangenen Klimavariabilität entfernt, wird sie bedenklich.

Die historische Entwicklung der Extremereignisse ist nicht so leicht zu erkennen wie die der mittleren Zustände. Um die statistische Signifikanz von Änderungen in der Häufigkeit von seltenen Ereignissen nachweisen zu können, sind viel längere Datenreihen erforderlich, als für häufige Ereignisse. Zudem tritt bei manchen Ereignissen auch das Problem der zuverlässigen Erfassung auf:

So werden z. B. Stürme, Hochwässer, Lawinen etc. in der Regel nur dann verzeichnet, wenn sie Schaden anrichten, oder zumindest in Bereichen niedergehen, wo sie potenziell Schaden hätten anrichten können. Extreme Ereignisse in unbesiedelten Gebieten wurden und werden in der Regel nicht oder selten erfasst. Die Statistiken sind daher unvollständig und enthalten viele Fehlerquellen.

## 2 Definitionen

Ein Extremereignis im meteorologischen Sinn ist ein Ereignis, das stark von entsprechenden Durchschnittswerten oder Trends abweicht und außerordentlich ist. Meist ist die Wiederkehrperiode deutlich länger als zehn Jahre. Extremereignisse sind seltene Ereignisse, die stark von einem statistischen Mittelwert abweichen. Sie sind nicht unbedingt mit Schäden verbunden. Eine Naturkatastrophe ist hingegen ein Schadenereignis, dessen Folgen von den Betroffenen nicht alleine bewältigt werden können. Sie wird nicht immer durch Extremereignisse verursacht. Naturgefahren sind natürliche Prozesse und Zustände, die Gesellschaft und Umwelt bedrohen. Als extrem werden in diesem Bericht Ereignisse bezeichnet, die markant von einem Durchschnittswert oder Trend abweichen und deshalb außerordentlich sind. Extremereignisse werden demnach durch statistische Kriterien definiert und oft haben Extremereignisse negative Konsequenzen für den Menschen und die Umwelt.

## 3 Klimamodelle und ihre Bedeutung für Extremereignisse

Globale Klimamodelle ermöglichen es, die relative Bedeutung der einzelnen Einflussgrößen auf das Klima zu ermitteln. Dabei konnten sehr klar folgende Fakten nachgewiesen werden:

- Den größten Beitrag zur beobachteten Erwärmung liefert die gestiegene Konzentration der Treibhausgase, wobei CO<sub>2</sub> etwa die Hälfte beiträgt und Methan ein Viertel.
- Durch Flugverkehr verursachte Kondensstreifen und dadurch ausgelöste Cirrenbildung spielen keine große Rolle – die wesentliche Auswirkung des Flugverkehrs liegt in der Erhöhung der Treibhausgaskonzentration.
- Der Beitrag der Schwankungen der Sonnenaktivität liegt deutlich unter der Wirkung der Treibhausgase.
- Einschränkung: Das wissenschaftlich gesicherte Wissen über verschiedene, das Klima steuernde Größen ist vergleichsweise gering. Überraschungen sind daher im Klimasystem nach wie vor nicht ausgeschlossen.

In Klimamodellen finden sich aber keine Hinweise auf Verstärkung der meteorologischen Extreme, d. h. Klimamodelle sagen nicht aus, dass es möglicherweise stärkere Niederschläge und damit auch Hochwässer geben wird und Klimamodelle zeigen auch nicht, dass mitunter höhere Windgeschwindigkeiten und Stürme zur Regel werden könnten.

Klimamodelle prognostizieren aber höhere mittlere Temperaturen. Dabei nimmt auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass an mehr Tagen extreme tropische Temperaturen (größer 30 °C) auftreten.

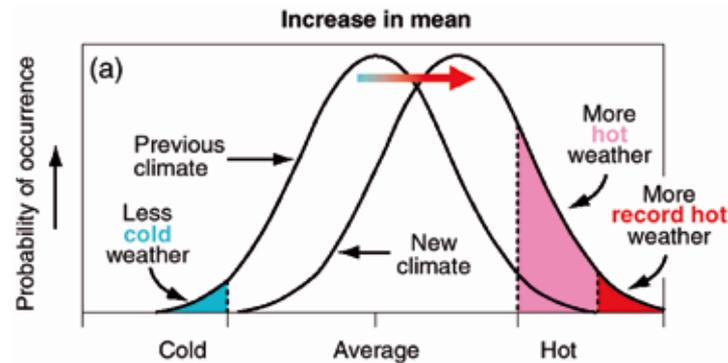


Bild 1: Verschiebung der Wahrscheinlichkeiten heißen Wetters bei einer Zunahme der mittleren Temperatur (nach IPCC 2007)

Dies kann man auch mit vielen Messreihen nachweisen:

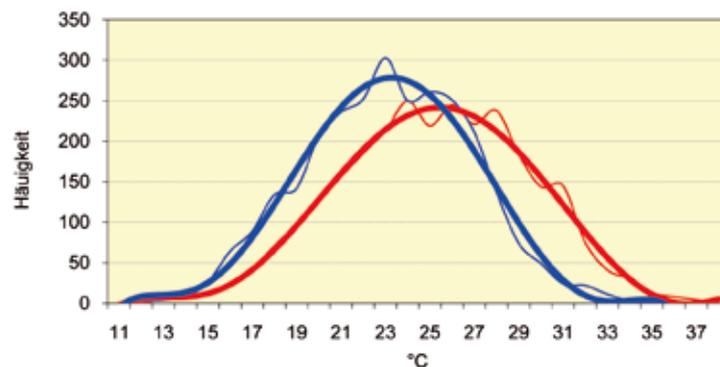


Bild 2: Verteilung der täglichen Maximaltemperatur in Wien während der Sommermonate 1901–1930 (blau) und 1971–2000 (rot) (Quelle: Datenbank der ZAMG)

Dies gilt jedoch nur für die Temperatur, denn andere meteorologische Elemente wie z. B. Niederschlag oder Windspitzen folgen keiner „Normalverteilung“ und man kann in den Messreihen zwar in den Mittelwerten eine Verschiebung erkennen, nicht aber bei den Extremen in den „Seitenschwänzen“

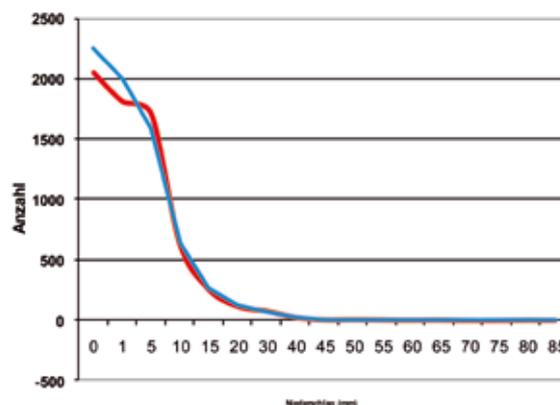
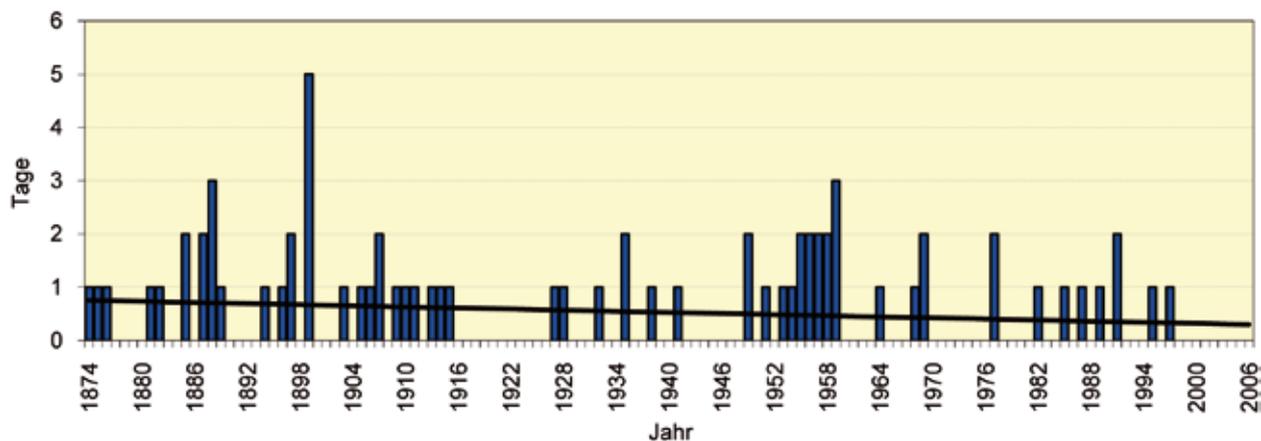


Bild 3: Verteilung der täglichen Niederschlagswerte in Wien in der Periode 1948–1977 (blau) und 1978–2007 (rot) (Quelle: Datenbank der ZAMG)

#### 4 Datenreihen

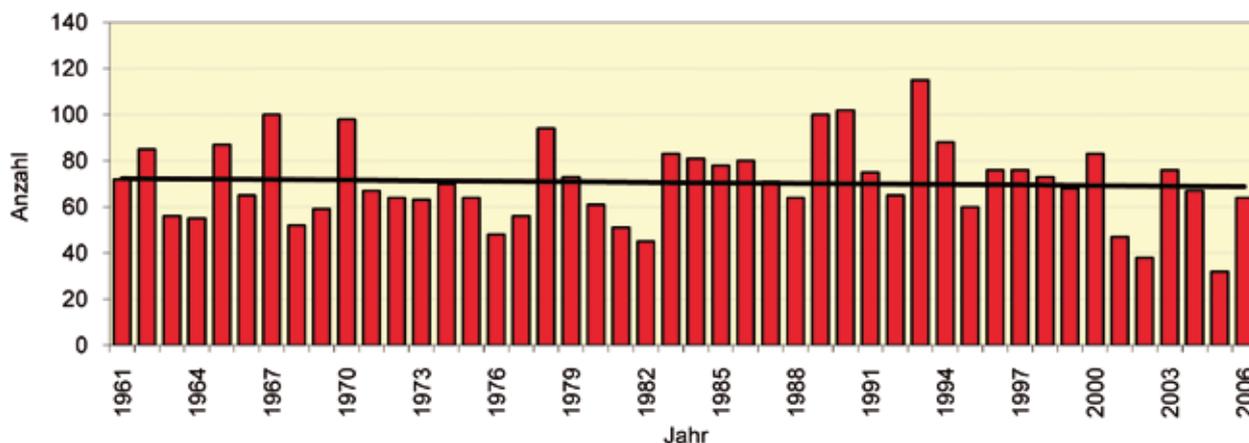
Es gibt im Alpenraum die ältesten und verlässlichsten Messreihen, die qualitativ viel hochwertiger sind als in den meisten übrigen Weltgegenden. Die ältesten österreichischen Messreihen stammen aus dem Stift Kremsmünster. Sie reichen bis ins Jahr 1768 zurück. Seit 1874 wurden dort auch Aufzeichnungen über Tage mit extremen Niederschlagsmengen geführt. Aber entgegen der allgemeinen Erwartung zeigt in den letzten 130 Jahren in Kremsmünster ein abnehmender Trend bei den Tagen mit mehr als 50 Millimeter Niederschlag (siehe *Bild 4*).



*Bild 4: Zahl der Tage mit mehr als 50 mm Niederschlag in Kremsmünster in der Periode 1874–2006 (Quelle: Datenbank der ZAMG)*

Ein ähnliches Bild zeigen die Aufzeichnungen über Starkniederschläge in Wien: Zwischen 1903 und 2001 hat die Zahl der Tage mit mehr als 30 Millimeter Niederschlag in Wien deutlich abgenommen. Allerdings: Nimmt man nur die vergangenen 40 Jahre, so zeigt sich in der gleichen Kategorie ein gegensätzlicher Trend.

Man könnte nun die Reihe an Beispielen beliebig fortsetzen. Selbstverständlich auch mit anderen meteorologischen Datenreihen wie extremen Stürmen und Hurrikans, Gewitter, Hagel etc.



*Bild 5: Zahl der Hagelfälle in Österreich. Summe aus Meldungen von 44 Stationen (Quelle: Datenbank der ZAMG)*

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hagel in Österreich ist regional sehr verschieden. Vor allem die südöstliche Steiermark und das Donautal gelten als hagelgefährdet. Eine Langzeituntersuchung hinsichtlich der Eintrittshäufigkeit der Intensität von Hagelunwettern liegt für Österreich nicht vor.

Aus der Slowakei gibt es eine Publikation: R. Drinka, I. Bašták Ď., M. Gera: *Climate Changes and Their Impact on the Statistical Structure of Atmosphere Stability Diagnostic Parameters Needed FOR Downscaling*

Darin nimmt, unter der Annahme eines A1B-Szenarios, die Wahrscheinlichkeit einer Labilisierung der Schichtung der Atmosphäre ab und damit auch die Eintrittswahrscheinlichkeit von Gewittern und Hagel. Die Resultate sind gut auf Österreich zu übertragen.

Weltweit gibt es kaum von der Wissenschaft anerkannte Messreihen, die direkt gemessene Aussagen über die Veränderungen dieses Klimatelements zulassen. Denn meistens sind die Messreihen viel zu kurz, und durch den Wechsel an Messinstrumenten, noch dazu an nicht vergleichbaren Orten (Urbanisierung) zudem noch inhomogen. Die in den Medien kolportierten Aussagen wie „stärkster je gemessener Sturm“ sind daher vor diesem Hintergrund kaum verwunderlich. Frühere „stürmische Zeiten“ sind in den Klimaarchiven entweder nicht vorhanden oder mit modernen Messreihen schlicht nicht vergleichbar.

Man kann also, je nachdem welche Botschaft man vermitteln möchte, Trendanalysen populär darstellen und Schlussfolgerungen aufzeigen. Aber selbst diese „Kurzzeitanalysen“ zeigen weltweit keinen einheitlichen Trend. In manchen Gebieten scheint tatsächlich eine Zunahme extremer Ereignisse vorzuliegen, andere Datensätze scheinen eher einen Rückgang zu dokumentieren. Mit einem Wort: Ein einheitlicher Trend für eine Häufung von Extremwetterereignissen, der auf den gesamten Globus umlegbar wäre, existiert nicht.

Untersuchungen aus den USA zeigen, dass die Aufmerksamkeit für extreme Wetterereignisse in den hoch entwickelten Industriestaaten wie Nordamerika, Westeuropa; Australien und Japan durch Medienaktivitäten wesentlich höher liegt als in den anderen Staaten. Und dadurch auch die Wahrnehmung dieser Ereignisse scheinbar zunimmt.

Zweifellos ist unsere Industriegesellschaft durch extreme Wetterereignisse als Ganzes wesentlich verwundbarer geworden als noch vor einigen Jahrzehnten. Speziell der infrastrukturelle Fortschritt macht uns anfällig für Schäden, die beispielsweise durch Überschwemmungen oder Stürme entstehen. Schäden an Kraftwerksanlagen, Abwasseraufbereitungen, Erdöltanks etc. und in der Folge Umweltverschmutzungen größten Ausmaßes treiben natürlich auch bei kleineren extremen Wetterkatastrophen die wirtschaftlichen Schäden in enorme Höhen. So ist es auch kein Wunder, dass die Versicherungswirtschaft uns exponentiell ansteigende Aufwendungen zur Deckung von Schäden durch Naturkatastrophen aufzuzeigen versucht und dies auch mit Erfolg tut.

## Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte

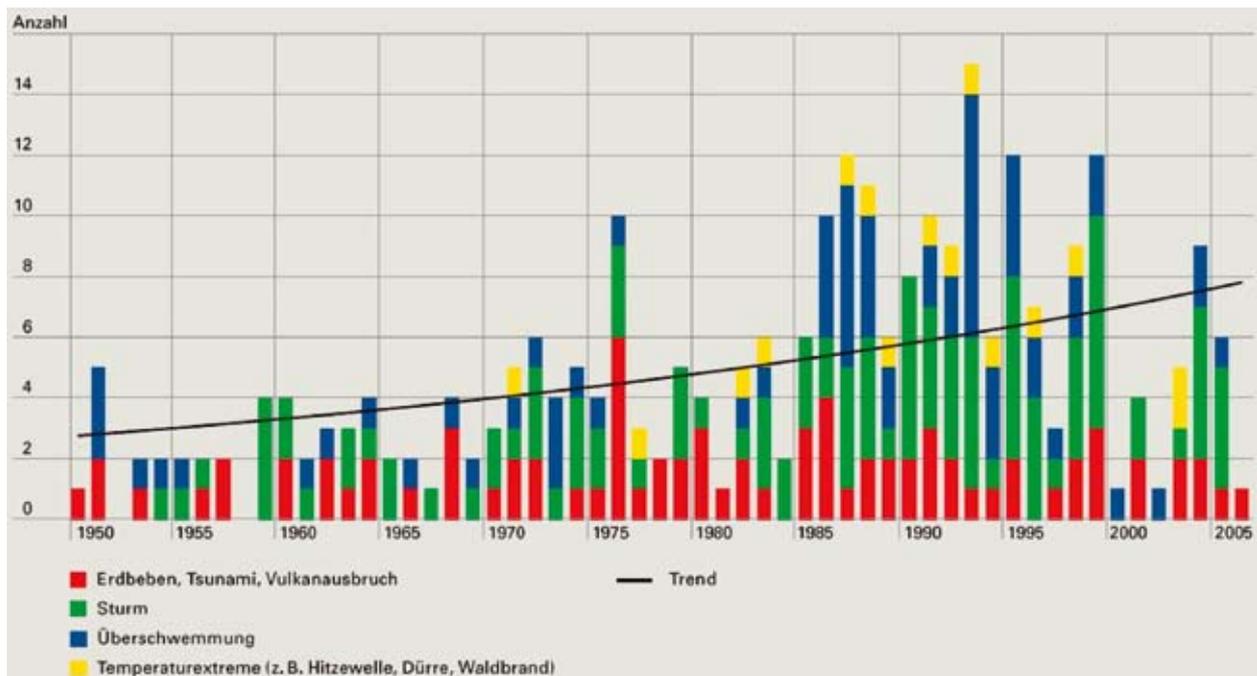


Bild 6: Der Blick der Versicherungswirtschaft (Quelle: Münchner Rückversicherungsgesellschaft)

Bild 6 zeigt die Rohdaten, die sehr stark von Faktoren wie Besiedlungsstruktur, Bevölkerungswachstum, Sozialstruktur- Konzentration von Bevölkerung und Kapital in Ballungsräumen, Besiedlung und Industrialisierung in „exponierten“ Gebieten beeinflusst werden. Eine Studie aus den USA zeigt, dass wenn man alle diese Faktoren berücksichtigt, der extreme Trend der oberen Kurve in ihrer „normalisierten“ Form, wie es die Studie bezeichnet, verschwunden ist. Man kann zwar von Jahr zu Jahr die große Variabilität sehen, aber keinen Langfristtrend feststellen. Der Zusammenhang mit der Erwärmung ist verschwunden.

Ein ähnliches Bild sieht man auch in der folgenden Abbildung:

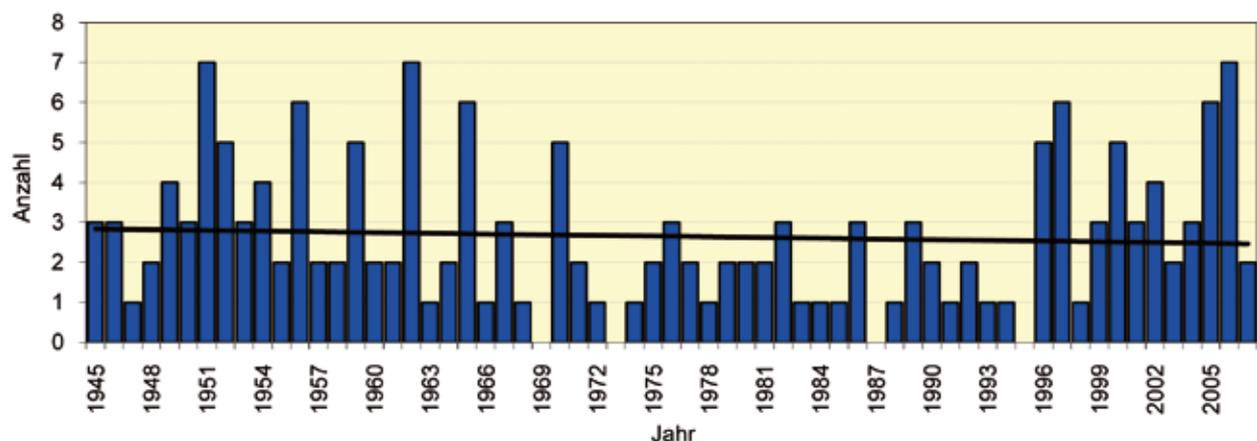


Bild 7: Hurrikane der Intensität 3–5, die das Festland der USA erreichten (Source: NCDC pers. Mitteilung)

## 5 Ausblick

Auswertungen historischer Quellen in Mitteleuropa zeigen sehr deutlich, dass Wetterkatastrophen ein ständiger Begleiter waren. Dies gilt für alle angesprochenen Varianten wie Gewitter, Stürme und Hochwasser. Untersuchungen von Langzeittrends verschiedener extremer Wetterereignisse (Stürme, Niederschlag, Gewitter, Hagel) in Mitteleuropa, die derzeit an der ZAMG laufen, zeigen, dass in den letzten dreihundert Jahren im Alpenraum kein signifikanter Trend für die Zunahme dieser Ereignisse nachzuweisen ist. Die Aussage, dass neben einem Temperaturanstieg auch Veränderungen in der Niederschlagstätigkeit und dem Auftreten extremer Wetterereignisse, wie Stürme und Überschwemmungen beobachtbar sind, ist nicht zu belegen. Viele Quellen belegen vielmehr sehr deutlich, dass in einigen Phasen der Klimaentwicklung der letzten 1.000 Jahre Katastrophen häufiger als in den letzten 100 Jahren aufgetreten sind. Einzelne Ereignisse übertreffen die uns heute heimsuchenden Extremfälle sogar erheblich.

Hier muss man aber auf die Quellenproblematik hinweisen, da extreme Witterungsereignisse geschichtlich meistens nur deskriptiv beschrieben wurden und eine Evaluation im heutigen Sinn nicht vorhanden ist.

Wetterextreme sind ein fixer Bestandteil des Wetters, die zwar teilweise für den Menschen zu sehr unangenehmen Begleiterscheinungen führen können, mit denen jedoch zu allen Zeiten immer gerechnet werden musste. Die interjährliche Variabilität war, ist und wird auch in Zukunft groß sein. Jahre mit vielen Extremen werden von „ruhigen“ Jahren gefolgt werden. Geändert hat sich im Laufe der Geschichte aber vor allem das Siedlungsverhalten des Menschen. Das besiedelte Gebiet hat sich in den letzten Jahrhunderten stark ausgedehnt, auch Risikozonen wurden und werden nach wie vor bebaut. Lawinen, Muren und lokale Hochwässer haben schon allein dadurch verheerende Auswirkungen. Riesige Hallen mit sturmanfälligen Flachdächern werden in die Landschaft gesetzt, meistens unter Missachtung des maximal möglichen Schneedrucks, weil wir ja in der irrigen Annahme leben, dass künftig ohnehin kaum noch Schnee zu erwarten ist. Siedlungen und Industrieanlagen wurden aus Platzmangel in den letzten Jahrzehnten immer öfter in Überschwemmungszonen gebaut und der Trend setzt sich weiterhin fort.

### **Anschrift des Autors:**

Dr. Ernst Rudel  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38, 1190 Wien  
Tel. +43-1-36026-2201  
E-Mail: ernst.rudel@zamg.ac.at



# Klimawandel und Wasserhaushalt in Süddeutschland – Ergebnisse des Kooperationsvorhabens KLIWA

*Hans Weber*

## 1 Einführung

Unter den Klimaforschern ist es weltweit mittlerweile unstrittig, dass die beobachtete globale Temperaturerhöhung der letzten Jahrzehnte im Wesentlichen nicht den natürlichen Klimaeinflüssen und Klimaschwankungen zuzuschreiben, sondern als Folge des anthropogen bedingten Treibhauseffekts einzustufen ist. Um die weitere Entwicklung des weltweiten Klimawandels abzuschätzen, berechnen die Klimaforscher globale Klimaprojektionen mit immer komplexeren Klimamodellen. Alle diese Globalmodelle sagen eine fortschreitende Erwärmung voraus; ihre Qualität und Eignung zeigen sich daran, dass sie mit entsprechenden Emissionsszenarien den Temperaturverlauf der Vergangenheit recht gut nachbilden können. Je nach Klimamodell und Emissionsszenario liegt die berechnete globale Temperaturzunahme in den kommenden 100 Jahren am ehesten zwischen 1,8 °C und 4,0 °C. Der Weltklimarat der Vereinten Nationen (IPCC) hat diese Tendenz in seinem vierten Sachstandsbericht (2007) erneut bestätigt und weiter gehend wissenschaftlich untermauert.

Die gegenwärtige Klimaveränderung wird häufig auf die globale Erwärmung reduziert. Es ist aufgrund der physikalischen Zusammenhänge aber zu erwarten, dass infolge der zur Verfügung stehenden höheren Wärmeenergie auch der globale Wasserkreislauf intensiviert wird. Dies ist dann in den verschiedenen Raum- und Zeitskalen voraussichtlich mit erheblichen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und als Folge insbesondere auf folgende Bereiche der Wasserwirtschaft verbunden:

- den technischen Hochwasserschutz und die Hochwasservorsorge wegen der möglichen Veränderung von Höhe, Dauer und Häufigkeit von Hochwasser
- die Wasserversorgung durch die Änderung der Grundwasserneubildung mit Auswirkungen auf Verfügbarkeit und Beschaffenheit der Wasservorräte
- den Gewässerschutz durch die Änderung der jahreszeitlichen Abfluss- und Wassertemperaturverhältnisse mit Auswirkungen auf den Stoffhaushalt der Flüsse und Seen
- die Bewirtschaftung der Gewässer durch die Änderung der Betriebsweise insbesondere von Wasserspeichern und Wasserkraftanlagen sowie sonstige Gewässernutzungen
- die Planung und Dimensionierung kommunaler Entwässerungssysteme durch eine stärkere Beaufschlagung infolge der möglichen Intensivierung der Starkniederschläge.

Fehlende Kenntnisse zu Umfang und Größe der Auswirkungen des regionalen Klimawandels waren im Jahr 1999 Anlass für das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)“. Dieses langfristig angelegte Vorhaben wird seither von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführt, seit 2007 ist auch das Land Rheinland-Pfalz beteiligt. Ziel des Vorhabens KLIWA ist es, für die nächsten Jahrzehnte (bis 2050) Aussagen über die möglichen regionalen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die davon abhängigen bzw. beeinflussten Systeme zu erhalten, um auf dieser Basis geeignete Anpassungsstrategien entwickeln zu können.

## 2 Konzeption des Kooperationsvorhabens KLIWA

Das Vorhaben umfasst derzeit 5 Hauptthemen mit den zugehörigen Untersuchungs- und Arbeitsbereichen (*Bild 1*), die im Vorgehenskonzept gebündelt sind. Jeder Projektbereich setzt sich aus einer Reihe von Teilprojekten zusammen.

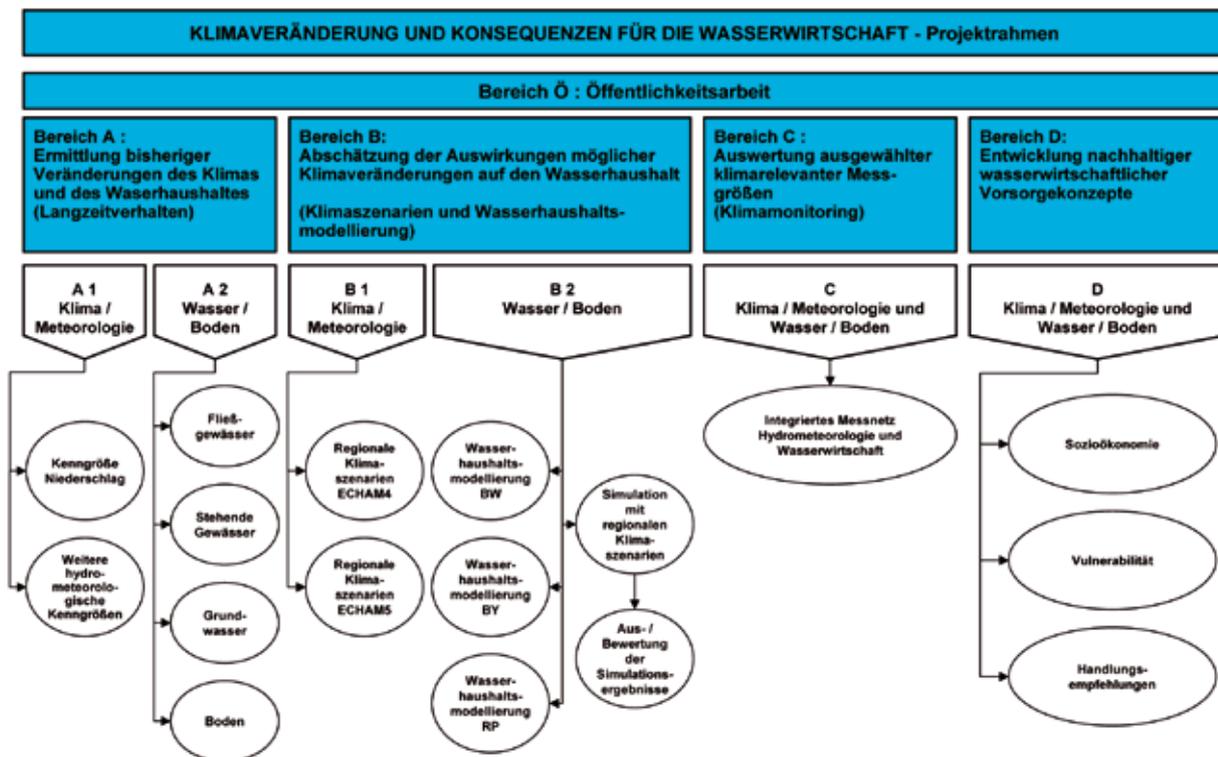


Bild 1: Vorhaben KLIWA – Projektstruktur und Arbeitsbereiche

Der Projektbereich A widmet sich der Analyse bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts; dabei wurden die verfügbaren langen Messzeitreihen nach vereinbarten Verfahren statistisch ausgewertet. Im Projektbereich B geht es um die Ermittlung der zukünftig zu erwartenden hydrologischen Auswirkungen, die mit Hilfe von regionalen Klimaprojektionen als Dateninput und anschließenden Wasserhaushaltsmodellierungen abgeschätzt werden. Der Projektbereich C ist als längerfristiges Überwachungsprogramm des Wasserhaushalts für Süddeutschland über ein integriertes Messnetz Hydrometeorologie (DWD) und Wasserwirtschaft (Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz) angelegt und stellt in seiner zukünftigen Anwendung ein Klimamonitoring dar.

Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen über die Auswirkungen des regionalen Klimawandels werden mögliche Beeinträchtigungen der wasserwirtschaftlichen Nutz- und Schutzfunktionen untersucht. Zur Abmilderung negativer Auswirkungen sollen dann Handlungsempfehlungen für sachgerechte Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Im Projektbereich D sind bisher schwerpunktmäßig das Problem der möglichen Hochwasserverschärfung und die Folgen für den Hochwasserschutz untersucht worden. Derzeit stehen die zu erwartenden Änderungen der Niedrigabflüsse und die Entwicklung der Grundwasserneubildung im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Die Problematik des Klimawandels, die Projektaktivitäten und Ergebnisse werden für Entscheidungsträger und Bevölkerung im Projektbereich Ö (Öffentlichkeitsarbeit) aufbereitet. Die Weckung des Problembewusstseins für den Klimawandel wird als Grundvoraussetzung für notwendige Anpassungen wie auch für Maßnahmen zum Klimaschutz angesehen, sodass diesem Arbeitsbereich eine besondere Bedeutung innerhalb des Projektes zukommt. Als wichtiges Informationsmedium wird die Internetseite des Projekts angesehen ([www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)), auf der die Untersuchungsergebnisse des Kooperationsvorhabens umfassend dokumentiert und veröffentlicht werden.

### **3 Klimaentwicklung in Süddeutschland im 20. Jahrhundert**

Die Untersuchungen langer Messzeitreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen (in der Regel mehr als 70 Jahre) geben Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und evtl. bereits erkennbare systematische Veränderungen (Trends) der Beobachtungswerte. Damit können objektiv auf Basis der vorhandenen Messreihen Aussagen zur regionalen Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert abgeleitet werden. Dazu werden die Messreihen teilweise gebietsbezogen zusammengefasst und mittlere repräsentative Aussagen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete bzw. die KLIWA-Regionen (33 Flussgebiete bzw. 9 Regionen für das gemeinsame Untersuchungsgebiet von Baden-Württemberg und Bayern) getroffen. Nachfolgend werden einige wesentliche Erkenntnisse vorgestellt.

#### **3.1 Lufttemperatur**

Die Lufttemperatur spielt für den Wasserkreislauf eine besondere Rolle, da sie maßgeblich die Verdunstung und die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf in einer Luftmasse bestimmt. Damit beeinflusst die Lufttemperatur das Niederschlagsgeschehen ganz erheblich. Die Kenntnis über die Temperaturentwicklung in den vergangenen Jahrzehnten ist daher von besonderem Interesse. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgte gebietsbezogen und zeitlich auch für die hydrologischen Halbjahre und Kalendermonate. Die Jahresmitteltemperaturen der Untersuchungsgebiete liegen zwischen 6,4 °C und 9,7 °C und sind durch signifikante Zunahmen gekennzeichnet. Die berechneten Trends der beiden Halbjahre für den Zeitraum von 1932 bis 2005 liegen zwischen 0,6 °C und 1,5 °C (*Bild 2*). Bemerkenswert sind dabei auch die jahreszeitlichen und regionalspezifischen Besonderheiten: Die höchste Zunahme der mittleren Monatstemperaturen ergibt sich in den Wintermonaten, insbesondere im Dezember sowie für die Monate August und Oktober, während für April und den September kaum Veränderungen zu detektieren sind.

#### **3.2 Schneedeckendauer**

Aufgrund der festgestellten Temperaturerhöhung in den Wintermonaten tritt der feste Niederschlag gegenüber dem Schneeregen oder Regen zurück. Die Untersuchungen in Süddeutschland zum Langzeitverhalten der Schneedeckendauer zeigen daher einen Trend zu schneeärmeren Wintern mit weniger dauerhaften Schneedecken. In den tiefen (< 300 m ü. NN) und mittleren Höhenlagen geht die Schneedeckendauer deutlich zurück. Dieser Rückgang tritt in den westlichen Gebietsteilen von Süddeutschland stärker in Erscheinung als in den östlichen Teilen. In höher gelegenen Gebieten (> 800 m ü. NN) ergibt sich nur eine geringe Abnahme der Schneedeckendauer bzw. teilweise sogar eine leichte Zunahme.

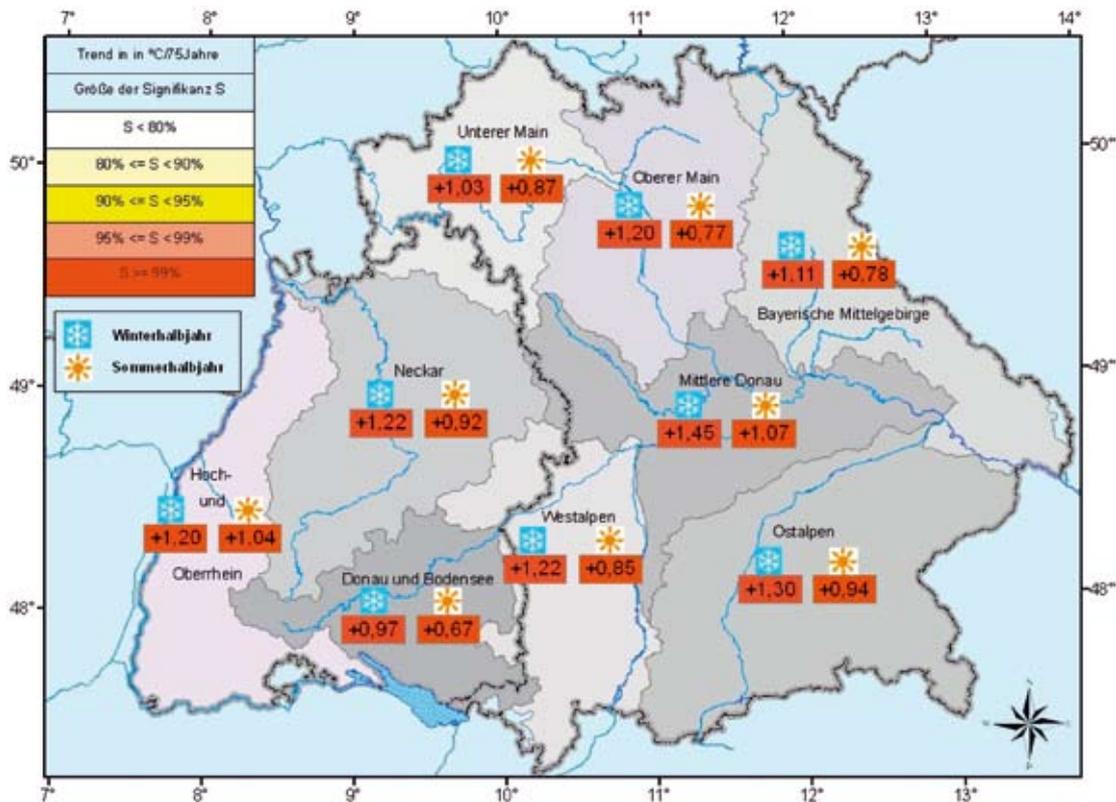


Bild 2: Entwicklung der Gebietsmitteltemperaturen in den Hydrologischen Halbjahren / Absoluter Trend im Zeitraum 1931–2005 (Trend in °C) mit Angabe der Signifikanz

### 3.3 Verhalten des Niederschlags, Starkniederschläge

Die Jahresniederschlagshöhen sind in den vergangenen Jahrzehnten in den einzelnen Regionen Süddeutschlands annähernd gleich geblieben bzw. haben sogar etwas zugenommen. Verändert hat sich allerdings das innerjährliche Niederschlagsregime: so ist eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- ins Winterhalbjahr festzustellen; im Winter nahm der Niederschlag deutlich zu. Diese Entwicklung ist beispielhaft für die Halbjahresniederschläge von zwei Flussgebieten im nördlichen und südlichen Bayern, nämlich die Regnitz und die Isar gezeigt (Bild 3).

Das Verhalten von Starkniederschlägen, die teilweise in Verbindung mit Schneeschmelzeereignissen zu Hochwasserabflüssen führen, ist wegen der wasserwirtschaftlichen Relevanz vertieft untersucht worden. Mit Starkniederschlag wird ein Niederschlagsereignis bezeichnet, das im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe Niederschlagsintensität aufweist und daher selten auftritt, z. B. im statistischen Mittel höchstens einmal jährlich. Bei den KLIWA-Untersuchungen wurden bisher wegen der Datenlage nur die Starkniederschläge höherer Dauerstufen (24 bis 240 Stunden) und dabei die jeweiligen Höchstwerte einer Zeitspanne (Jahr, Sommer und Winter) betrachtet. Dazu sind lange Messreihen von über 400 Niederschlagsstationen statistisch ausgewertet worden. Neben einer ersten stationsbezogenen Auswertung ist im Rahmen des ersten Klimamonitorings für die bis 2005 verlängerten Zeitreihen auch eine gebietsbezogene Analyse durchgeführt worden.

Im Winterhalbjahr nehmen die Starkniederschlagshöhen in Süddeutschland an den Messstationen – wenn auch regional unterschiedlich – deutlich zu, die Trends sind dabei überwiegend auch signi-

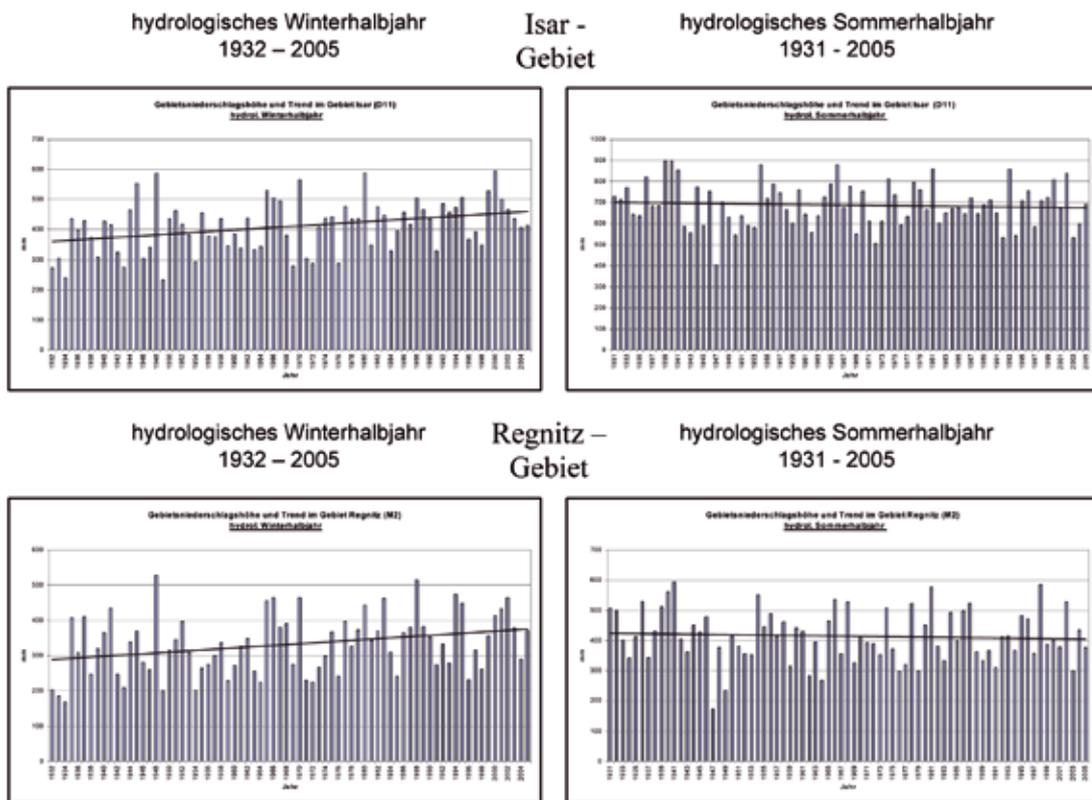


Bild 3: Trendverhalten der halbjährlichen Gebietsniederschlagsreihen in den Flussgebieten der Regnitz (Nordbayern) und der Isar (Südbayern)

fikant; dies gilt auch für die Zeitreihen der gebietsweise aggregierten Messreihen (Bild 4). Dagegen sind im Sommer keine markanten einheitlichen Veränderungen festzustellen. Die Ursache des Anstiegs der winterlichen Starkniederschlagshöhen wird im häufigeren Auftreten von Westwetterlagen, verbunden mit der Zufuhr warmer, feuchter Luftmassen gesehen.

### 3.4 Änderungssignale in den Abflusszeitreihen

In Zusammenhang mit wasserwirtschaftlichen Fragestellungen interessieren das Abflussregime unserer Gewässer und seine möglichen Veränderungen. Das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse stand bei KLIWA zunächst im Mittelpunkt, da die öffentliche Meinung oft Klimawandel mit dem Auftreten großer Hochwasser, wie sie in letzter Zeit häufiger zu registrieren waren, gleichsetzt. Für die statistischen Untersuchungen der Jahresreihen und des Jahresganges kamen vor allem konventionelle statistische Methoden wie die lineare Trendanalyse und der Mann-Kendall-Signifikanztest zur Anwendung (Bild 5). Die Auswertung an insgesamt 90 langen Pegelzeitreihen mit den Jahreshöchstwerten des Abflusses (Beobachtungsdauer 1932–2005) zeigt zunächst: 73 von 90 Zeitreihen weisen steigende Trends auf. Mit dem Signifikanztest werden jedoch nur rd. 40 % der Trends als schwach bis stark signifikant ausgewiesen. Das hydrologische Winterhalbjahr zeigt hinsichtlich der Auswertekriterien Trend und Signifikanz ein vergleichbares Verhalten. Im hydrologischen Sommerhalbjahr geht die Zahl der Pegel mit steigendem Trend der Hochwasserabflüsse etwas zurück. Insgesamt überwiegen aber die Abflussreihen mit positivem, und auch signifikantem Trend deutlich (siehe Tabelle 1).

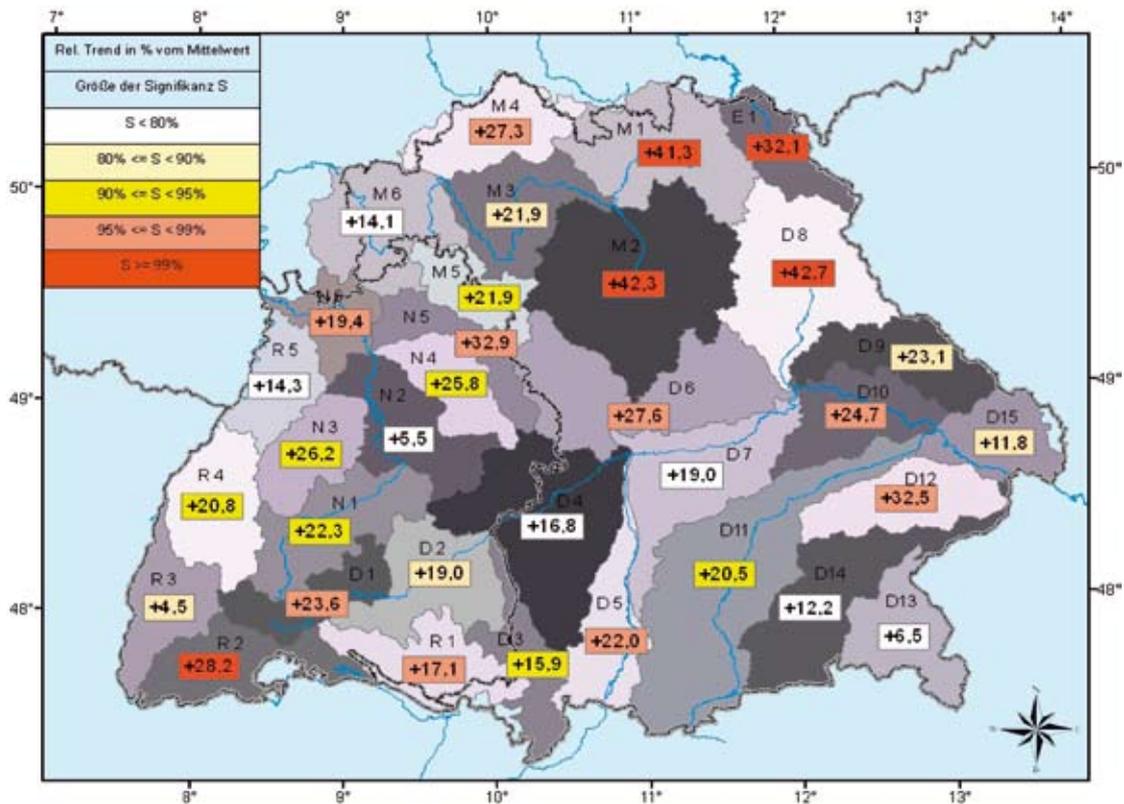


Bild 4: Trendverhalten gebietlicher Starkniederschläge (Dauer 24 h) im hydrologischen Winterhalbjahr (Relativer Trend in Prozent des Mittelwertes der Periode 1932–2005)

Tabelle 1: Überblick über das Trendverhalten der Hochwasserabflüsse an 90 Pegeln aus Baden-Württemberg und Bayern für zwei unterschiedliche Zeiträume

Tendenzen	Untersuchungszeitraum von 1932–1998*	Untersuchungszeitraum von 1932–2005*
<b>Hydrologisches Gesamtjahr (Nov. – Okt.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	26 / 3	17 / 2
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	64 / 21	73 / 41
<b>Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	16 / 3	13 / 3
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	74 / 32	77 / 44
<b>Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	38 / 5	26 / 3
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	52 / 25	64 / 30

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume 1932–1998 und 1932–2005 lässt deutliche Ergebnisverschiebungen erkennen. Durch die verlängerte Untersuchungsperiode bis 2005 ist eine Zunahme der Pegel mit einem Trend zur Hochwasserverschärfung festzustellen, analog sind weniger fallende Trends zu beobachten. Hier wirken sich die großen Hochwasserereignisse

der letzten Jahre in Bayern statistisch aus. Darüber hinaus hat die Signifikanz der Trends zugenommen. In der Auswertung bis 1998 waren im Mittel nur rund 25 % der Trends signifikant, bis 2005 bereits 40 %. Bei Betrachtung der Teilzeitreihen ab den 1960er-Jahren des letzten Jahrhunderts sind ebenfalls deutliche Tendenzen für zunehmende Trends sowohl bei den Höchstabflüssen als auch der Häufigkeit von Winterhochwassern zu verzeichnen. Diese Veränderungen zeigen aber auch, welchen Einfluss die Zeitreihenlänge bei statistischen Auswertungen besitzen kann.

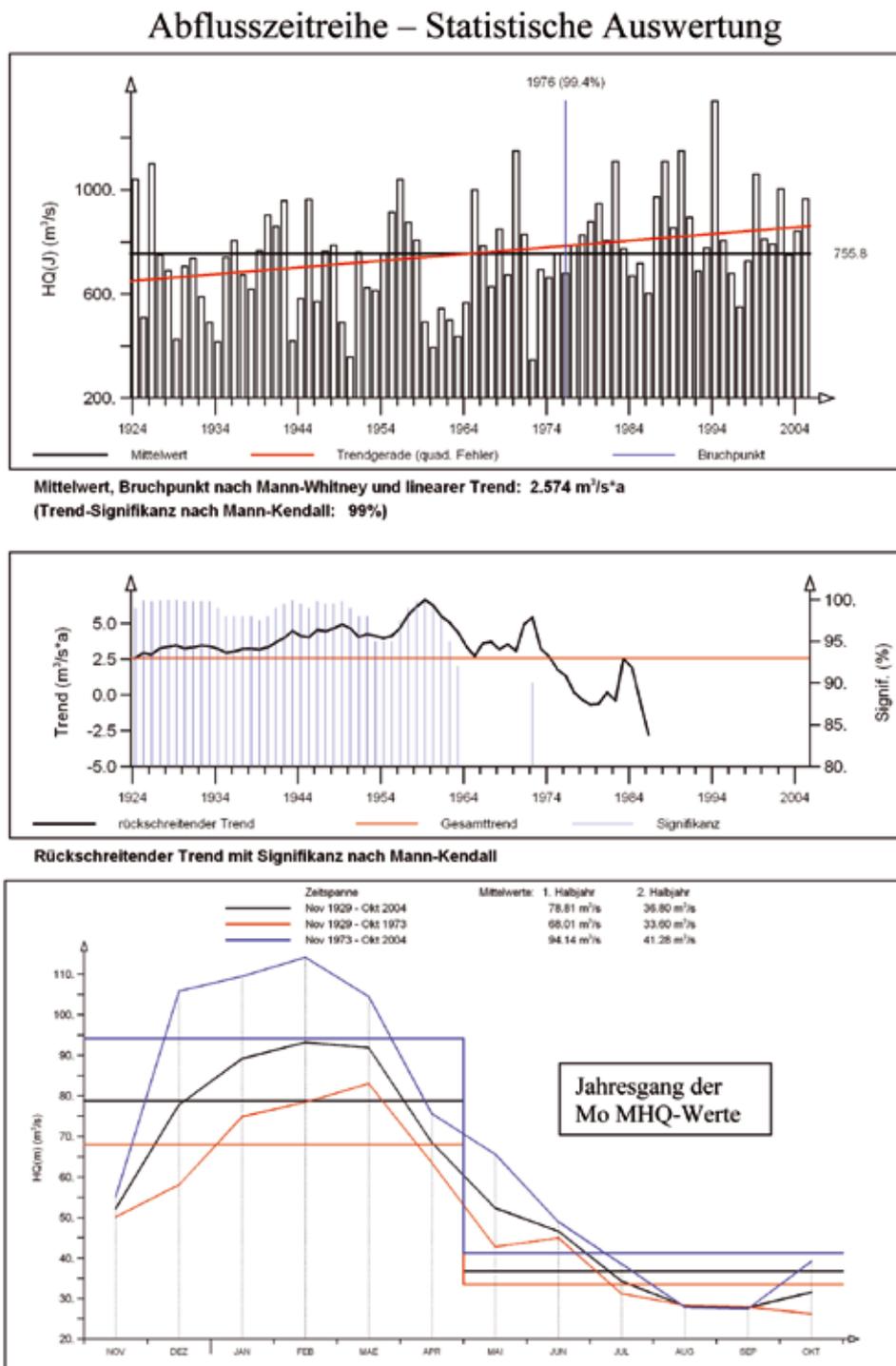


Bild 5: Beispielhafte Ergebnisdarstellung der statistischen Auswertungen zum Langzeitverhalten von Abflusszeitreihen (Anm.: unterschiedliche Pegel)

Diese Befunde zur Entwicklung bei den Jahres- und Halbjahreswerten werden auch durch die Auswertung des Jahresganges der monatlichen Abflusshöchstwerte und der feststellbaren Veränderungen gestützt. Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr sind bei der Mehrzahl der Pegel in den letzten Jahrzehnten höher als in der Zeit davor (*Bild 5*, untere Darstellung). Diese beobachtete Entwicklung deckt sich mit der Auswertung des Trendverhaltens, wonach die Zeitreihen der letzten Jahrzehnte überwiegend eine Tendenz zu steigenden Trends aufweisen, auch wenn die statistischen Befunde nicht so deutlich sind wie bei den Starkniederschlägen.

### **3.5 Bewertung der KLIWA-Ergebnisse**

Die festgestellten Veränderungen der meteorologischen Größen Temperatur und Niederschlag werden in Zusammenschau mit den Veränderungen der Hochwasserabflüsse von KLIWA als erste deutliche Auswirkungen des vor einigen Jahrzehnten einsetzenden, vom Menschen beeinflussten Klimawandels gedeutet.

Die vorstehenden Ergebnisse zeigen, dass sich die Auswirkungen des globalen Klimawandels auch in Süddeutschland bereits seit längerem bemerkbar machen und in den letzten Jahren teilweise verstärkt haben. Dies ist zunächst die starke Temperaturerhöhung, aber auch die Veränderung im Niederschlagsregime. Beides wirkt sich erheblich auf den regionalen Wasserkreislauf aus und führt nach derzeitigem Erkenntnisstand zu einer Zunahme der Hochwassergefährdung, aber auch zu einer temporären Verringerung der Wasserverfügbarkeit in Zusammenhang mit längeren, heißen Trockenperioden. Und damit stellt sich nachdrücklich die Frage, wie sich die Auswirkungen des Klimawandels künftig weiterentwickeln werden.

## **4 Modellierung der Klimaentwicklung bis 2050**

Die in den bisherigen Messzeitreihen festgestellten Trends der klimatologischen und hydrologischen Parameter sind nicht direkt in die Zukunft extrapolierbar, da es sich bei den Klimaprozessen und ihren komplexen Wechselwirkungen um nichtlineare und möglicherweise zeitlich veränderliche Prozesse handelt. Um Aussagen über mögliche Veränderungen des Klimas in Süddeutschland für die nächsten Jahrzehnte zu erhalten, mussten daher regionale Klimaszenarien entwickelt werden. Da es hierfür bis jetzt noch kein optimales Verfahren gibt, wurden im Rahmen von KLIWA verschiedene Institutionen beauftragt, regionale Klimaszenarien mit drei unterschiedlichen Verfahren zu erstellen. Basis waren die Datensätze des Globalmodells ECHAM4.

Um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, wurden weitgehend identische Randbedingungen vorgegeben: Messdaten 1951–2000, Verifikationszeitraum 1971–2000, Globalmodell ECHAM 4 mit dem IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021–2050. Nach dem Vergleich und der Bewertung der Ergebnisse aus drei Downscaling-Verfahren – einem dynamischen und zwei statistischen –, die erwartungsgemäß eine gewisse Bandbreite bei den Ergebnissen lieferten, wurden weiteren Auswertungen primär die Ergebnisse der Methode von WETTREG zugrunde gelegt. Dieser Modellansatz liefert für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1971–2000 für Süddeutschland die folgende Aussagen zur Temperatur- und Niederschlagsentwicklung.

#### 4.1 Temperaturentwicklung

Die Lufttemperatur wird in Süddeutschland auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Das verwendete Klimaszenario ermittelt eine Erhöhung des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur um ca. 1,7 °C für eine mögliche Klimaentwicklung bis 2050.

##### Winterhalbjahr:

Die Zunahme der mittleren Lufttemperatur mit nahezu einheitlich ca. 2 °C ist ausgeprägter als im Sommer, damit verbunden ist u. a. ein Rückgang der durchschnittlichen Anzahl der Eistage (Tage mit  $T_{\max} \leq 0 \text{ °C}$ ) um annähernd die Hälfte.

##### Sommerhalbjahr:

Bei einer deutlichen Zunahme der mittleren Lufttemperatur von ca. 1.4 °C ist in weiten Teilen Süddeutschlands u. a. eine Verdoppelung der Anzahl heißer Tage ( $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ ) zu erwarten.

#### 4.2 Niederschlagsverhältnisse

Für das gewählte Zukunftsszenario betragen die Zunahmen der Jahresmittelwerte der Niederschläge ca. 8 % mit einer Spannweite von 0 % bis ca. 17 %. Die großräumigen Niederschläge werden im Sommer in Süddeutschland überwiegend etwas abnehmen. Andererseits ist zu erwarten, dass die Winterniederschläge deutlich zunehmen werden (*Bild 6*). Je nach Region kann die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35 % betragen. Markant ist für die jährlichen Niederschlagssummen ein Bereich mit relativ hohen Änderungen auf dem südwestlich-nordöstlichem Halbbogen Schwarzwald-Odenwald-Spessart-Rhön-Frankenwald. Von diesen Veränderungen werden insbesondere auch die Abflüsse in den Gewässern zukünftig erheblich betroffen sein. Quantitative belastbare

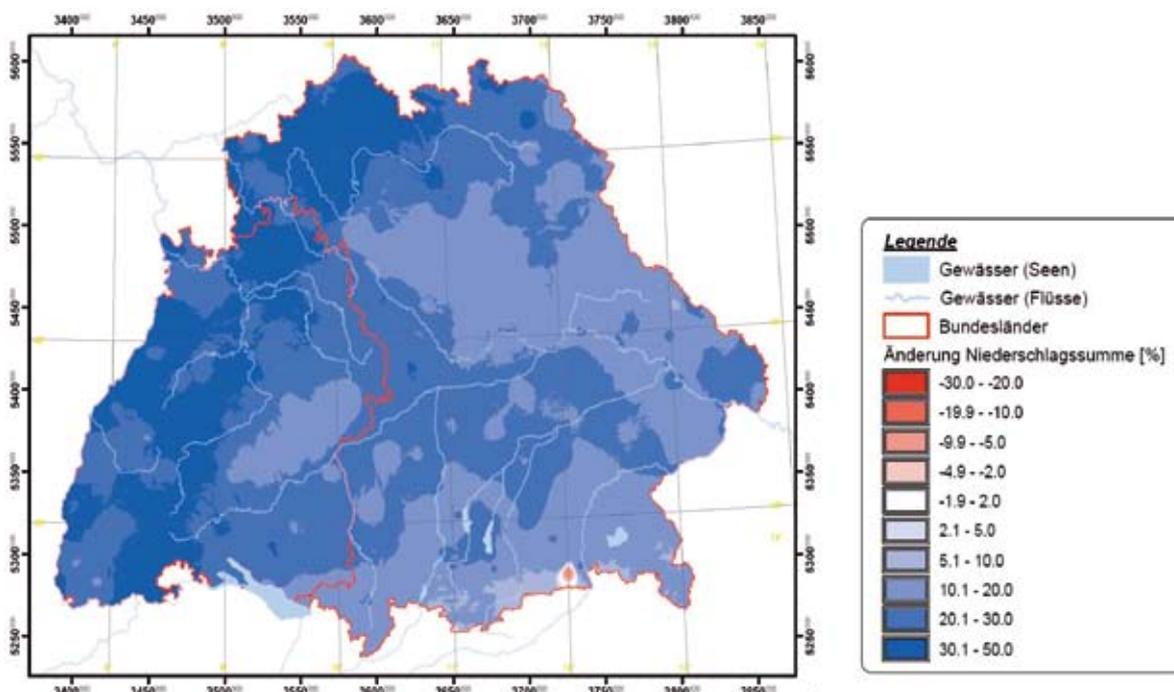


Bild 6: Änderung der künftigen Niederschlagshöhen im Winterhalbjahr gegenüber heute: Unterschied von Szenario (2021–2050) zu Ist-Zustand (1971–2000)

Aussagen zur künftigen Entwicklung von konvektiven Kurzzeit-Niederschlägen (Gewitter), die für die Siedlungsentwässerung und für Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten von Bedeutung sind, können von den verfügbaren regionalen Klimamodellen derzeit jedoch noch nicht erbracht werden.

### **4.3 Allgemeine Schlussfolgerungen**

Die Ergebnisse der weiteren Entwicklung des Klimawandels auf Basis regionaler Klimamodelle lassen sich allgemein wie folgt zusammenfassen:

- Die Erwärmung geht weiter. Die Lufttemperatur wird sich im Mittel weiter erhöhen, dabei im Winter stärker als im Sommer.
- Die Niederschläge im Winter werden zunehmen, in den Sommermonaten ist tendenziell mit einer leichten Abnahme zu rechnen.
- Auch bei der Dauer und der Häufigkeit von regenreichen Westwetterlagen (v. a. Westlage zyklonal), die für die Hochwasserentstehung im Winter bedeutsam sind, ist mit einer Zunahme zu rechnen. Insgesamt ist mit häufigerem Auftreten von extremen Witterungsercheinungen zu rechnen.

Von diesen Veränderungen wird auch der Wasserhaushalt, insbesondere die Abflüsse in den Gewässern, künftig erheblich betroffen werden.

## **5 Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse**

### **5.1 Allgemeines zur Vorgehensweise**

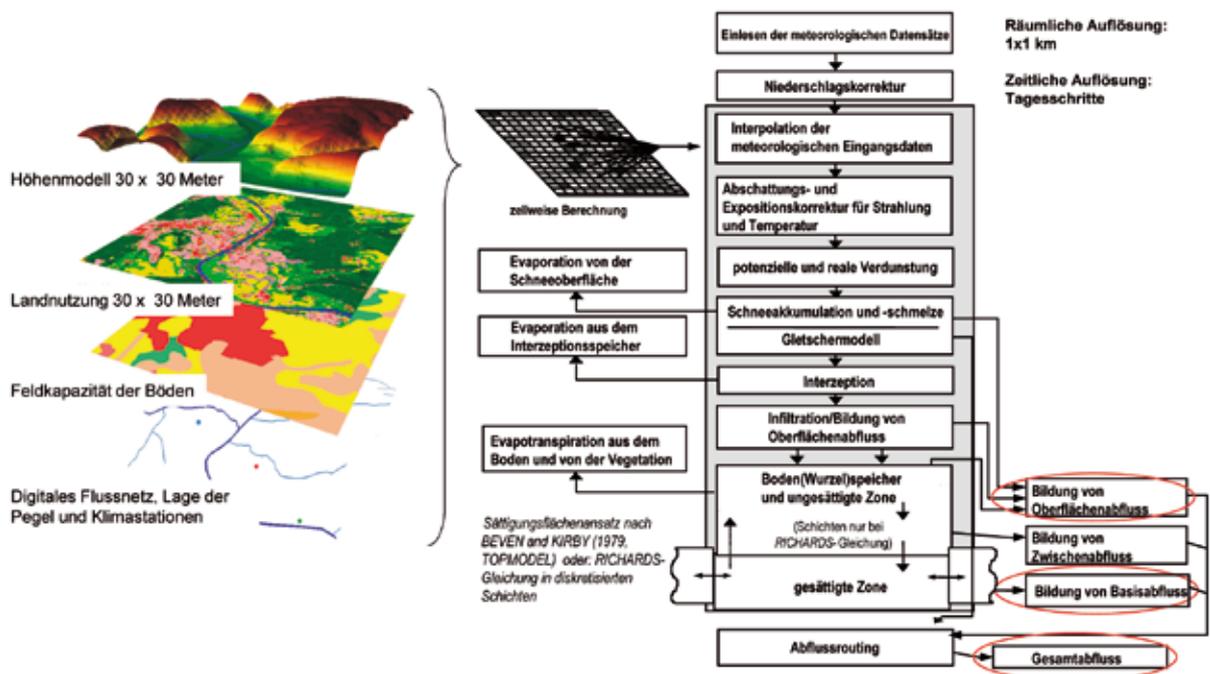
Die Daten der regionalen Klimaszenarien werden als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodelle (WHM) verwendet, um Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt (z. B. Abflüsse in den Gewässern) treffen zu können. Mit den Inputdaten ist aber vorausgehend, wie die Erfahrungen gezeigt haben, eine kritische Befassung unerlässlich, weil die Klimamodelle mit der Modellierung der Niederschläge verschiedentlich noch Probleme haben und unplausible Ergebnisse liefern können. Dies gilt insbesondere auch für den alpinen Raum.

In Bayern liegen derzeit Wasserhaushaltsmodelle auf der Basis des Modellsystems ASGi/WASIM für die Flussgebiete nördlich der Donau vor; die südlichen Gebiete sind noch in Bearbeitung. Das Modell WASIM-ETH bildet die physikalischen Prozesse des Wasserkreislaufs in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung ab (*Bild 7*). Das gilt in vergleichbarer Weise für das Modell LARSIM, mit dem die Flussgebiete von Baden-Württemberg modelliert wurden. Die Wasserhaushaltsmodellierungen konzentrierten sich auf die mögliche zukünftige Veränderung des Abflussgeschehens. Aus dem simulierten Abflusskontinuum waren zuerst die künftigen Hochwasserabflüsse und ihre statistischen Veränderungen im Blickfeld; die dabei ermittelten Abflüsse wurden dazu auch mit Methoden der Extremwertstatistik weiter gehend analysiert.

### **5.2 Veränderung der Hochwasserabflüsse**

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse, aber auch der extremen Abflüsse erwarten. Auch wenn die Ergebnisse aus der not-

## Wasserhaushaltsmodell: GIS-basierte Simulation



### Verwendetes Wasserhaushaltsmodell: Bayern - ASGi mit Modellkern WaSiM-ETH

Bild 7: Struktur des Wasserhaushaltsmodells WASIM-ETH – Instrument zur flussgebietsbezogenen Ermittlung des Abflusskontinuums für unterschiedliche Zustände

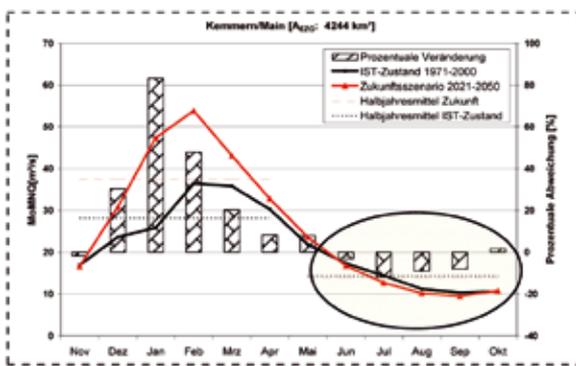
wendigen Modellkette (Globalmodell – regionales Klimamodell – Wasserhaushaltsmodelle) und den Modellannahmen mit Unsicherheiten behaftet sind, bestätigen die verwendeten regionalen Klimamodelle diese Aussage, so dass von einer Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung für den betrachteten Zeitraum bis 2050 auszugehen ist. Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen zu den Auswirkungen des gewählten regionalen Klimaszenarios im Maingebiet sind exemplarisch für zwei Pegel dargestellt (Bild 8). Neben der Veränderung der mittleren monatlichen Höchstabflüsse zeigt die Auswertung der simulierten Zeitreihen auch, wie sich die mittleren monatlichen Niedrigabflusswerte verändern können.

### 5.3 Anpassung der Hochwasserschutzplanungen

Vor dem Hintergrund einer zu erwartenden Hochwasserverschärfung galt es aus Vorsorgegründen, für den Bereich des Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt. Festlegungen sollten daher als Kernpunkte enthalten, dass sie einerseits langfristig ohne nachteilige Wirkung und gleichzeitig bei Bedarf (z. B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind („flexible and no regret“-Strategie).

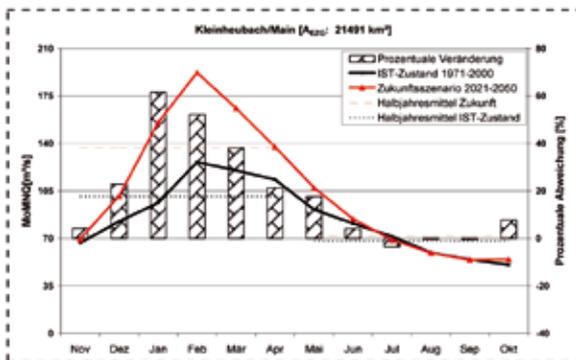
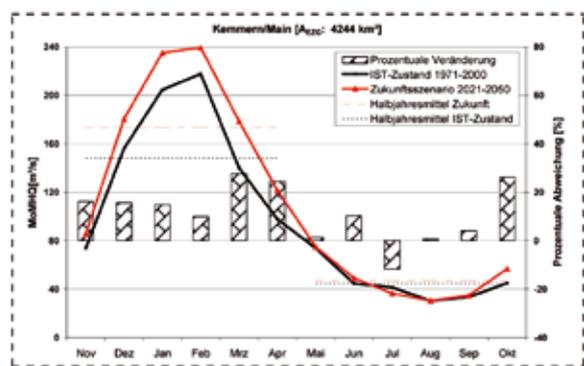
Die Auswertungen gaben Anlass, das bisherige Verfahren zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen zu modifizieren und zukünftig einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde dazu nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der

MoMNQ [m<sup>3</sup>/s]



Pegel Kammern / Main (A<sub>EZG</sub>: 4.244 km<sup>2</sup>)

MoMHQ [m<sup>3</sup>/s]



Pegel Kleinheubach / Main (A<sub>EZG</sub>: 21.491 km<sup>2</sup>)

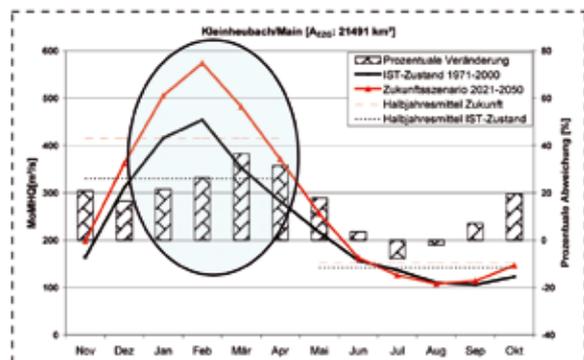


Bild 8: Veränderung der Abflusskennwerte (MoMHQ und MoMNQ) des Zukunftsszenarios (2021–2050) gegenüber dem simulierten IST-Zustand (1971–2000) – Darstellung für zwei Pegel im Mainingebiet

Auswirkungen der Klimaänderung bei technischen Hochwasserschutzmaßnahmen verschiedentlich zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Nachträgliche Anpassungen ohne vorausgehende zumindest planerische Vorkehrungen sind hingegen meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Bei der Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen wird daher künftig der **Lastfall Klimaänderung** berücksichtigt. Dies erfolgt im Planungsverfahren durch einen Zuschlag („Klimaänderungsfaktor“) zur derzeit gültigen statistischen Bemessungsgrundlage (z. B. HQ100). In Bayern ist seit Ende 2004 ein pauschaler Zuschlagsfaktor von 1,15 für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten bis HQ100 eingeführt worden, der jedoch in begründeten Fällen auch regional modifiziert werden kann. Auch aufgrund der derzeit noch bestehenden Unsicherheiten bei den Klimamodellen und den Modellannahmen ist eine Fortschreibung des Klimaänderungsfaktors bei Vorliegen verbesserter Erkenntnisse vorgesehen. Die Anwendung des Lastfalls Klimaänderung für Hochwasserschutzkonzeptionen mit einem Zuschlag auf das HQ100 von 15 %, für einige Flussgebiete auch 25 %, ist analog in Baden-Württemberg mit einem technischen Leitfaden eingeführt.

## 6 Ausblick

Ausgehend von den Erkenntnissen der Untersuchungen gemessener und modellierter hydrometeorologischer und hydrologischer Kenngrößen in Süddeutschland hat das breit angelegte Untersuchungsprogramm KLIWA nicht zuletzt unter Vorsorgegesichtspunkten schon zu konkreten Konsequenzen geführt. Dazu gehören die Verbesserung und Einbeziehung zukünftiger Klimaveränderungen bei der Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes insbesondere durch:

- die Anwendung des fortgeschriebenen KOSTRA-Atlas in KOSTRA-DWD-2000 und
- die Einführung eines „Lastfall Klimaänderung“ bei Hochwasserschutzplanungen.

Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die bisherigen Erkenntnisse fortentwickeln. So sind seit kurzem neue regionale Klimaszenarien für Deutschland verfügbar, die im Auftrag des Umweltbundesamts entwickelt wurden, auf dem Globalmodell ECHAM5 und unterschiedlichen Emissionsszenarien basieren und den Zeitraum bis 2100 abdecken. Die Partner von KLIWA sind dabei, diese Szenarien weitergehend auszuwerten und insbesondere über die Wasserhaushaltsmodelle in Abflüsse zu transferieren, um so auch die bisherigen Kenntnisse mit neueren Vorgaben zügig weiter zu entwickeln. Weiterhin sind die Einrichtung eines längerfristigen Überwachungsprogramms (Klimamonitoring) sowie die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse und der Grundwasserneubildung zur Absicherung der Wasserressourcen bereits intensiv in Arbeit. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen sollen dann bedarfsweise weitere Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden, die die zu erwartenden hydrologischen Herausforderungen durch den Klimawandel – öfter zu viel und öfter zu wenig Wasser – abmildern sollen (*Bild 9*).



*Bild 9: Hydrologische Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt: öfter zu viel, öfter zu wenig des kostbaren Gutes Wasser*

Die Wasserwirtschaft passt sich so im Sinne der Vorsorge an verändernde Verhältnisse an. Letztlich wird aber der Klimawandel nicht nur eine wasserwirtschaftliche, sondern auch eine große gesell-

schaftliche Herausforderung der Zukunft werden, bei der neben der Entwicklung von Anpassungsstrategien für die betroffenen Bereiche auch der Klimaschutz mit dem Ziel der Verminderung von Treibhausgasemissionen deutlich verstärkt werden muss. Dazu hat Bayern im November 2007 das „Klimaprogramm Bayern 2020“ beschlossen. Dieses breit angelegte Maßnahmenprogramm legt die Hauptaktivitäten in den drei langfristigen Handlungsfeldern zum Klimawandel bis 2011 fest, nämlich die Minderung der Treibhausgasemissionen, die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und die Intensivierung von Forschung und Entwicklung. Für weitere Anpassungsmaßnahmen soll dazu das Vorhaben KLIWA verstärkt die notwendigen Datengrundlagen liefern.

## 7 Literatur

- Hennegriff, W., Kolokotronis, V., Weber, H., Bartels, H. (2006): Klimawandel und Hochwasser – Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. Korrespondenz Abwasser-Abfall 2006 (53) Nr. 8
- IPCC (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- KLIWA (2007): Klimawandel und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: KLIWA-Hefte Nr. 1–12. [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

### **Anschrift des Autors:**

DI Hans Weber  
Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Ref. 81 – Klimawandel, Klimafolgen und Wasserhaushalt  
Hans-Högn-Straße 12  
95030 Hof (D)  
Tel. +49-9281-1800-4810  
E-Mail: [hans.weber@lfu.bayern.de](mailto:hans.weber@lfu.bayern.de)

# Trends in hydrologischen Variablen und in der Wasserbilanz Österreichs

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

## 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 (z. B. Kundzewicz et al. 2004, Svensson et al. 2004, Nobilis & Lorenz 1997). 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 (Dore 2005, Xu et al. 2003, Birsan et al. 2005). Eine jahreszeitlich und geografisch differenzierte Analyse und Darstellung der Trends verbessert die Grundlagen für wasserwirtschaftliche Kompensationsmaßnahmen.

Ziel der Untersuchung war es, auf der Grundlage von Monatsdaten der Niederschläge und des Abflusses an den Messstellen des Hydrographischen Dienstes (HD), für die lange Zeitreihen (mindestens ab 1951) vorliegen, Trendanalysen durchzuführen und für eine Darstellung im Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ) (BMLFUW 2007) aufzubereiten. Die punktbezogenen Zeitreihenanalysen werden durch Simulationen mit einem Wasserbilanzmodell ergänzt, um verbesserte flächenhafte Aussagen zu erzielen.

## 2 Datengrundlage

Als Datengrundlage werden 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, Einzugsgebietgliederung, Karten der mittleren Wasserbilanzgrößen 1961–1990).
- Monatsmittel der Lufttemperatur ab 1951 an repräsentativen Messstellen.

## 3 Methodik

Geeignete Methoden zur Trendanalyse der Zeitreihen der Monatsmittel müssen 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 Vorgehensweise 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 rangbasierende 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  $(x_j - x_k)$  worin  $x_j$  und  $x_k$  die Datenwerte zu den Zeitpunkten  $j$  und  $k$  darstellen, mit  $j > k$ .

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 Summation 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  $\beta$  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 Projekts im Programm „Hydrologie Österreichs“ der ÖAW entwickelt (HÖ 27/2003, Kling et al. 2005). 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 Monatschritten 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 1.044 Einzugsgebiete wurde die Trendanalyse, wie oben beschrieben, angewandt. Die berechneten Parameter können im GIS jeweils einem Einzugsgebiet zugeordnet und flächenhaft dargestellt werden.

## 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. Da eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wurde, erfolgt die weitere Darstellung der Ergebnisse nur für die flächenhaften Auswertungen der Modellergebnisse. Eine ausführliche Dokumentation findet sich im HAÖ (BMLFUW 2007) und in Fürst et al. (2007). Für die Trendanalyse wurden die Modellergebnisse zunächst für 1.044 Einzugsgebiete (mittlere Größe von ca. 86 km<sup>2</sup>) 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 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.

### 4.2 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.

### 4.3 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 Karten-

darstellungen im Anschluss an die Beschreibung zusammengefasst, so dass für jede Jahreszeit die Trends im Niederschlag und in den Abflusshöhen einander leicht gegenübergestellt werden können.

### 4.3.1 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 (*Bild 2*). 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 1.200 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 (*Bild 3*), 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 (*Bild 4*) 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 (*Bild 6*). 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 (*Bild 8*) 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.

### 4.3.2 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 (*Bild 3*) 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.

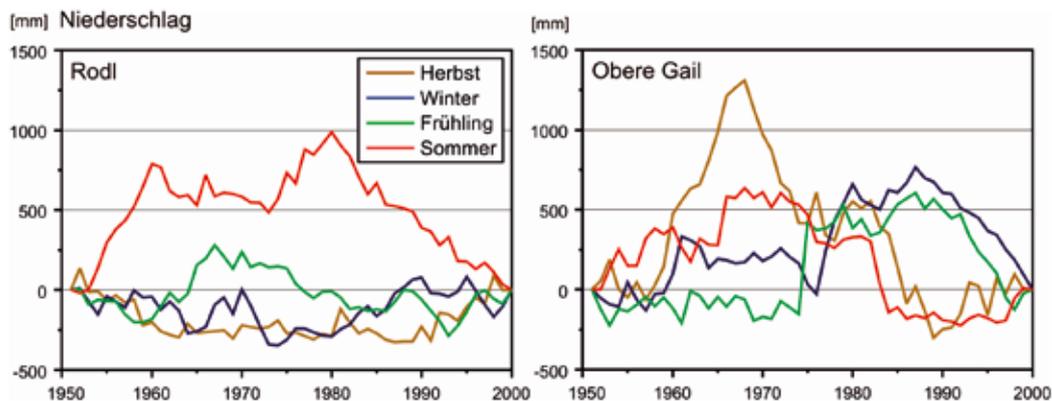
Vergleicht man die Karte mit den Trends in den Herbstniederschlägen (*Bild 2*), so fällt auf, dass die deutlich positiven Trends der Niederschläge nicht schon in den Herbstmonaten zu entsprechenden Trends im Abfluss führen, sondern erst im Winter eine Reaktion im Abflusstrend bewirken. Der zusätzliche Herbstniederschlag wird also verstärkt im Boden- und Grundwasser gespeichert.

Die Karte der Trends des Abflusses in den Wintermonaten (*Bild 5*) 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 (*Bild 7*) 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 (*Bild 9*) 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 *Bild 1* ist der Verlauf für je ein Gebiet nördlich (Rodl) und südlich der Alpen (Obere Gail) dargestellt.



*Bild 1: 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.

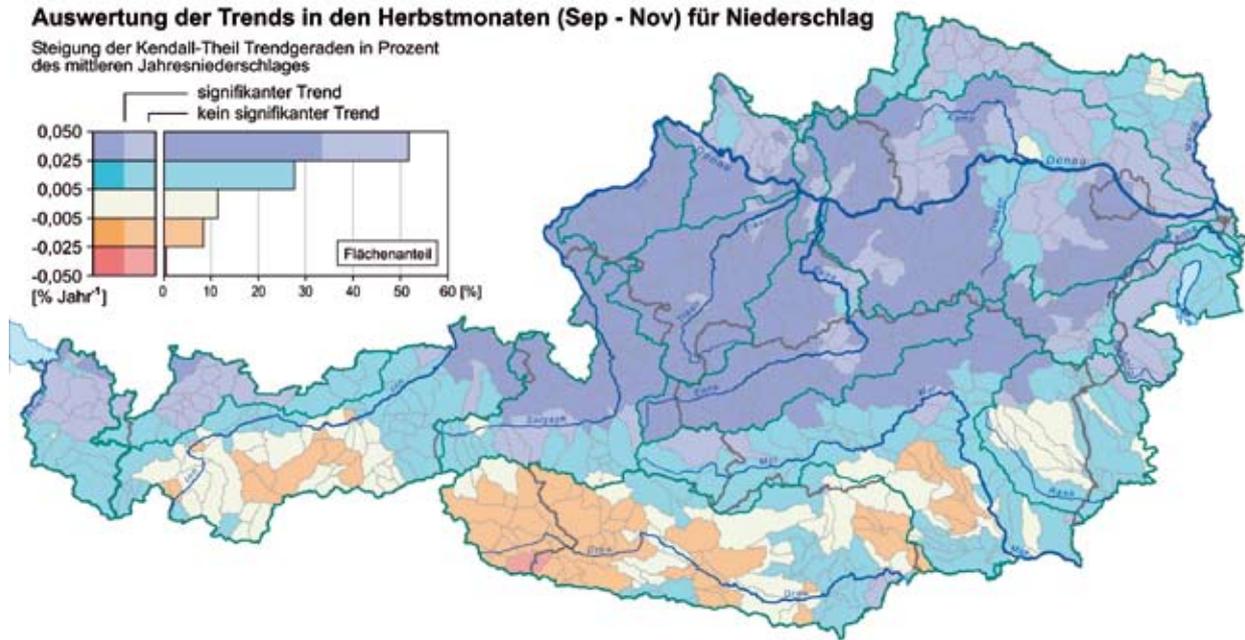


Bild 2: Auswertung der Trends in den Herbstmonaten für Niederschlag

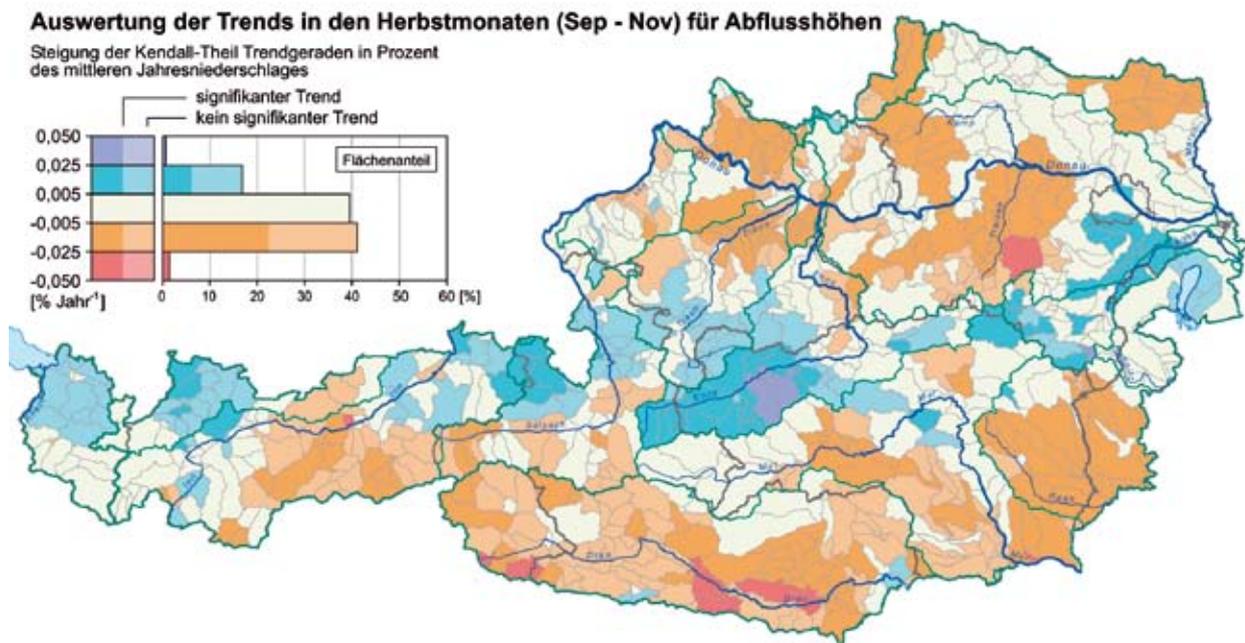


Bild 3: Auswertung der Trends in den Herbstmonaten für Abflusshöhen

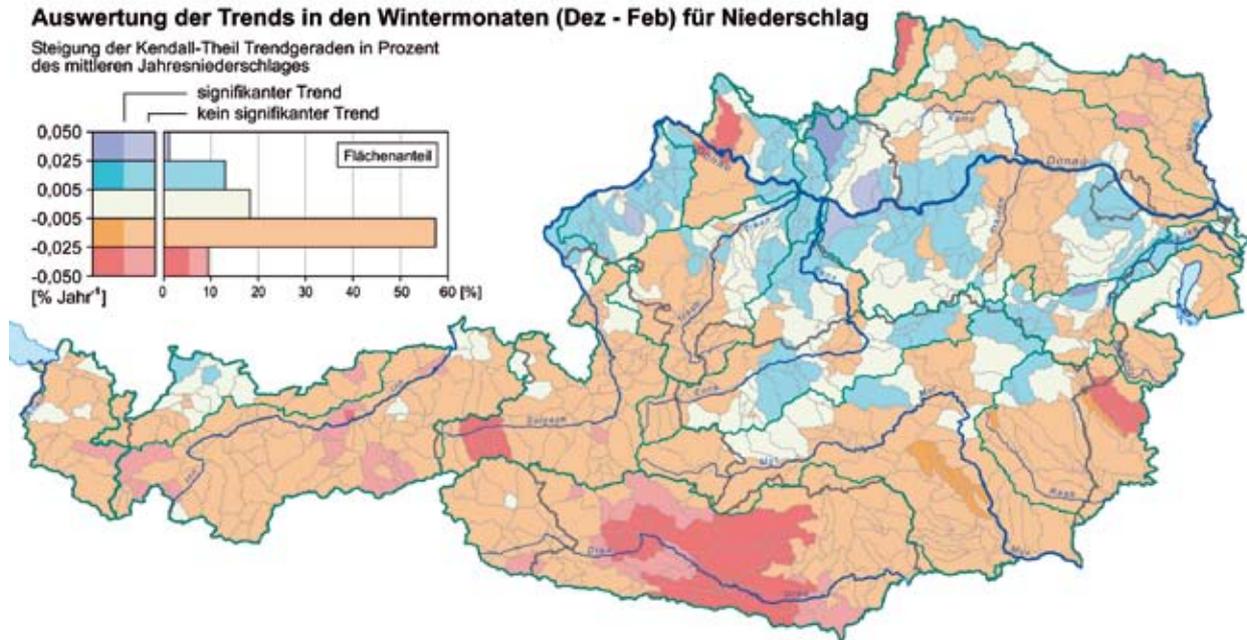


Bild 4: Auswertung der Trends in den Wintermonaten für Niederschlag

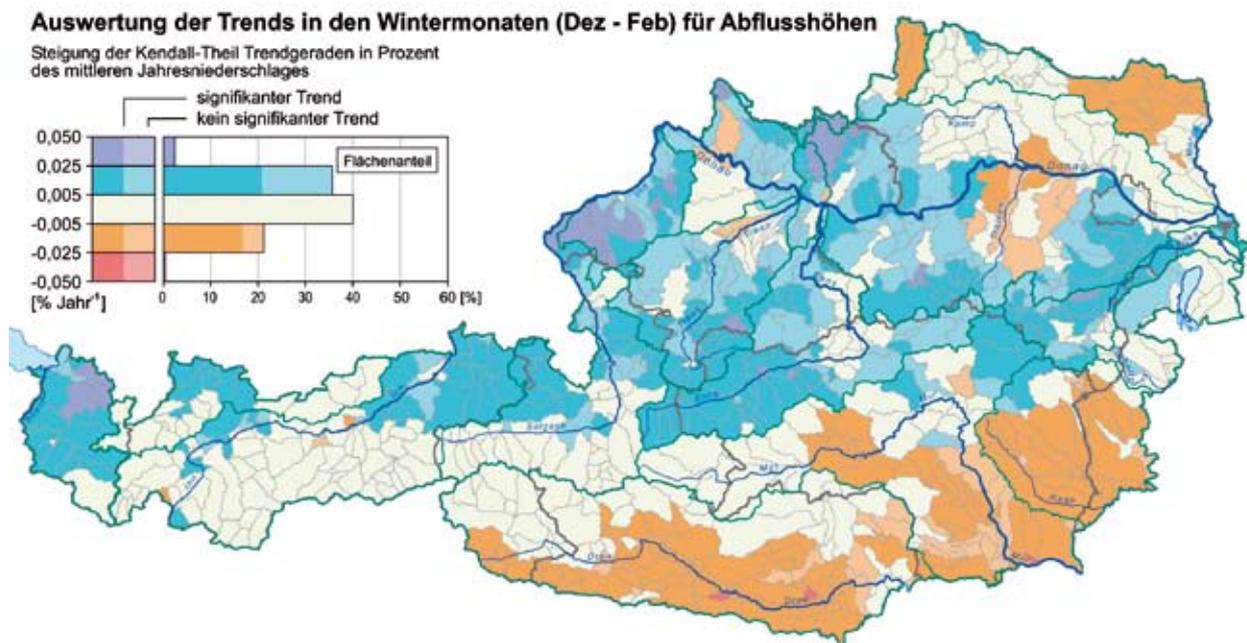


Bild 5: Auswertung der Trends in den Wintermonaten für Abflusshöhen

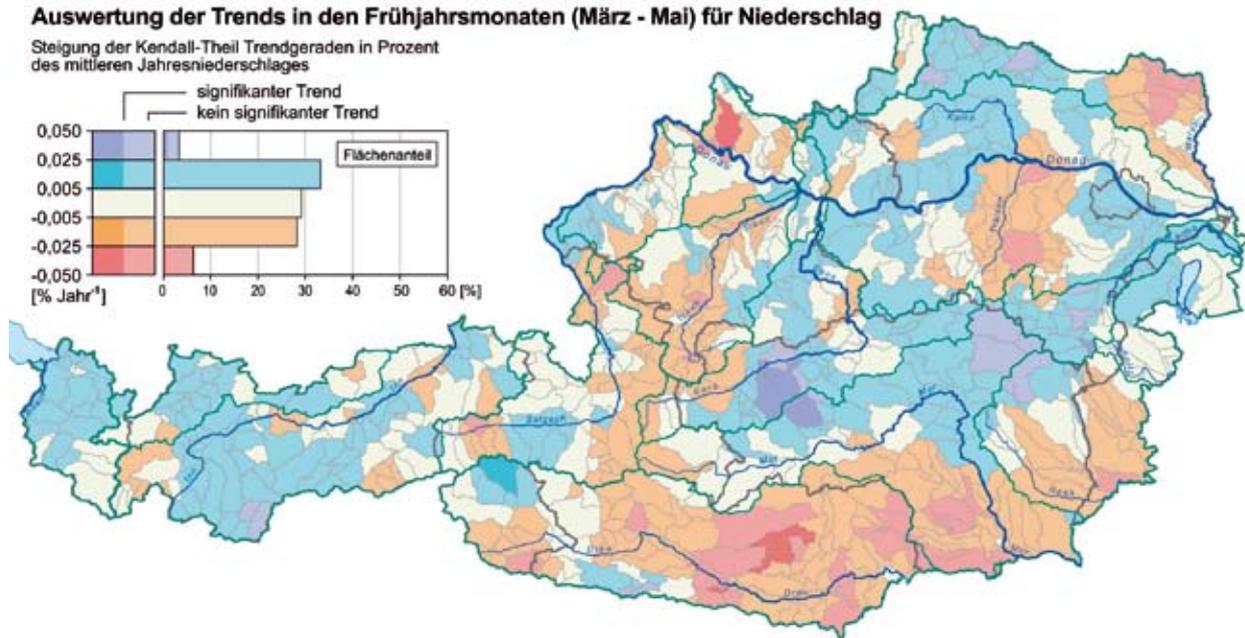


Bild 6: Auswertung der Trends in den Frühjahrsmonaten für Niederschlag

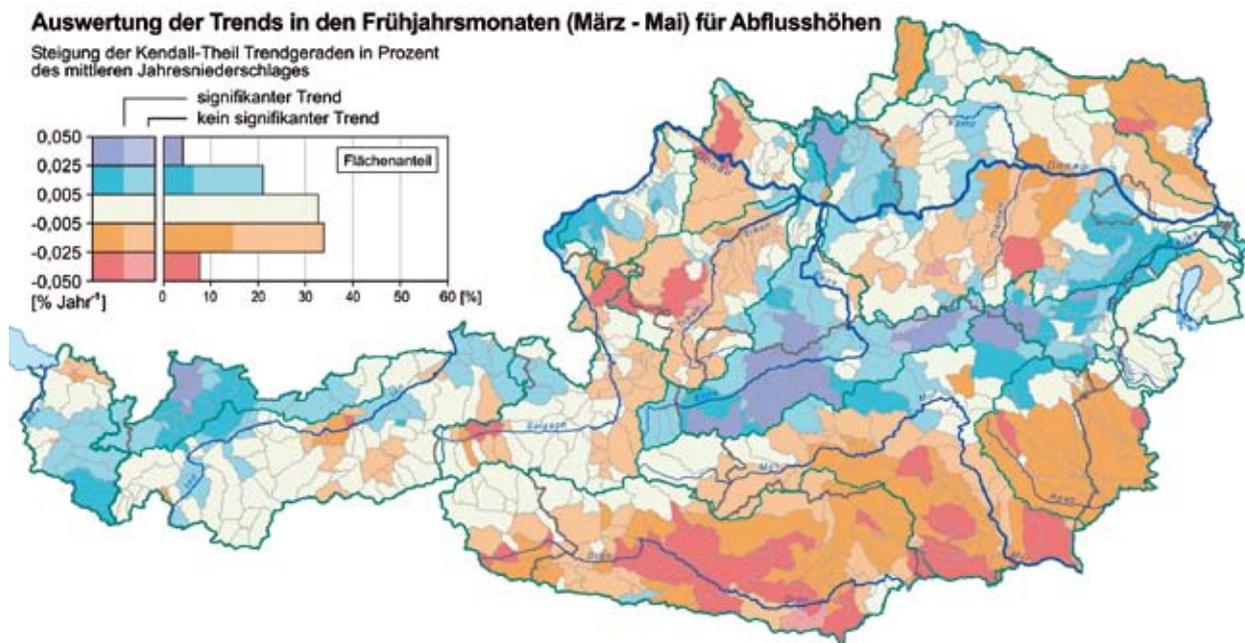


Bild 7: Auswertung der Trends in den Frühjahrsmonaten für Abflusshöhen

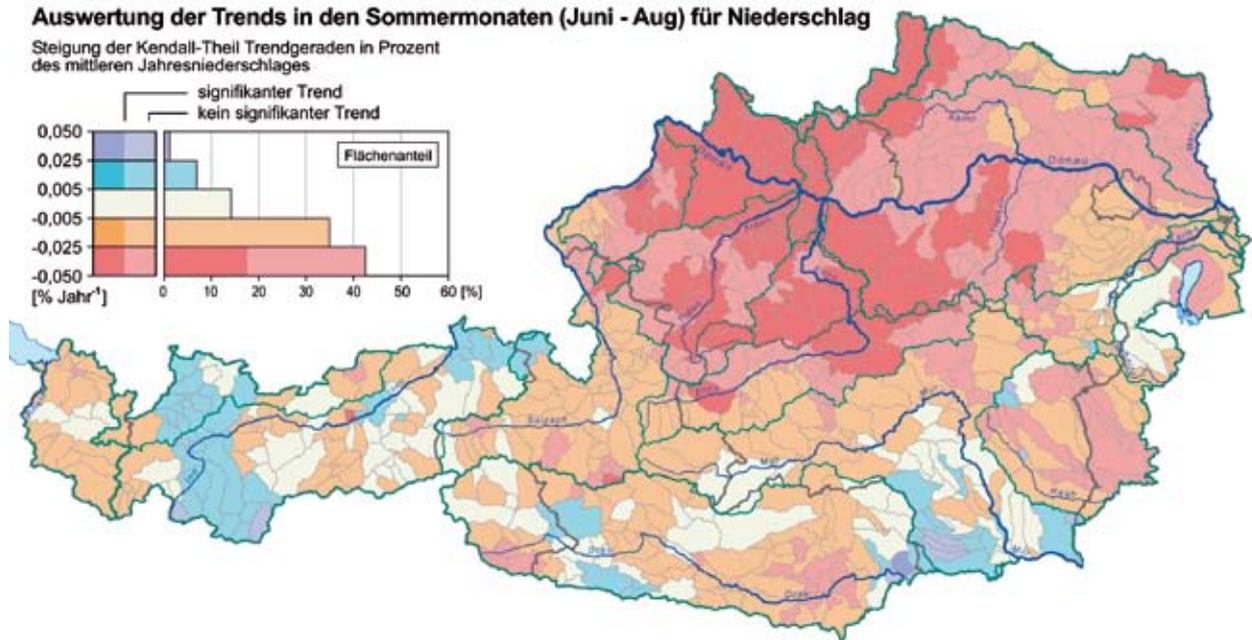


Bild 8: Auswertung der Trends in den Sommermonaten für Niederschlag

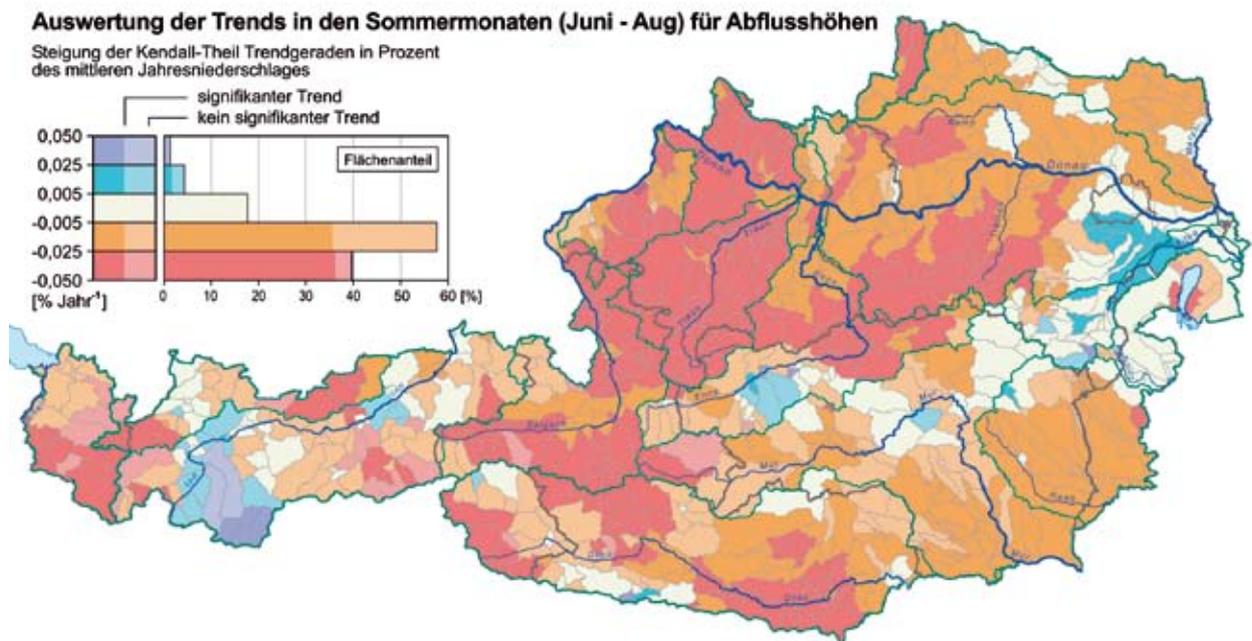


Bild 9: Auswertung der Trends in den Sommermonaten für Abflusshöhen

## 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 erst in den Abflusshöhentrends des Winters 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.

## 6 Literatur

- Birsan M-V, Molnar P, Burlando P, Pfaundler M (2005) Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology* 314: 312-329.
- BMLFUW (2007) Hydrologischer Atlas Österreichs, 3. Lieferung. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, ISBN 3-85437-250-7.
- Burn DH, Hag Elnur MA (2002) Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* 255: 107-122.
- Dore MHI (2005) Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International* 31: 1167-1181.
- Eder G, Fuchs M, Nachtnebel HP & Loibl W (2005) Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an Alpine catchment. *Hydrological Process.* 19, 2339-2360.
- Fürst J, Nachtnebel HP, Kling H & Hörhan T (2007) Trends in Niederschlag und Abfluss. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes* 85. Wien.
- Helsel DR, Hirsch RM (1992) *Statistical methods in water resources*. Studies in environmental science. Amsterdam: Elsevier, ISBN: 0-444-88528-5.
- Kling H, Fürst J, Nachtnebel HP (2005) Spatio-temporal water balance Danube. Final report. Österreichische Akademie der Wissenschaften, HÖ 27/2003.
- Kling H, Fürst J, Nachtnebel HP (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, 2141-2156.
- Kundzewicz ZW, 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. GRDC Report 32. Deutschland: BfG.
- Nobilis F, Lorenz P (1997) Flood trends in Austria. In: Leavesley, G. H., Lins, H. F., Nobilis, F., Parker, R. S., Schneider, V. R. & van de Ven, F. H. M. (eds) *Destructive Water: Water-caused Natural Disasters, their Abatement and Control*, IAHS Publ. No. 239. UK: Wallingford.

Skoda G, Lorenz P (2003) Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung, Kartentafel 2.2. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, ISBN 3-85437-250-7.

Svensson C, Kundzewicz ZW, Maurer T (2004) Trends in flood and low flow series. GRDC Report 33. Deutschland: BfG.

Xu ZX, 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

Muthgasse 18, 1190 Wien

Tel. +43-1-36006 5511

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

[iwhw.boku.ac.at](http://iwhw.boku.ac.at)



# Klimawandel und sozioökonomische Veränderungen – Herausforderungen des Umgangs mit Naturgefahren in Berggebieten

*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 erhebliche 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 *Bild 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 ∅

*Bild 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 Ostalpenraums 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 hinwegtäuschen, 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 Temperaturen, 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 1.300 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 1.300 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 haben unmittelbaren Einfluss auf den Naturraum in europäischen Berggebieten:

- 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 Fluten 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 verändern (Houghton et al. 2001; Parry et al., 2007; Solomon et al., 2007).

In Hinblick auf die Ostalpen sind die wesentlichen erwarteten Änderungen in *Tabelle 1* zusammengefasst, höhere Temperaturen und eine Akzentuierung des Niederschlagsgeschehens stellen hierbei in Hinblick auf die Naturgefahrensituation die Schlüsselparameter dar.

*Tabelle 1: Wesentliche erwartete Änderungen des Klimas im Alpenraum, höhere Temperaturen und eine Akzentuierung des Niederschlagsgeschehens stellen hierbei in Hinblick auf die Naturgefahrensituation Schlüsselparameter dar (nach Angaben in Parry et al., 2007; Solomon et al., 2007)*

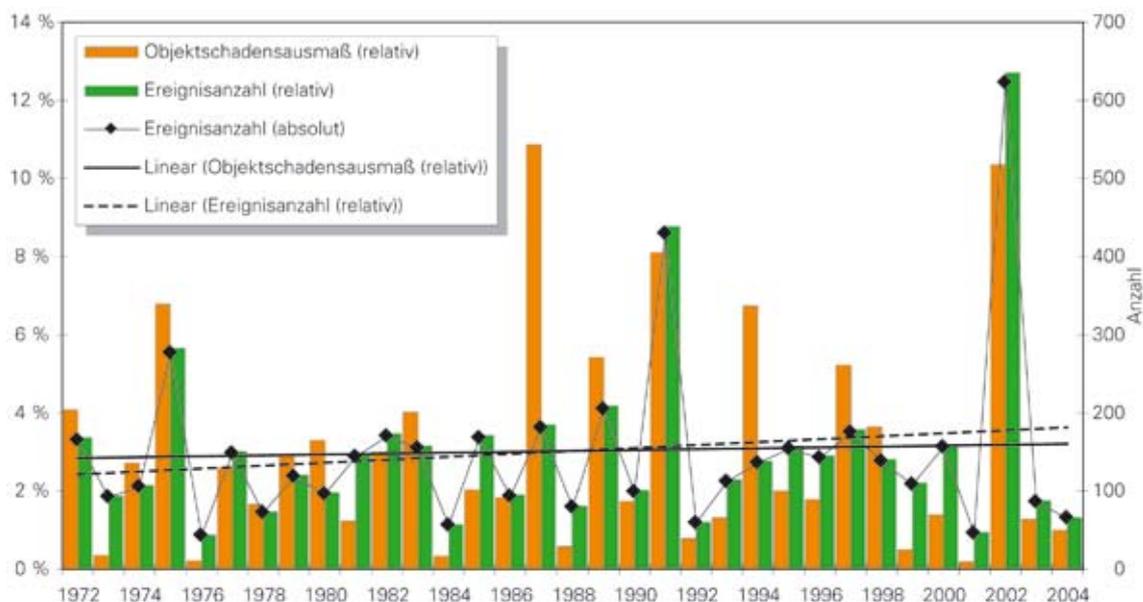
<b>Sicherheit beobachteter Veränderungen (zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts)</b>	<b>Veränderungen der Erscheinungen</b>	<b>Sicherheit projizierter Erscheinungen (während des 21. Jahrhunderts)</b>
Wahrscheinlich	Höhere Maximaltemperaturen und mehr heiße Tage über nahezu allen Landflächen	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	Höhere Minimaltemperaturen, weniger kalte Tage/Frosttage über nahezu allen Landflächen	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	Reduzierte Tag-/Nachttemperaturschwankungen über den meisten Landflächen	Sehr wahrscheinlich
Wahrscheinlich, über vielen Landflächen der mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre	Zunahme intensiverer Niederschläge, Akzentuierung des Niederschlagsgeschehens	Sehr wahrscheinlich, über vielen Gebieten

Für die im Naturraum ablaufenden Prozesse lassen sich aufgrund der projizierten bzw. prognostizierten Änderungen des Klimas ebenfalls Änderungen erwarten. Dabei wird es aufgrund der Akzentuierung der Niederschlagsereignisse vor allem zu einer Zunahme oder Steigerung von Frequenz und Magnitude bei jenen geomorphologischen Prozessen kommen, wo Wasser das Agens oder das auslösende Moment darstellt (vgl. *Tabelle 2*). 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 (Laternser & Schneebeil, 2002).

*Tabelle 2: 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 *Bild 2* ist das Ergebnis einer Analyse der Wildbachereignisse in Österreich für die Periode 1972–2004 wiedergegeben. Obwohl einige Jahre mit einer deutlich erhöhten Ereignisanzahl und entsprechend erhöhten Schadenssummen auffällig sind, kann ein genereller Trend einer Zunahme nicht bestätigt werden.



*Bild 2: Anzahl und Schäden der Wildbachereignisse in Österreich für den Zeitraum 1972–2004, N = 4894 (aus 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. *Bild 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 *Bild 4* wiedergegeben. Die langfristige Steigerung der Anzahl an Gebäuden und der zugehörigen Werte wurde auch für andere alpine Siedlungen nachgewiesen, beispielsweise in Keiler (2004) für die Ortschaft Galtür (vgl. *Bild 4*), und in Keiler et al. (2006) für weitere Orte im österreichischen Paznauntal.

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 Wohngebäude 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 der 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 an-



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

schließenden 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).

Die Anzahl der in Bergregionen anwesenden Touristen ist in den vergangenen Dekaden ebenfalls langfristig markant gestiegen, wie in *Bild 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 (*Bild 6*).

### **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 verschieden aufgelösten Zeitskalen in saisonale, wöchentliche und stündliche Variationen (vgl. *Bild 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 Lawinenakti-

# Klimawandel und sozioökonomische Veränderungen – Umgang mit Naturgefahren in Berggebieten

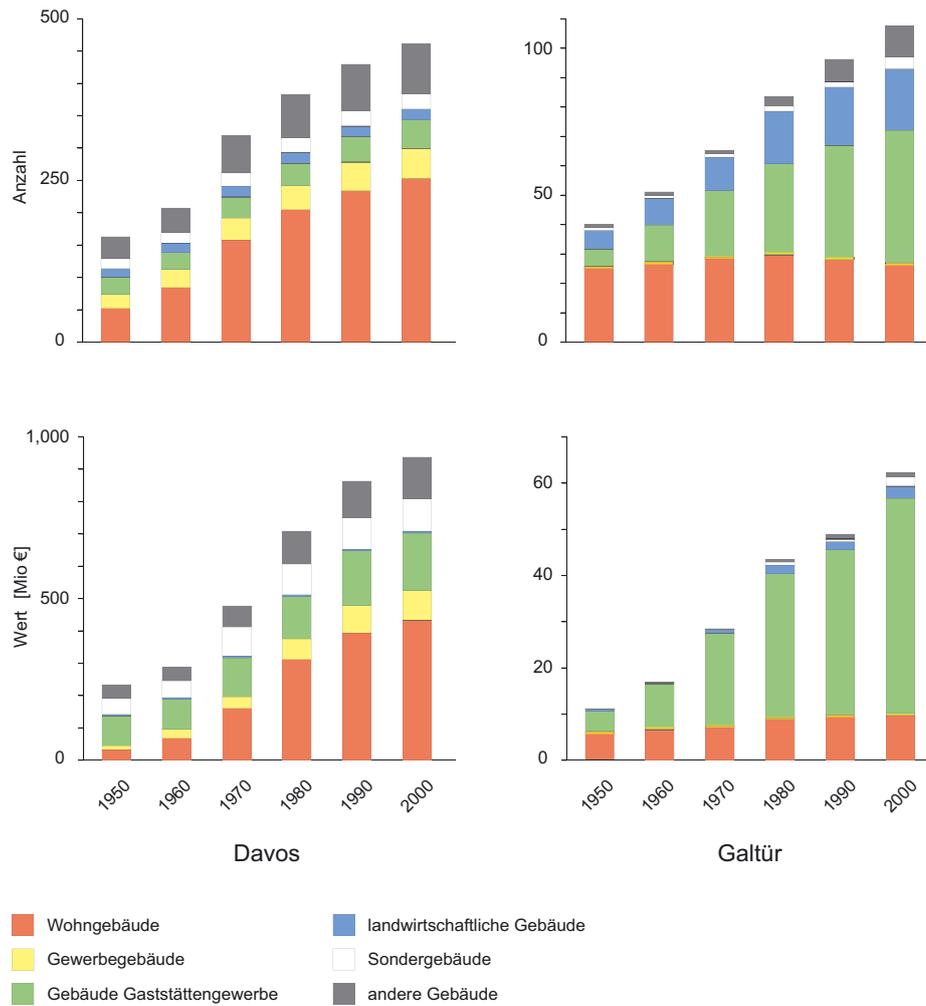


Bild 4: Steigerung der Anzahl und Werte gefährdeter Gebäude in Davos (CH, links) und Galtür (A, rechts), aus Fuchs & Keiler (2008)

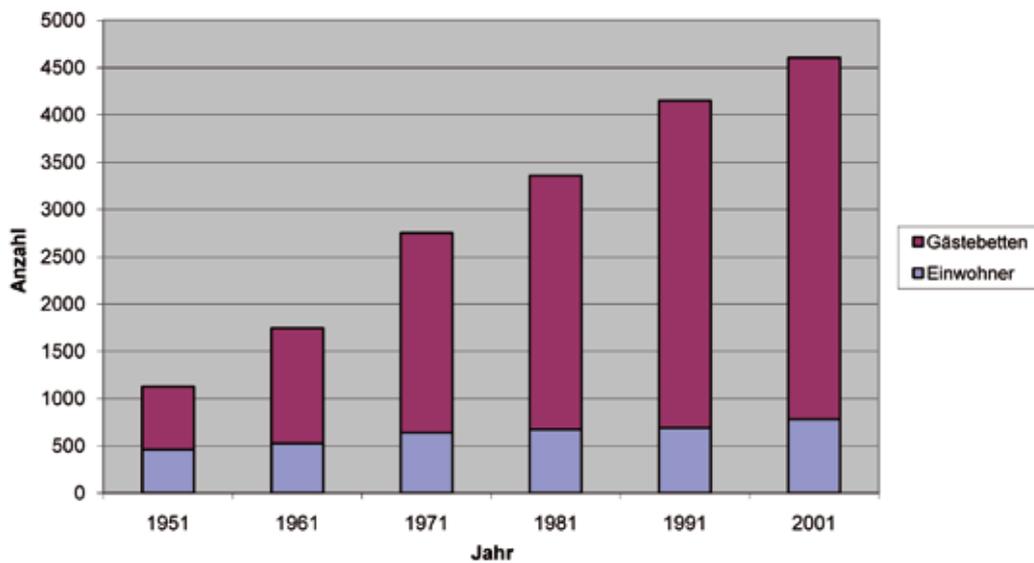


Bild 5: Entwicklung der Einwohnerzahlen und Gästebetten in Galtür für den Zeitraum 1951-2001, aus Keiler (2004)

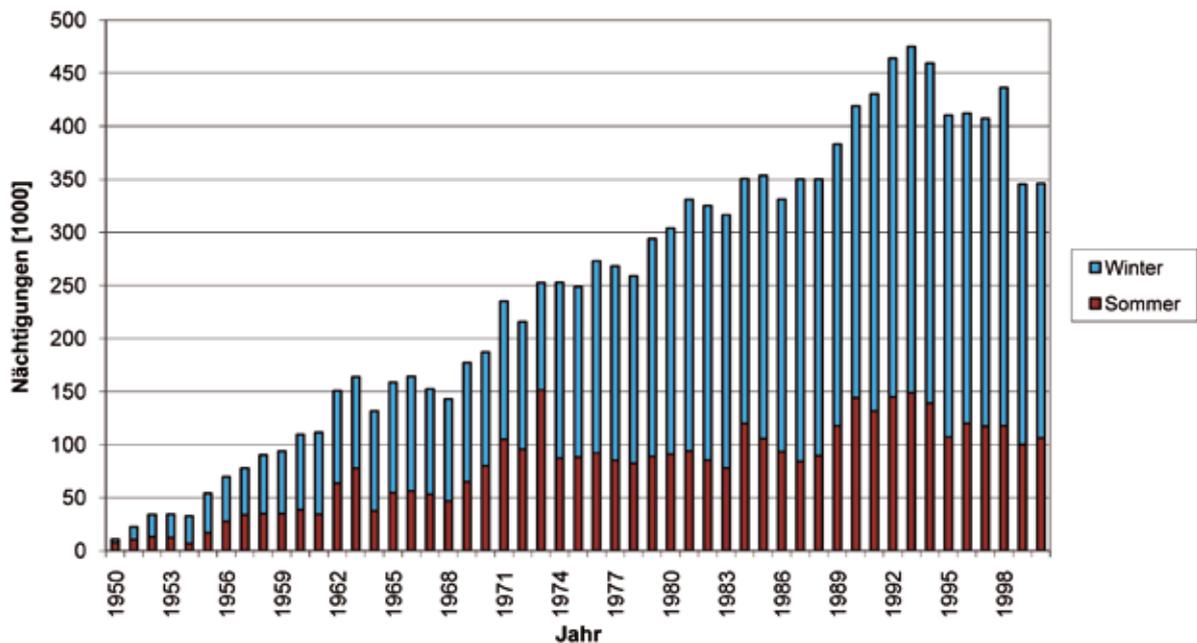


Bild 6: Entwicklung der Nächtigungszahlen in Galtür im Zeitraum 1950–2000, aus Keiler (2004)

vität 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 (Bild 7).

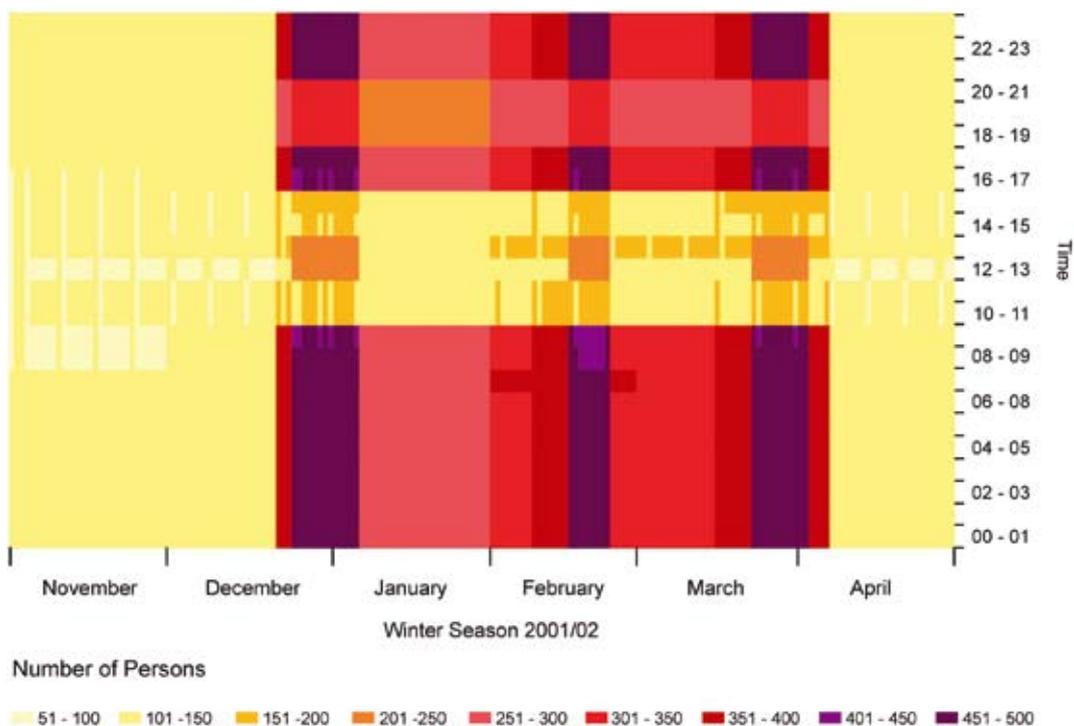


Bild 7: Saisonale, tägliche und stündliche Variationen der exponierten Personen in Galtür (Keiler et al. 2005)

## 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 Präsenzwahrscheinlichkeiten 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 beeinflussenden 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 Skale.

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 sozioökonomischer Strukturen, die in einer Erhöhung des exponierten Schadenspotenzials münden können, und hat direkten Einfluss auf die Strategien des Risikomanagements.

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.

## 5 Literatur

- 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).

- 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.
- Haerberli, W., Kääb, 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.
- Latenser, M. & Schneebeili, 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., Denzler, 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.
- 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**

Dipl.-Geogr. Dr. Sven Fuchs  
Universität für Bodenkultur Wien  
Institut für Alpine Naturgefahren  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Tel. +43-1-47654-4373  
E-Mail: sven.fuchs@boku.ac.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 CO<sub>2</sub> 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/m<sup>2</sup> 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 <sup>2</sup>	8,8 km <sup>2</sup>
Volumen	1,5 km <sup>3</sup>	0,5 km <sup>3</sup>

### 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

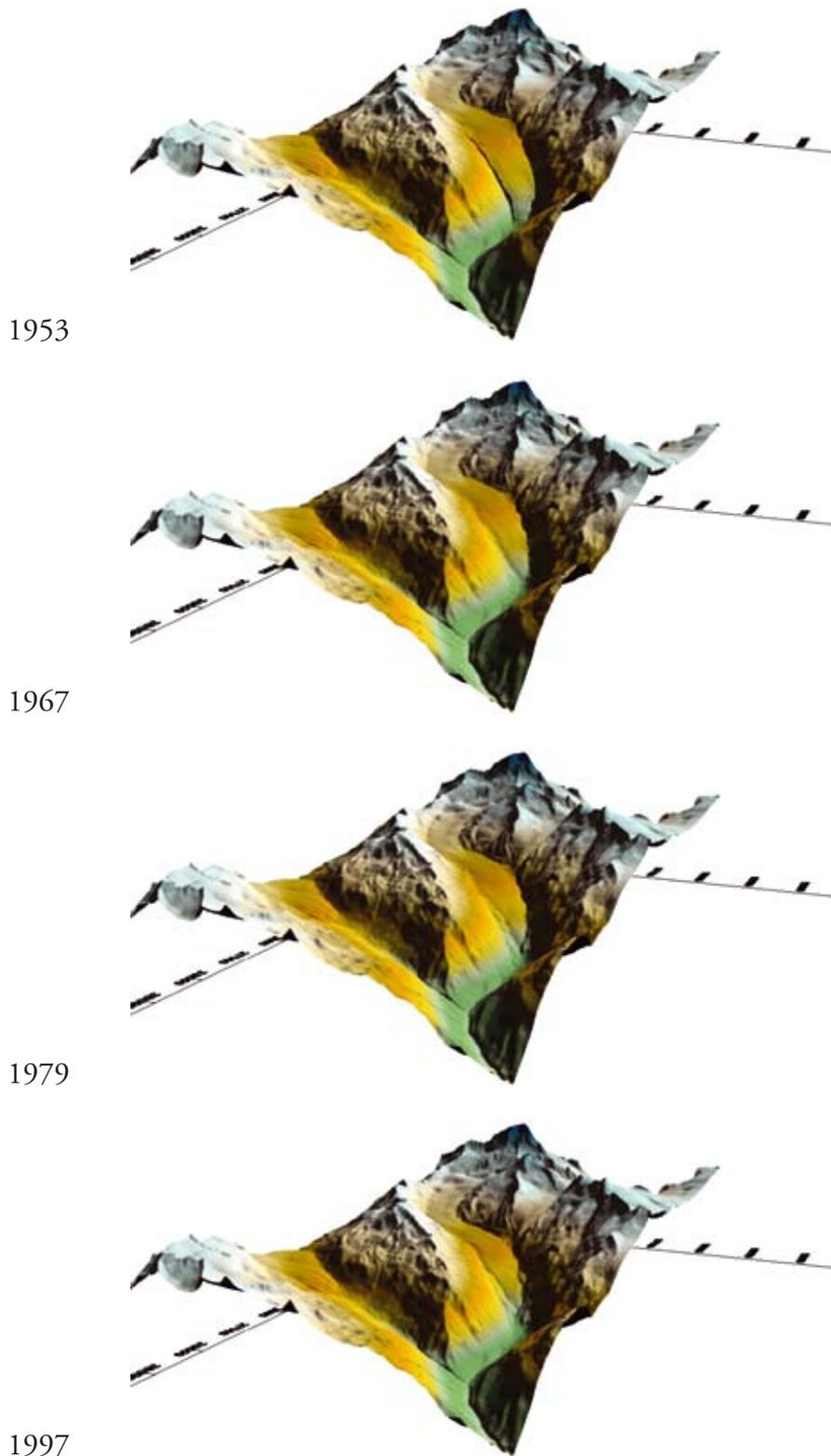
(Norbert Span, 2003)



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)*

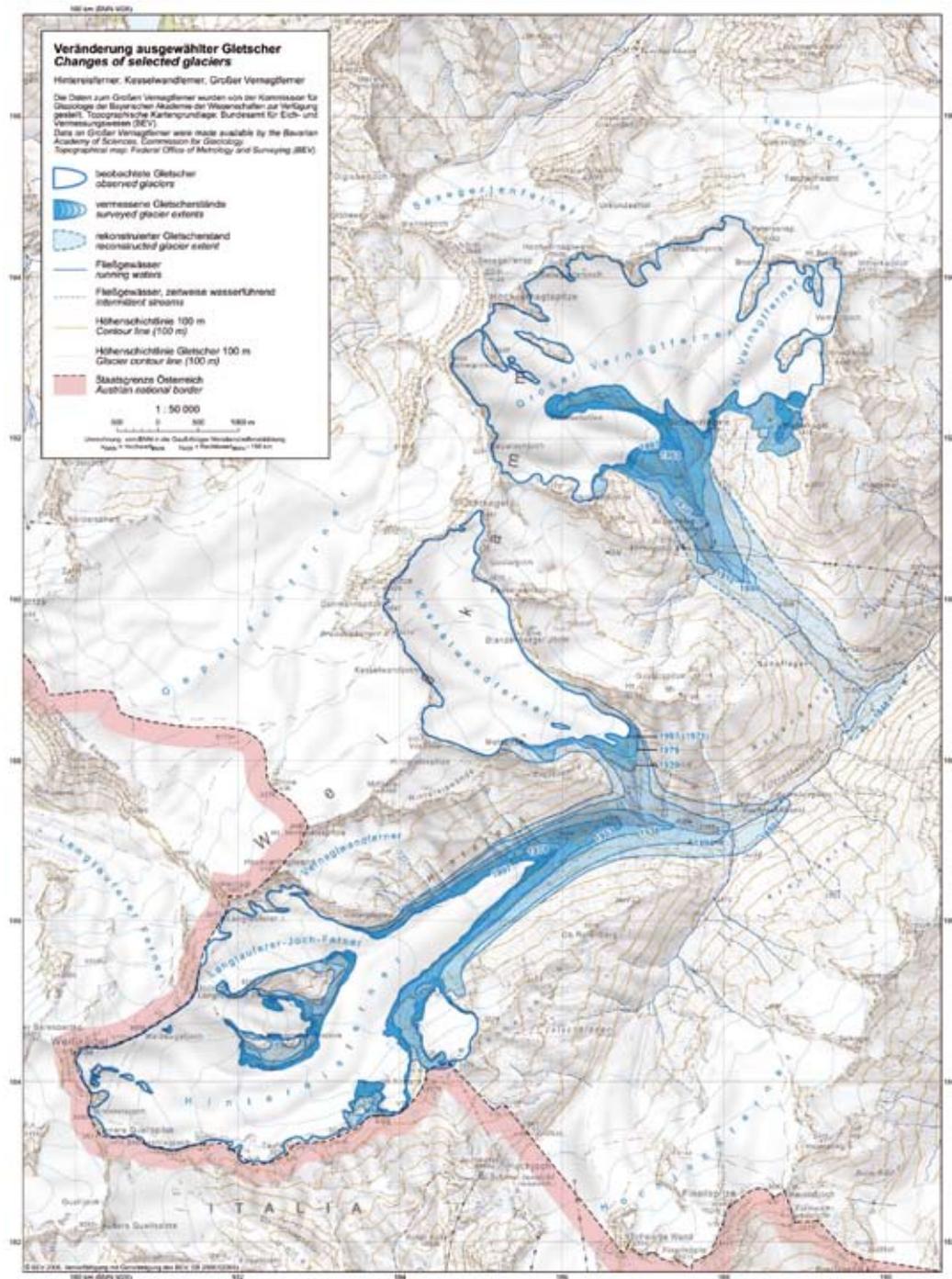


Bild 9: Die Veränderungen der drei besonders gut dokumentierten Gletscher Hintereisferner, Kesselwandferner und Vernagtferner seit ihrem Höchststand im Jahr 1848. Aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs

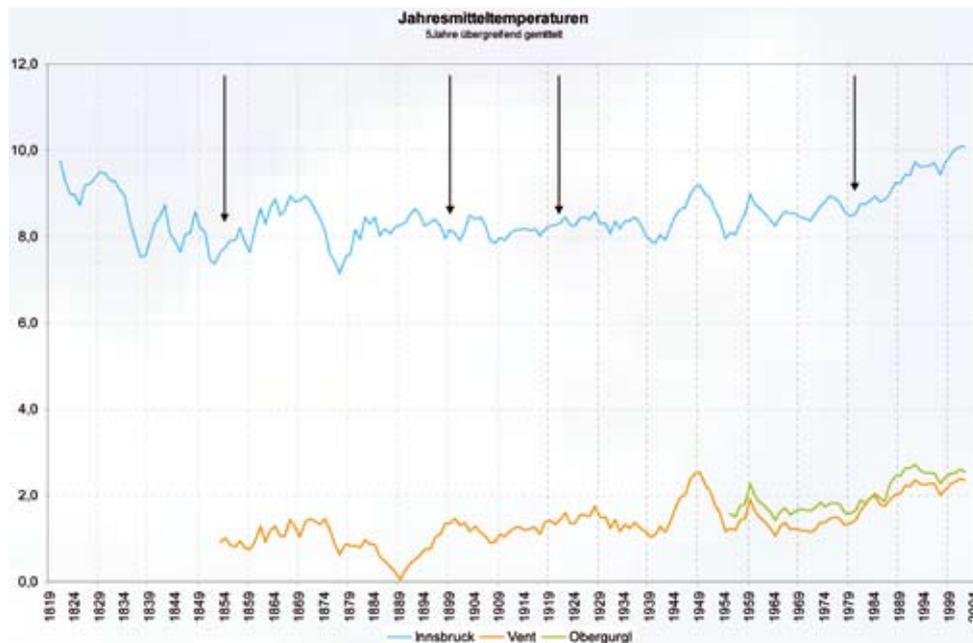


Bild 10: Die Jahresmitteltemperaturen von Innsbruck (580 m), Vent (1.900 m) und Obergurgl (1.940 m), dargestellt in fünfjährig übergreifender Mittelung. Zeitpunkt der Schwankungen und Trends stimmen in Innsbruck und den Bergstationen nicht immer überein. Die Pfeile zeigen die Zeiten allgemeiner Gletschervorstöße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

### Höhe, Größe und Topographie bestimmen individuelle Massenbilanzen

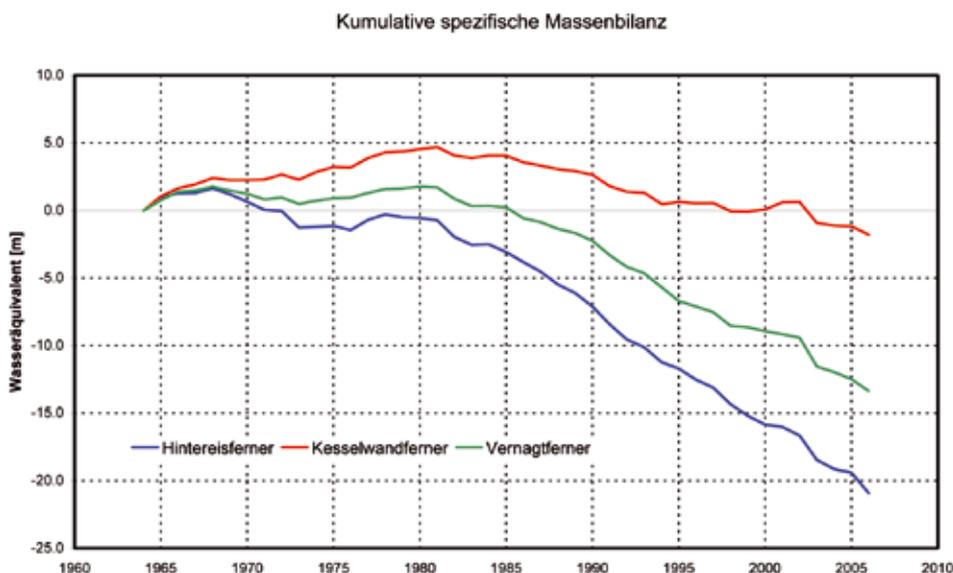


Bild 11: Die relative Änderung der mittleren spezifischen Massenbilanzen der drei Gletscher von Bild 9. Vom Herbst 1964 bis zum Herbst 2007 hat der Hintereisferner 21 m Wasseräquivalent verloren, das sind ca. 23 m Eisdicke über den ganzen Gletscher gemittelt. Seine Zunge hat dabei mehr als das Doppelte 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

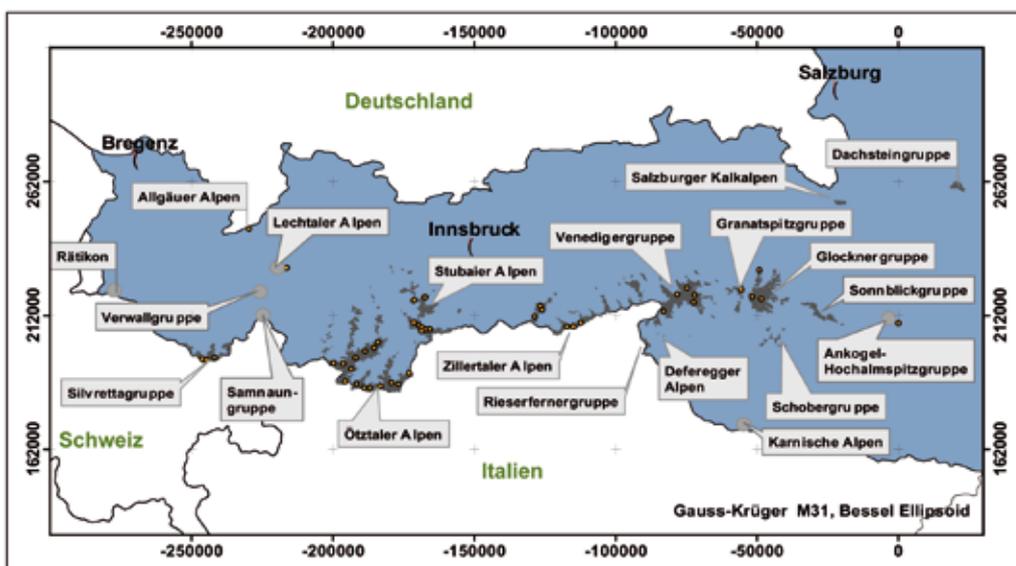


Bild 12: Übersicht über die Gletscher Österreichs, die in den Inventaren von 1969 und 1998 erfasst sind. Die gelben Punkte zeigen die Gletscher an, deren Eisdicke mit Radar gemessen wurde (Bearbeitung: Dr. Astrid Lambrecht)

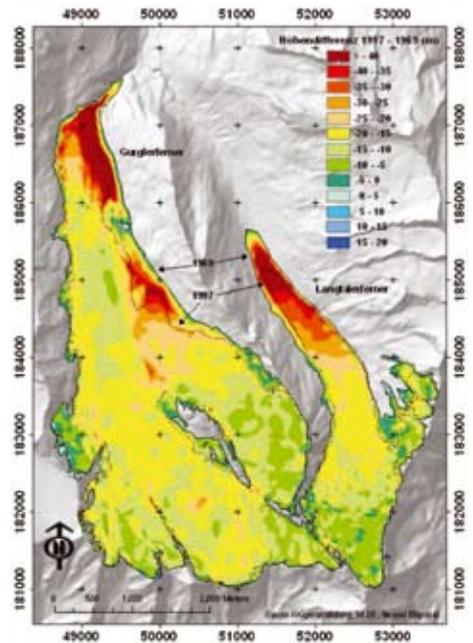
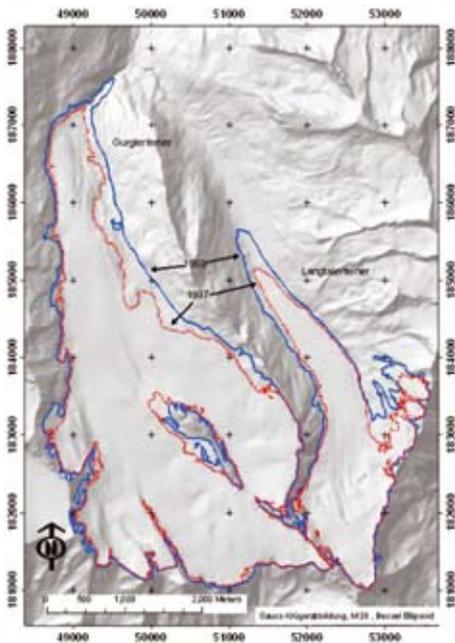
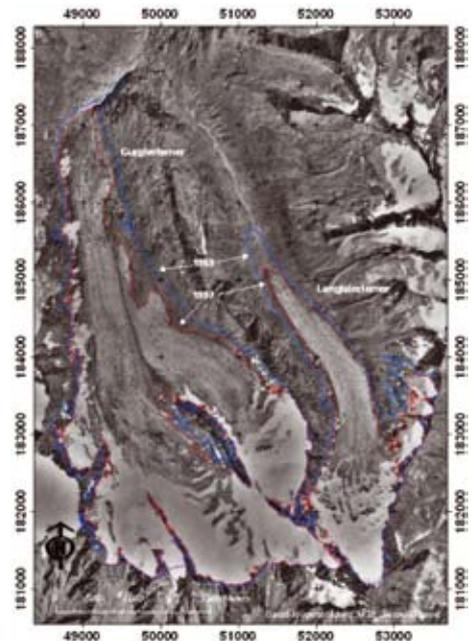


Bild 13: Luftaufnahme des Längentaler Ferners (links) und des Gurglerferners am 20.9.06, die Bildmitte liegt bei 11° 00' E, 46° 48' N, Blickrichtung nach Süden

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)

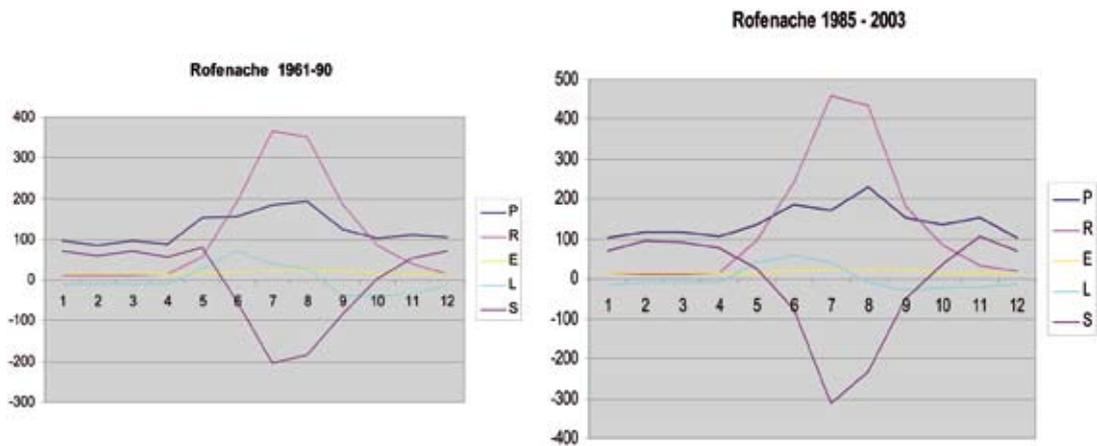


Bild 17: Änderung der Wasserbilanz des Einzugsgebiets des Pegels Vent-Rofenache ( $10^{\circ} 54' 40''$  E,  $46^{\circ} 51' 27''$  N, ca. 1.900 m), in mm pro Monat in den Perioden 1961–90 und 1985–2003. Niederschlag P, Abfluss R, Verdunstung E, Speicher S, davon flüssiger Speicher L. Die starke Zunahme 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

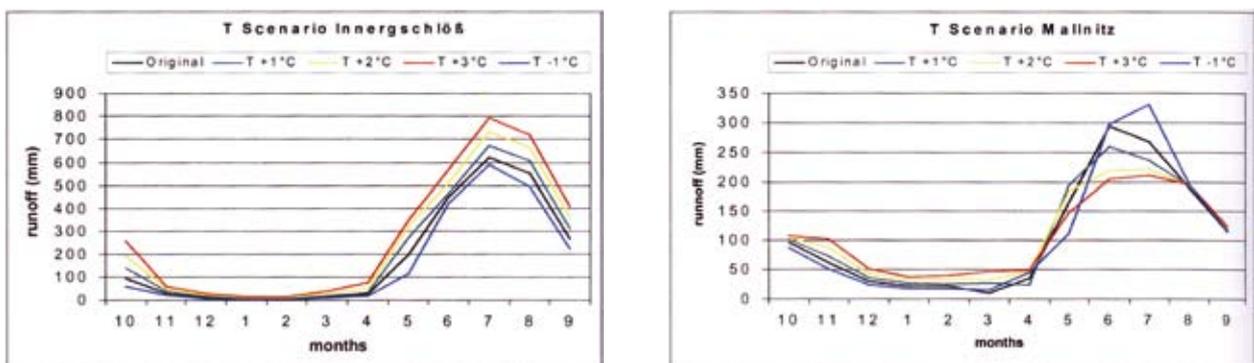


Bild 18 und 19: Mittelwerte 1961–1990 der monatlichen Abflüsse des Pegels Innerschloß ( $12^{\circ} 27' E$ ,  $47^{\circ} 07' N$ , 1.686 m) und Szenarien für geänderte Temperaturen. In diesem stark (ca. 38 %) vergletscherten Einzugsgebiet bleibt auch bei einer Erwärmung um 3 °C die Abflussspitze in den 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

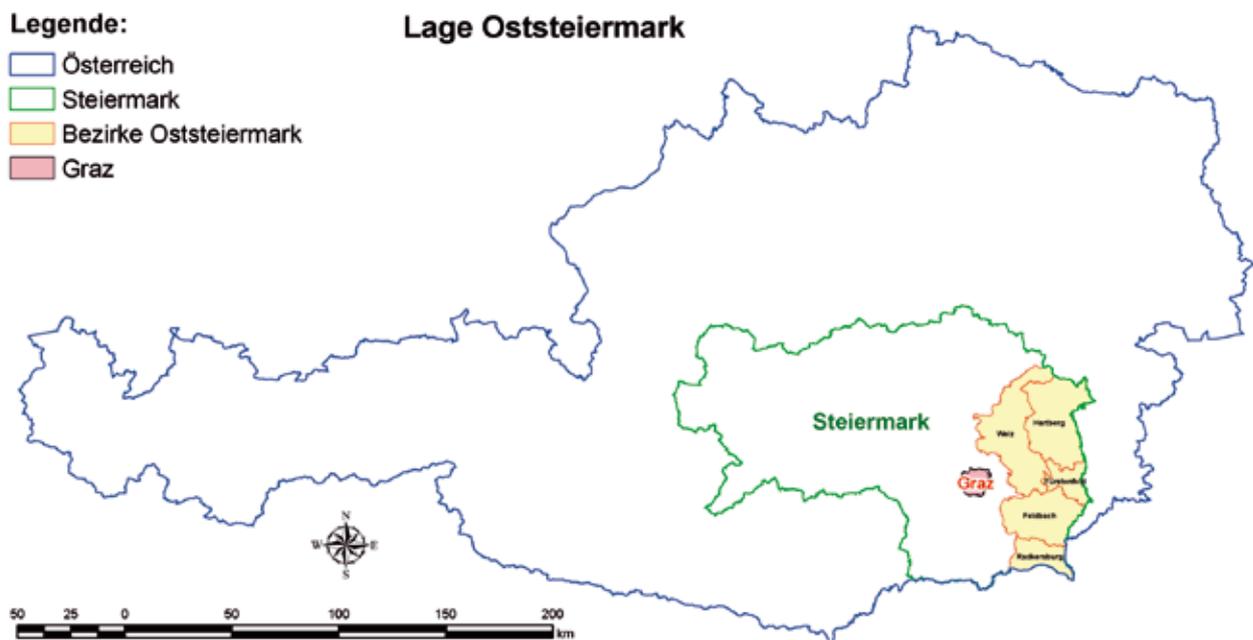
# Klimatische Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Wasserversorgung in der Oststeiermark

Andreas Dalla-Via

## 1 Einleitung

Der folgende Beitrag stellt eine Kurzzusammenfassung der Kapitel Klima, Grundwasserhydrologie und Wasserversorgung des Buches „Wasser & Wirtschaft im Klimawandel – Konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark“ von Pretenthaler & Dalla-Via (2007) dar. Auf die wirtschaftlichen Aspekte wird kurz im Kap. 8 eingegangen.

Laut IPCC (2001) ist im 20. Jahrhundert die Lufttemperatur im globalen Mittel um etwa 0,6 °C angestiegen. Im alpinen Raum stiegen die Temperaturen um rund 1,8 °C. Neben den, auch in der Oststeiermark (siehe *Bild 1*) feststellbaren tendenziellen Temperaturerhöhungen kam es in großen Teilen des oststeirischen Hügellandes seit Beginn der 1990er-Jahre zu einem tendenziellen Rückgang der Niederschläge. An der Station Sinabelkirchen beispielsweise lagen die Niederschläge in den Jahren 2000 bis 2003 durchschnittlich 21 % unter dem langjährigen Mittel (1900–1990). In Abhängigkeit von den Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgase ist laut IPCC (2001) mit einer globalen Temperaturerhöhung von 1,3–5,8 °C in den nächsten 100 Jahren zu rechnen.



*Bild 1: Lage der Oststeiermark*

Für Österreich ergeben Regionalisierungen der globalen Klimamodelle Temperaturzunahmen von bis zu 3 °C in den nächsten 50 Jahren (Formayer et al., 2004 in Kromp-Kolb, 2004). Diese für die Grundwasserneubildung und den Wasserbedarf aus Sicht der Wasserwirtschaft negativen klimatischen Entwicklungen haben zu Maßnahmen seitens der kommunalen Wasserversorger und der Wasserwirtschaft des Landes Steiermark in der Oststeiermark geführt.

## 2 Wasserversorgungsstruktur

Die drei Hauptsäulen der privaten und kommunalen Wasserversorgung in der Oststeiermark sind seicht liegendes Porengrundwasser, Tiefengrundwasser und Quellen. Je nach Lage ist ihre Bedeutung für die Wasserversorgung im Untersuchungsgebiet sehr unterschiedlich.

Aufgrund der klimatisch und hydrogeologisch sehr ungünstigen Verhältnisse (vergleichsweise geringe und rückläufige Grundwasserneubildung, geringe Durchlässigkeiten und Grundwassermächtigkeiten sowie vielerorts unzureichende Wasserqualität) sind die seicht liegenden meist ungespannten Grundwasserkörper der oststeirischen Haupttäler in der Regel nur für private Einzelwasserversorgungen und nicht für kommunale Wasserversorgungen geeignet.

Im Unteren Murtal herrschen hingegen günstigere hydrogeologische Verhältnisse. Aufgrund umfangreicher Untersuchungen im Unteren Murtal – zusammengefasst in Fank et al. 2002 und Fank et al. 2003 – wurden neue Standorte für kommunale Brunnenanlagen vorgeschlagen und die Planungsgrundlagen erarbeitet. Unter Berücksichtigung von Grundwasserqualität, Ökologie und Landwirtschaft sind im Unteren Murtal jedoch keine weiteren umfangreichen Entnahmen mehr möglich.

Das Quellwasserangebot im oststeirischen Randgebirge wurde in einer Studie von Harum et al., 2001 untersucht. Demnach ist im oststeirischen Randgebirge zwar noch zukünftig nachhaltig nutzbares Quellwasser vorhanden, die praktische Nutzbarkeit dieser Ressourcen ist jedoch aufgrund der großen Entfernungen und des geringen Wasserangebotes pro Flächeneinheit sehr beschränkt.

Im Projekt NANUTIWA wurden „Grundlagen für die nachhaltige Nutzung von Tiefenwasser im oststeirischen und pannonischen Becken“ im Raabeinzugsgebiet erhoben (Domberger et al., 2004). Auch südlich des Raabeinzugsgebietes wird Tiefengrundwasser für kommunale Wasserversorgung genutzt. Analysen zeigen an einigen Brunnen rückläufige Dargebottrends (Dalla-Via & Fank, 2006). Eine Gesamtbewertung der zukünftigen Erschließungs- und Nutzungsmöglichkeiten von Tiefengrundwässern im Untersuchungsgebiet gestaltet sich jedoch aufgrund des heterogenen Untergrundaufbaues, der schwer quantifizierbaren Neubildungsmechanismen, der weiträumigen hydraulischen Zusammenhänge und der zur Zeit noch unzureichenden Datenbasis äußerst schwierig.

## 3 Beobachtete klimatische Entwicklungen

Laut Klimadaten des Hydrographischen Dienstes der Steiermark sind im oststeirischen Randgebirge und Unteren Murtal keine signifikanten Trends zur Niederschlagsabnahme festzustellen. Signifikante Rückgänge der-Jahressummen des Niederschlags sind jedoch im oststeirischen Riedelland zu verzeichnen. An der Station Sinabelkirchen fiel zwischen 1991 und 2003 durchschnittlich 11 % weniger als im langjährigen Mittel (1900–1990). Bezüglich der Lufttemperaturen ist an allen untersuchten Stationen vom Bergland bis ins Untere Murtal ein Anstieg festzustellen, wobei dieser im oststeirischen Riedelland am stärksten ist.

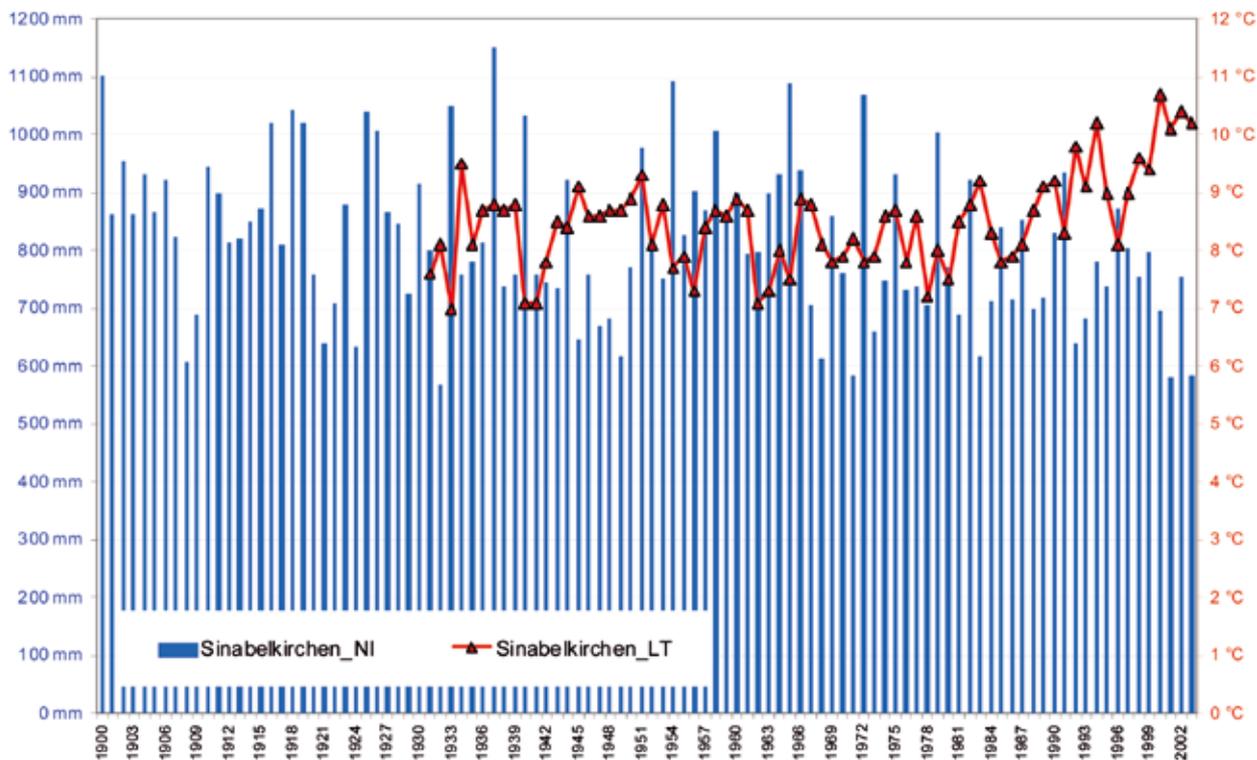


Bild 2: Jahressummen des Niederschlags (1900–2003) und Jahresmittel der Lufttemperatur (1931–2003) an der Station Sinabelkirchen im oststeirischen Hügelland

Tabelle 1: Vergleich von mittleren Lufttemperaturen und mittleren Jahressummen des Niederschlags des Zeitraums 1991–2003 mit der Periode 1961–1990 (Datengrundlage: Klimadaten des Hydrographischen Dienstes der Steiermark) \*ab 1983

Vgl. 1961–1990 / 1991–2003	Seehöhe	Lage	Lufttemperatur Jahresmittel	Niederschlag Jahressumme
Vorau	690	Bergland		– 1 mm
St. Jakob im Walde	922	Bergland	+ 0,85 °C*	+ 66 mm
St. Johann b. H.	410	Bergland/Riedelland	+ 0,48 °C	– 1 mm
Sinabelkirchen	350	Riedelland	+ 1,33 °C	– 58 mm
Zelting	200	Unteres Murtal	+ 0,83 °C	+ 1 mm

#### 4 Klimaszenario für die 2040er-Jahre für die Oststeiermark

In Österreich werden die Möglichkeiten der regionalen Klimamodellierung und ihrer Anwendbarkeit auf den Alpenraum seit Mitte 2003 im Projekt reclip:more (Research for Climate Protection: Model Run Evaluation) untersucht (Gobiet et al., 2004; Loibl et al., 2004; Truhetz et al., 2005). Für das Projekt „Wasser & Wirtschaft im Klimawandel“ – Prettenthaler & Dalla-Via (2007) wurde von Gobiet & Truhetz im Rahmen von reclip:more einerseits eine möglichst realistische Analyse des Klimas für den Zeitraum 1981–1990 erstellt, indem das RCM in so genannte Re-Analysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ERA-40) eingebettet

tet wurde. Diese Klimaanalyse kann mit entsprechenden Klimabeobachtungen verglichen werden und bietet daher auch die Grundlage der Methodenevaluierung. Andererseits wird das RCM mit Randbedingungen aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) angetrieben, um ein regionales Szenario für 2041–2050 basierend auf dem Emissionsszenario IS92a (Leggett et al., 1992) und dem dazugehörigen Kontrolllauf zu erzeugen.

Das Klimaänderungssignal wird aus Differenzen zwischen zwei mit Randbedingungen aus einem globalen Klimamodell angetriebenen regionalen Klimasimulationen abgeleitet. Die erste Simulation beschreibt die Referenzperiode (1981–1990, „Kontrolllauf“) und die zweite ein Jahrzehnt in der Zukunft (2041–2050, „Szenario“). Die Klimaänderungssignale können in Folge zum Klima der Referenzperiode (1981–1990) addiert werden, um ein Klimaszenario für die 2040er-Jahre zu generieren.

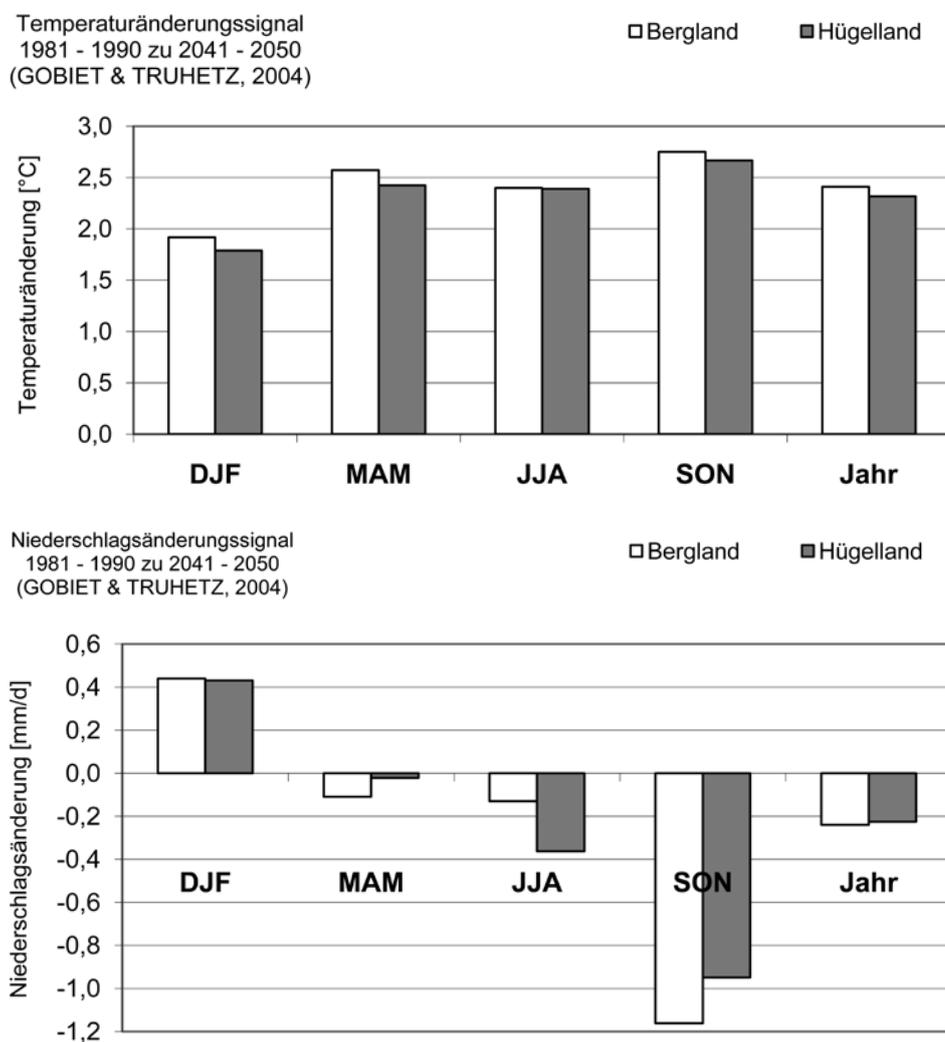


Bild 3: Saisonales Temperatur- (oben) und Niederschlagsänderungsszenario (unten) 1981–1990 verglichen mit 2041–2050. DJF: Dez., Jän., Feb.; MAM: März, Apr., Mai; JJA: Juni, Juli, Aug.; SON: Sep., Okt., Nov.; Jahr: Jahresmittelwert

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg um 1.8–2.8 °C mit geringerer Erwärmung im Winter und Spitzenwerten im Herbst. Generell zeigt die Simulation eine etwas stärkere

Erwärmung im Bergland ( $\sim 0.1$  °C), allerdings ist dieser Unterschied nicht als signifikant zu betrachten. Der simulierte Temperaturanstieg um etwa  $2.4$  °C liegt weit über den Fehlergrenzen der Methode und kann als gut abgesicherte Vorhersage gesehen werden.

Die zu erwartende Änderung des Niederschlags weist jahreszeitlich große Unterschiede auf, wobei im Winter eher mehr Niederschlag zu erwarten ist ( $0.4$  mm/d,  $\sim 30$  %) und im Herbst deutlich weniger (bis zu  $-1.2$  mm/d,  $\sim 45$  %). Im Jahresmittel wurde eine leichte Abnahme des Niederschlags simuliert ( $-0.2$  mm/d,  $< 10$  %), allerdings kann dieser Wert nicht als signifikant angesehen werden. Die simulierten Niederschlagsänderungen im Winter und Herbst bewegen sich über den grob abgeschätzten Unsicherheiten der Methode und sollten ernst genommen werden (indem ihre Auswirkungen auf die Wasserversorgung analysiert werden), allerdings sind sie als ein mögliches Szenario und nicht als Vorhersage im strengen Sinne zu betrachten.

## 5 Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung

Die flächenhafte Grundwasserneubildung aus infiltrierendem Niederschlag stellt den wichtigsten Inputfaktor für das Grundwasser dar. Neben klimatischen Parametern wird die Grundwasserneubildungsmenge u. a. auch stark von Landnutzung und Speichervermögen der Böden bestimmt. Auf Basis von Klimaszenariorechnungen für die 2040er-Jahre (Änderungssignale gegenüber 1980er-Jahre) von Gobiet & Truhetz siehe Kap. 4 wurde das Ausmaß der Reduktionen der Grundwasserneubildung gegenüber dem Referenzzeitraum mittels einiger einfacher empirischer Methoden untersucht.

Auf Maisflächen mit Winterbrache würde die Reduktion der Grundwasserneubildung (1980er- gegenüber 2040er-Jahre) nach der Methode von Renger & Wessolek (1990) beispielsweise zwischen  $18$  und  $46$  % betragen. Bei Maisflächen ohne Winterbegrünung würde die Reduktion der Grundwasserneubildung berechnet mittels Haude-Einschichtbilanzmodell in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (nFk) zwischen  $31$  und  $45$  % bzw.  $87$  und  $118$  mm liegen (siehe *Tabelle 2*). Bei Grünland beträgt die Reduktion der Grundwasserneubildung je nach nFk zwischen  $28$  und  $66$  % (siehe *Tabelle 3*).

*Tabelle 2: Reduktion der Grundwasserneubildung an der Station Fürstenfeld für Maisflächen ohne Winterbegrünung bei ausgewählten nutzbaren Feldkapazitäten in den 2040er-Jahren gegenüber den 1980er-Jahren nach dem Haude-Einschichtbilanzmodell*

Landnutzung	nFk	GWNB_JS_1980er	GWNB_JS_2040er	Reduktion	Diff_mm
Mais – Winterbrache	70	285	198	31 %	87
Mais – Winterbrache	100	273	172	37 %	102
Mais – Winterbrache	135	267	150	44 %	117
Mais – Winterbrache	170	263	145	45 %	118
MW:		<b>272</b>	<b>166</b>	<b>39 %</b>	<b>106</b>

Tabelle 3: Reduktion der Grundwasserneubildung an der Station Fürstenfeld für Grünlandflächen bei ausgewählten nutzbaren Feldkapazitäten in den 2040er-Jahren gegenüber den 1980er-Jahren nach dem Haude-Einschichtbilanzmodell

Landnutzung	nFk	GWNB_JS_1980er	GWNB_JS_2040er	Reduktion	Diff_mm
Grünland	70	146	105	28 %	41
Grünland	100	114	72	37 %	42
Grünland	135	83	43	49 %	41
Grünland	170	63	21	66 %	42
MW:		<b>101</b>	<b>60</b>	<b>45 %</b>	<b>41</b>

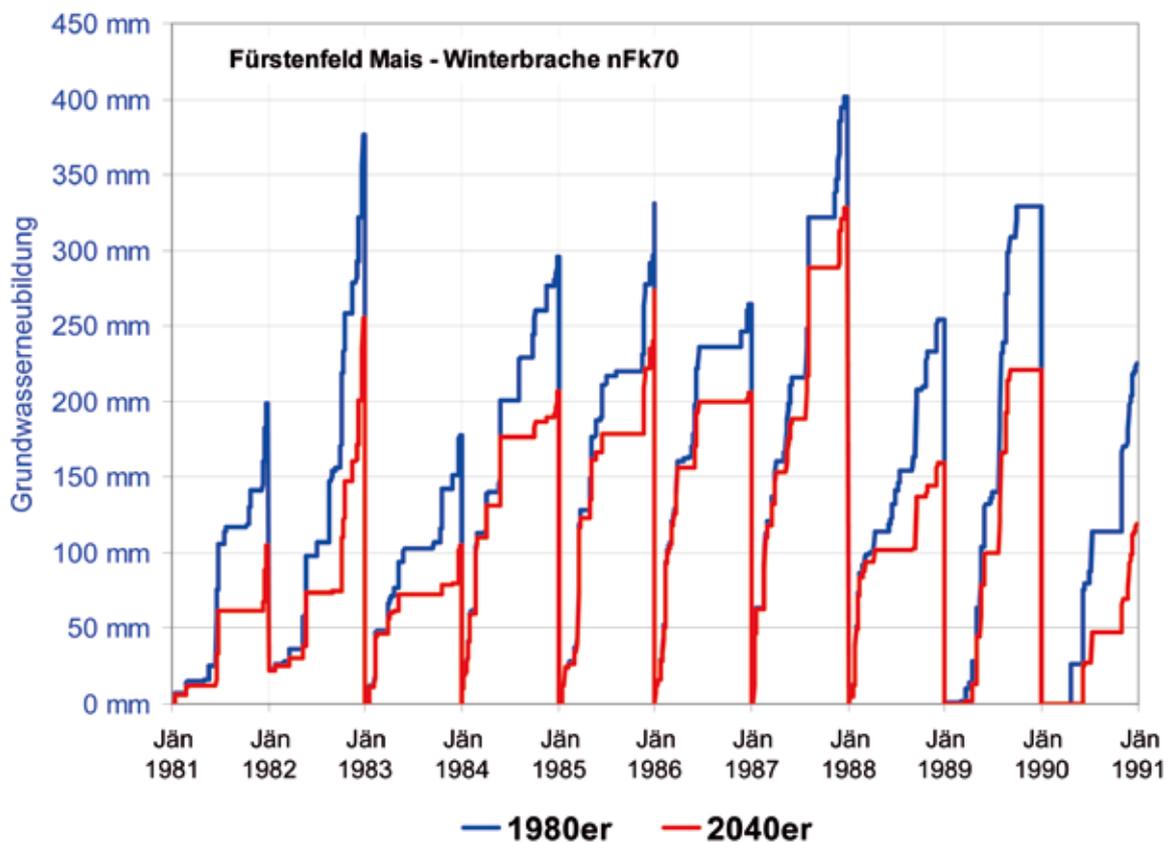


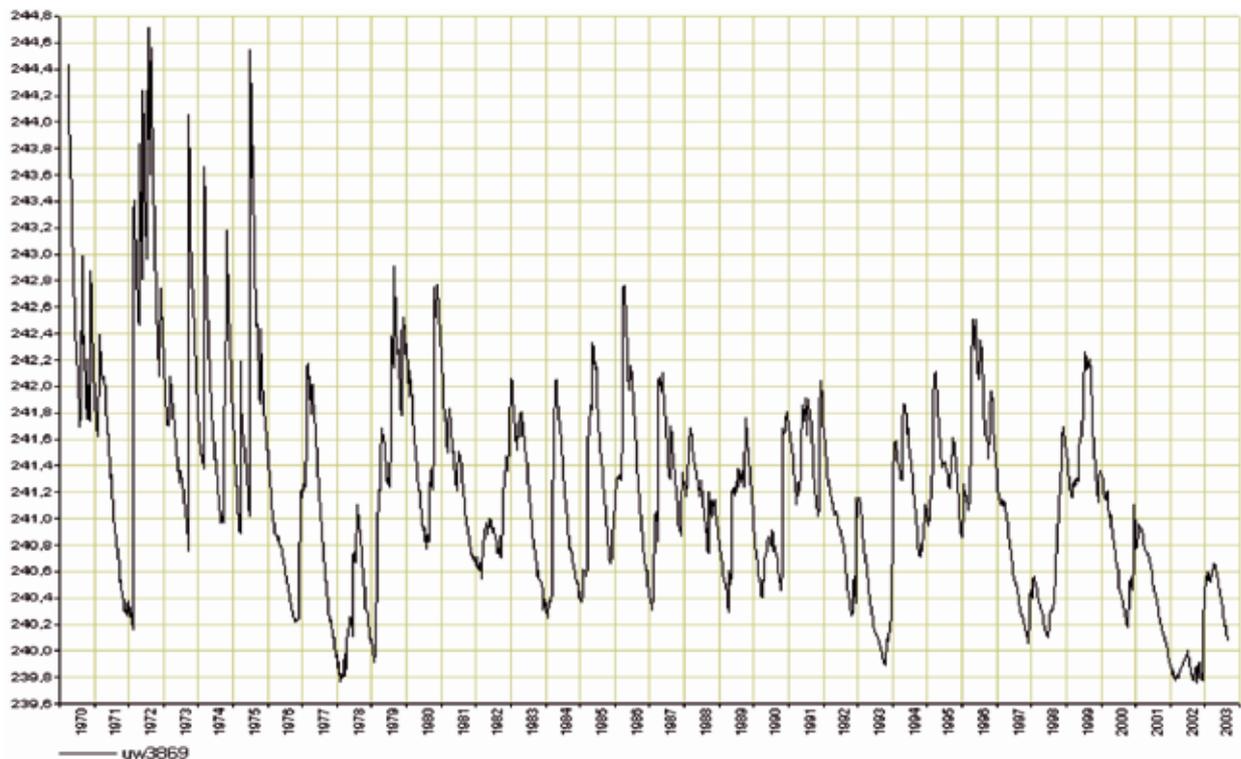
Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung an der Station Fürstenfeld für Maisflächen ohne Winterbegrünung bei einer nutzbaren Feldkapazität von 70 mm (Methode: Haude-Einschichtbilanzmodell) in den 1980er- und 2040er-Jahren im Vergleich

## 6 Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen

Vom Hydrographischen Dienst der Steiermark wird in der Oststeiermark und im Unteren Murtal seit etwa Mitte der 1960er-Jahre ein, je nach wasserwirtschaftlicher Bedeutung, mehr oder weniger dichtes Grundwassermessstellennetz betrieben. Aufgrund der jeweils individuellen Randbedingungen (Grundwasserneubildung, Lage zu Oberflächengewässer oder beeinflussende Grundwas-

serentnahmen) stellt sich die Grundwasserdynamik an jeder Messstelle mehr oder weniger unterschiedlich dar.

Eine Analyse von Grundwasserständen ausgewählter Grundwassermessstellen in den periglazialen Haupttälern der Oststeiermark (Pegel 5269 im Raabtal, der Pegel 5791 im unteren Ilztal) im Niederwasserbereich zeigt, dass zwischen 1991 und 2003 die niedrigsten Grundwasserstände seit Mitte der 1960er-Jahre (Beginn der Aufzeichnungen) erreicht wurden. Die tiefsten Grundwasserstände waren in den Jahren 1992, 1993, 2000, 2001, 2002 und 2003 zu verzeichnen. Die Grundwasserstände in den letzten Jahren bis 2003 waren zwar nicht deutlich tiefer als zu Beginn der 1990er-Jahre, doch ist die Häufung von extrem niedrigen Grundwasserständen und die vergleichsweise lange Dauer der Grundwassertiefstandsphasen (insbesondere 2002) auffallend.



*Bild 5: Grundwasserganglinie am Pegel 3869 (auf Niederterrasse nördlich von Lichendorf) von 1970 bis 2003 im Unteren Murtal*

Auf der Niederterrasse des Unteren Murtals, welche im Vergleich zur Auzone nur geringfügig vom Abflussgeschehen der Mur beeinflusst ist, befindet sich die Grundwassermessstelle 3869 des Hydrographischen Dienstes der Steiermark, an der bereits seit 1970 ununterbrochen Grundwasserspiegellagen aufgezeichnet wurden. Eine Analyse zeigt, dass es hier in den Jahren 1977 und 1978 etwa gleich niedrige Grundwasserstände wie 2002 bzw. 2003 gegeben hat, doch ist es auch hier die zunehmende Häufung und Dauer von niedrigen Grundwasserständen, die in den letzten Jahren auffällt.

In Anbetracht der klimatischen Zukunftsszenarien (siehe Kap. 4) und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung (siehe Kap. 5) ist künftig eine Häufung von niedrigen und tendenziell fallenden Grundwasserständen im oststeirischen Riedelland zu erwarten.

## 7 Auswirkungen auf den Wasserbedarf und die Wasserversorgung

Extrem heiße und trockene Sommer wie zwischen 2000 und 2003 führten in der Oststeiermark zu starken Rückgängen des Grundwasserspiegels, wobei in Teilen des Untersuchungsgebietes Rekordtiefststände seit Beginn der Aufzeichnungen in den 1960er-Jahren erreicht wurden. Gleichzeitig stieg der Spitzenbedarf an Wasser in den Sommermonaten stark an. Die Ursache für den erhöhten Bedarf an Wasser seitens der kommunalen Versorgung bestand darin, dass zahlreiche private Brunnen, welche seicht liegendes Porengrundwasser erschroten, über vergleichsweise geringe mittlere Wasserstände und geringe Durchlässigkeiten verfügen. Das bedeutet, dass sich der gleiche Absenkungsbetrag des Grundwasserspiegels in den periglazialen Tälern der Oststeiermark in der Regel wesentlich stärker auswirkt als beispielsweise im Grazer Feld. Dies führte dazu, dass zahlreiche Haushalte oder Betriebe mit ihren privaten Brunnen nicht das Auslangen fanden und an die kommunale Wasserversorgung anschließen mussten. Nur durch zusätzliches externes Wasser und die Errichtung von neuen Brunnenanlagen im Unteren Murtal war es möglich, die Versorgung aufrecht zu erhalten.

Aus Befragungen von Wasserversorgern (2005) zur Versorgungssituation im Jahre 2003 (Dalla-Via in Pretenthaler & Dalla-Via, 2007) geht hervor, dass die überwiegende Zahl der Wasserversorger 2003 die Versorgungsgrenze erreichte.

Aufgrund des für die Oststeiermark vorliegenden Klimaszenarios (siehe Kap. 4) und der daraus folgenden Reduktion der Grundwasserneubildung (siehe Kap. 5) ist von einer weiteren Erhöhung der Anschlussdichten auszugehen.

Zukünftige „Trockenjahre“ werden sich aus grundwasserhydrologischer Sicht deshalb besonders negativ auswirken, weil bei vorliegenden klimatischen Szenarien die mittleren Grundwasserstände sinken würden und somit für derartige Extremereignisse die notwendigen Reserven fehlen. Dies trifft in gleicher Weise sowohl kommunale als auch private kleinere Brunnenanlagen oder Quellen. Das heißt, dass es in derartigen Trockenperioden zu weiteren Neuanschlüssen an das kommunale Wasserversorgungsnetz kommen wird.

Dazu kommt, dass zahlreiche Haushalte mit einem öffentlichen Wasseranschluss zusätzlich über einen Hausbrunnen verfügen und diesen vorwiegend für Brauchwasserzwecke nutzen. Gerade in Trockenperioden stehen diese privaten Wasserressourcen in einem noch geringeren Ausmaß zur Verfügung (weiteres Absinken des Grundwasserspiegels), wodurch es trotz eventuell schon hoher Anschlussdichte (> 90 %) zu einer weiteren temporären Erhöhung des Spitzenbedarfes kommt.

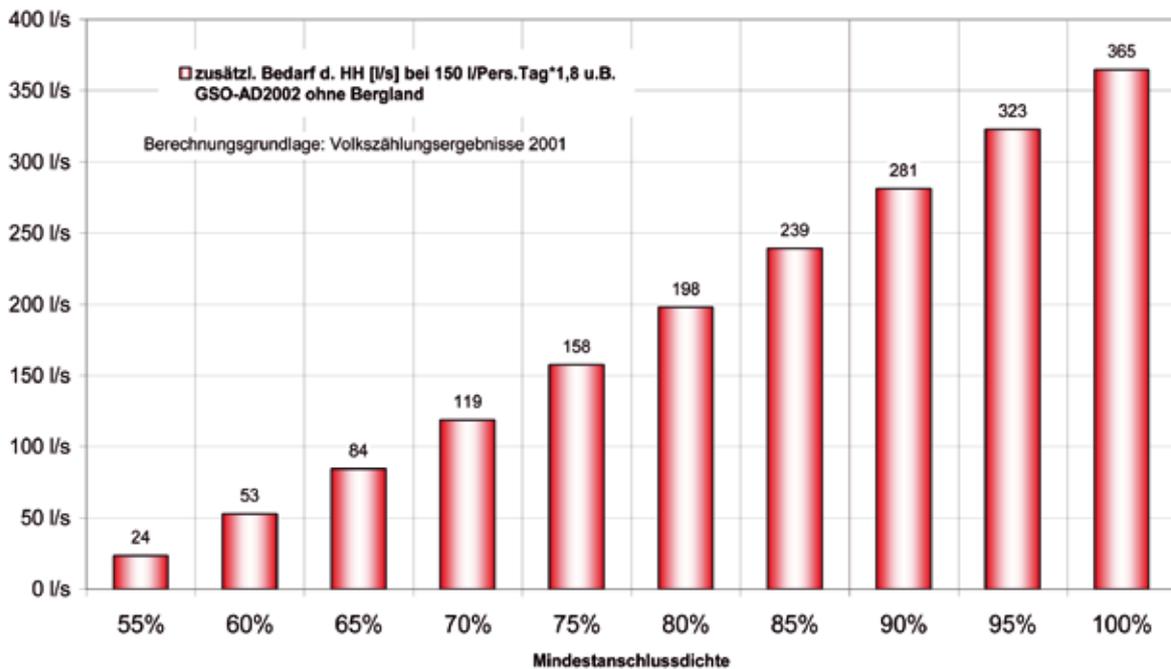
Für eine exakte Quantifizierung des zukünftigen Wasserbedarfes im Untersuchungsgebiet fehlen flächendeckende Grundlagendaten. Eine grobe Abschätzung des zukünftigen zusätzlichen Wasserbedarfes durch private Haushalte ist dennoch möglich:

Aus den Volkszählungsergebnissen (2001) sind die Anschlussdichten aller 192 Gemeinden im Untersuchungsgebiet bekannt. Aufgrund der oben genannten Entwicklungen ist mit einem weiteren Anstieg der Mindestanschlussdichten zu rechnen.

Natürlich wird es aufgrund der unterschiedlichen naturräumlichen und siedlungsbedingten Un-

terschiede auch in Zukunft eine gewisse Bandbreite an Anschlussdichten geben. Geht man jedoch zum Beispiel von einer Mindestanschlussdichte von 75 % aus, so ergibt sich für das Hügelland, inklusive Unteres Murtal, jedoch ohne Gemeinden über einer mittleren Seehöhe von 600 m, ein zusätzlicher mittlerer Wasserbedarf von 88 l/s bzw. ein zusätzlicher Spitzenbedarf von 158 l/s. Würde man das Bergland miteinbeziehen, so würde der Spitzenbedarf bei einer Mindestanschlussdichte von 75 % auf 220 l/s ansteigen.

Geht man davon aus, dass es nicht nur zu einer Erhöhung der Anschlussdichten in Gemeinden mit heute niedriger Anschlussdichte kommt, sondern in allen Gemeinden der Anschlussgrad und der Verbrauch steigen werden, so wird der zusätzliche Spitzenbedarf allein im Hügelland inklusive Unteres Murtal in der Größenordnung von 200 l/s liegen (siehe *Bild 6*).



*Bild 6: Zusätzlicher Spitzenwasserbedarf von Haushalten (150 l/Person und Tag mal 1,8) auf Basis der Volkszählungsergebnisse 2001 unter Berücksichtigung der Anschlussdichten des GSO ohne Bergland*

Der verstärkte Rückgriff auf das Grundwasserreservoir des Unteren Murtals ist durch Realisierung entsprechender Großbrunnenstandorte und Lückenschließungen im überregionalen Versorgungsnetz tatsächlich eingetreten. Auch die Einbeziehung von Trinkwasser aus Fernleitungen ist inzwischen in der Umsetzungsphase (Transportleitung von Graz über Gleisdorf bis nach Hartberg – Baubeginn Herbst 2007).

## 8 Ökonomische Aspekte

Die ökonomischen Aspekte der Wasserknappheit in der Oststeiermark wurden unter der Leitung von F. Pretenthaler (RTG – Joanneum Research) erarbeitet und sind in Pretenthaler & DallaVia, 2007 ausführlich dargestellt. Kurz zusammengefasst kann festgestellt werden, dass in der Oststeiermark rund 20.700 Personen in Betrieben arbeiten, für welche Wasser einen unverzicht-

baren Bestandteil des Produktionsprozesses darstellt, hervorstechend dabei, wie bereits vor Untersuchungsbeginn vermutet, die Beherbergungsbranche mit rund 8.000 Beschäftigten. Alle diese Branchen gemeinsam erwirtschaften einen Produktionswert von rund 2,7 Mrd. € pro Jahr bzw. eine Bruttowertschöpfung von rund 1 Mrd. €. Wenn es aufgrund von Wasserengpässen auch nur für zwei Wochen zu einem Produktionsausfall (bzw. Ausbleiben von Gästenächtigungen) kommen würde, würde dies einen ökonomischen Schaden von 40 Mio. € ausmachen, der Umsatz würde um 105 Mio. € zurückgehen.

Betrachtet man die zukünftige Entwicklung dieser Branchen, so wird – eine ungestörte Wasserversorgung vorausgesetzt – eine weitere Beschäftigungszunahme von rund 4.000 bis 6.000 Personen prognostiziert, wobei die größte Dynamik weiterhin vom Gaststätten- und Beherbergungssektor ausgeht. Kann die Wasserversorgung über das derzeitige Niveau hinaus nicht sichergestellt werden, so sind Investitionen in den wasserintensiven Branchen und infolge die oben genannten Beschäftigungschancen gefährdet.

Die „Transportleitung Oststeiermark“ mit dem Einbezug von Trinkwasser aus Fernleitung und eine Vernetzung möglichst vieler regionaler Wasserversorger zur Senkung der individuellen Vulnerabilität der Regionen bei Trockenheit („Lückenschließungen im regionalen Versorgungsnetz“) führen zu Investitionskosten von rund 15 Mio. € für die Transportleitung (bei Errichtung mit Kunststoffrohren) bzw. 47 Mio. € für die Lückenschließung. Vergleicht man dazu den ökonomischen Schaden aus dem Verlust von Wertschöpfung bei 2-wöchigem Ausfall der Produktion von wasserintensiven Branchen bei Beibehaltung des Status quo im Trinkwasserangebot, wie oben erwähnt, ist eine ökonomische Rechtfertigung für die Maßnahmen schnell gefunden.

Zur Frage, inwieweit nachfragewirksame Maßnahmen wie aktive Preispolitik bzw. der forcierte Einsatz von Wasserspartechnologien mögliche Alternativen zum Bau der Transportleitung darstellen könnten, kommt die Studie zu einem negativen Befund: Auch wenn man nur 50 % der Kapazität der Transportleitung einsparen möchte, so müsste der Wasserpreis, der die nachgefragte Menge derart reduzieren würde, auf das rund zweieinhalbfache des derzeitigen Niveaus ansteigen, ein Szenario, das wohl aus Gründen der mangelnden politischen Akzeptanz durch die Bevölkerung kaum realistisch erscheint. Aber auch die Wasserspartechnologien weisen insgesamt ein zu geringes Potenzial auf, um als ernsthafte Alternative zur Infrastrukturinvestition in Erwägung gezogen werden zu können.

## **9 Zusammenfassung**

Tendenzielle Rückgänge der Niederschläge und der tendenzielle Anstieg der Lufttemperaturen vor allem im Zentralbereich des oststeirischen Hügellandes seit Beginn der 1990er-Jahre, haben dazu geführt, dass der überwiegende Teil der kommunalen Wasserversorger im extremen Trockenjahr 2003 die Versorgungsgrenzen erreichte. Aufgrund der vergleichsweise ungünstigen hydrogeologischen Verhältnisse waren viele Hausbrunnen nicht mehr in der Lage, die betroffenen Anwesen zu versorgen und die Anschlussdichten stiegen stark an. Bei Eintreten der Klimaszenarien für die Oststeiermark für die 2040er-Jahre (Gobiet & Truhetz, 2004) würde sich die Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Boden und Landnutzungsverhältnissen mehr oder weniger deutlich stark reduzieren. Die zu erwartenden höheren Temperaturen und die zusätzlichen Personen, deren privaten Hausbrunnen und Quellen nicht mehr in der Lage sein werden, den Wasserbedarf das

ganze Jahr über abzudecken, werden zu einem weiteren Anstieg der Anschlussdichten führen. Aufgrund vorliegender grundwasserhydrologischer Untersuchungen im Bereich Quellwasser im Bergland, Tiefengrundwasser und im Bereich Porengrundwasser sind im Untersuchungsgebiet keine größeren zusätzlichen Wasserressourcen vorhanden.

Wenn es aufgrund von Wasserengpässen auch nur für zwei Wochen zu einem Produktionsausfall (bzw. Ausbleiben von Gästenächtigungen) kommen würde, würde der ökonomische Schaden rund 40 Mio. € betragen (F. Pretenthaler in Pretenthaler & Dalla-Via, 2007). Das Einsparungspotenzial mittels erhöhter Wasserpreise bzw. mittels Wasserspartechnologien erscheint zum einen nicht sinnvoll bzw. nicht ausreichend.

Aus oben genannten Gründen wird die inzwischen laufende Errichtung einer Wassertransportleitung zur externen Versorgung der Oststeiermark und die weitere Vernetzung von Wasserversorgern als sehr sinnvoll erachtet.

## 10 Literatur

- Domberger, G., W. Erhart-Schipppek, C. Kriegl, J. Meyer, P. Niederbacher, M. Schreilechner, V. Vasvari (2004): NANUTIWA – Hydrogeologische Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung der Tiefengrundwässer im Bereich des Oststeirischen und Pannonischen Beckens, unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit – Vorversion, Graz.
- Dalla-Via, A. (2002): Bewertung der heterogenen Nitratverteilung im quartären Aquifer des Unteren Feistritztales, Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Karl-Franzens-Universität, Graz.
- Dalla-Via, A. & J. Fank (2006): Hydrogeologisches Monitoring der Brunnen des Wasserverbandes Grenzland Südost, Jahresbericht 2005, unveröffentlichter Bericht des Institutes für WasserRessourcenManagement, JOANNEUM RESEARCH, Graz.
- Fank, J., G. Rock, K. Fuchs & A. Dalla-Via (2002): Grundwasserströmungs- und -transportmodell „Unteres Murtal“ zur Erfassung der regionalen Strömungsverhältnisse und der Interaktion von Oberflächenwässern mit dem Grundwasser in einem rezenten Auegebiet (Schlussteil – Endbericht), Proj. Nr. STA 28C/99, Unveröff. Bericht Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH, Graz.
- Fank, J., G. Rock & A. Dalla-Via (2003): Brunnen Fluttendorf, Donnersdorf – Grundwasser-hydrologisches Gutachten, Unveröff. Ber., JOANNEUM RESEARCH: Institut für Hydrogeologie und Geothermie, Graz.
- Formayer, H., Matulla, C., Haas, P., Groll, N., Kromp-Kolb (2004): Einsatzmöglichkeiten verschiedener Downscalingmethoden für Klimaänderungsszenarien in topographisch stark gegliederten Terrain und explizite Anwendung auf Österreich für Niederschlag und Temperatur. Endbericht im Auftrag des bm:bwk.
- Gobiet, A. & H. Truhetz (2004): reclip:more – IGAM Report #1, Project Year 1 (Nov 2003 – Jun 2004), Tech. Report for ARC No. 1/2004, Inst. for Geophys., Astrophys., and Meteorol., Univ. of Graz.
- Harum, T., C. Holler, P. Saccon, I. Entner & J. Hofrichter (2001): Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Quellwasserangebots im alpinen Raum Österreichs, Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Kromp-Kolb H. (2004): Die Landwirtschaft im globalen und regionalen Klimawandel. Tagungsbericht – Klimawandel – Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion. Wien.

- Leggett, J., W.J. Pepper et al. (1992): Emissions scenarios for the IPCC: an update in Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment, J.T. Houghton, B.A. Callander et al. (Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 75-95.
- Loibl, W., M. Dorninger et al. (2004): Kwiss-Programm reclip: Research for Climate Protection, 1. Zwischenbericht, März 2004, Report, ARC – systems research.
- Prettenthaler & Dalla-Via (2007): „Wasser & Wirtschaft im Klimawandel – Konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark“ – Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Graz 189 S.
- Roeckner, E., G. Baeuml et al. (2003), The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part 1: Model Description, Report 349, Max Planck Institute for Meteorology (MPI), Hamburg.
- Truhetz, H., A. Gobiet et al. (2005): Research for Climate Protection: Model Run Evaluation – WegCenter, Project Year 2: Dynamical Downscaling with MM5, Upper Air Evaluation and Wind Downscaling, Working Report, Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz.

**Anschrift des Autors**

Mag. Dr. Andreas Dalla-Via  
Joanneum Research  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Elisabethstraße 16/II, 8010 Graz  
Tel. +43-316-876-1375  
E-Mail: andreas.dalla-via@joanneum.at

# Die Schweiz im Jahre 2050 – Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft

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. Ausgehend von den vorhandenen Beobachtungsdaten und von den neusten wissenschaftlich erarbeiteten Klimaszenarien für das Jahr 2050 haben Expertengruppen unter Leitung des „Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung OcCC“ zusammengetragen, wie die einzelnen Sektoren und Nutzergruppen, z. B. Wasserversorgung, Energieerzeugung, Hochwasserschutz oder Landwirtschaft, betroffen sein könnten.

## 1 Übersicht über bisherige Veränderungen

Dank der bereits im 19. Jahrhundert etablierten Messnetze der nationalen meteorologischen, hydrologischen und glaziologischen Dienste wissen wir heute, dass in der Schweiz die Temperatur im 20. Jahrhundert in der Westschweiz um 1.6 Grad, in der Deutschschweiz um 1.3 Grad und auf der Alpensüdseite um 1.0 Grad zugenommen hat (BUWAL, 2002). Auch das Niederschlagsregime hat sich verändert. Die Jahresniederschläge haben im 20. Jahrhundert um rund 113 mm (8 %) zugenommen. Da mit der Erwärmung auch die Verdunstung der Landoberfläche, der Vegetation und der Gewässer insgesamt um 99 mm zugenommen hat, ist der Gesamtabfluss unserer Fließgewässer – das Resultat der Wasserbilanz – im Jahresmittel praktisch unverändert geblieben (*Bild 1*).

Ähnlich wie die Lufttemperatur hat die Temperatur der schweizerischen Fließgewässer in den vergangenen Jahrzehnten um bis zu 2 °C zugenommen, wobei der Anstieg der Wassertemperaturen im Mittelland stärker war als in den alpinen Regionen (Jakob et al., 2007). Diese Fließgewässer mit von Gletschern beeinflussten Einzugsgebieten zeigen jedoch keinen deutlichen Anstieg der Wassertemperaturen. Die Zunahme der Wassertemperatur in tiefer gelegenen Gebieten zeigt sich vor allem in der Zunahme von Zeitdauern mit erhöhten Temperaturen (*Bild 2*). Es sind diese Spitzenwerte, welche insbesondere den Kaltwasserfischen (Forellen, Aeschen) zu schaffen machen und diese in höhere Regionen verdrängen.

Die Veränderungen im Klima haben sich direkt auf die vergletscherten Flächen und auf die Massenbilanz der Alpengletscher ausgewirkt (*Bild 3*). Seit dem Hochstand der Gletscher Mitte des 19. Jahrhunderts haben die Schweizer Gletscher etwa 45 Prozent ihrer Fläche und mehr als die Hälfte ihres Volumens verloren. Im Vergleich dazu sind die Verluste im gesamten europäischen Alpenraum noch stärker ausgefallen, weil dort die mittlere Höhe der vergletscherten Regionen niedriger ist als in der Schweiz. Obwohl die Verluste in der Schweiz etwa 55 Milliarden Kubikmeter Wasser betragen, entsprechen sie nur knapp einem Jahresniederschlag, und mit durchschnittlich etwa 1 % einen sehr kleinen Anteil am jährlichen schweizerischen Gebietsabfluss. Für ein kleineres oder mittleres Fließgewässer im Gebirge kann die Gletscherschmelze im Frühjahr und Sommer jedoch besonders in warmen Jahren einen erheblichen Beitrag bedeuten.

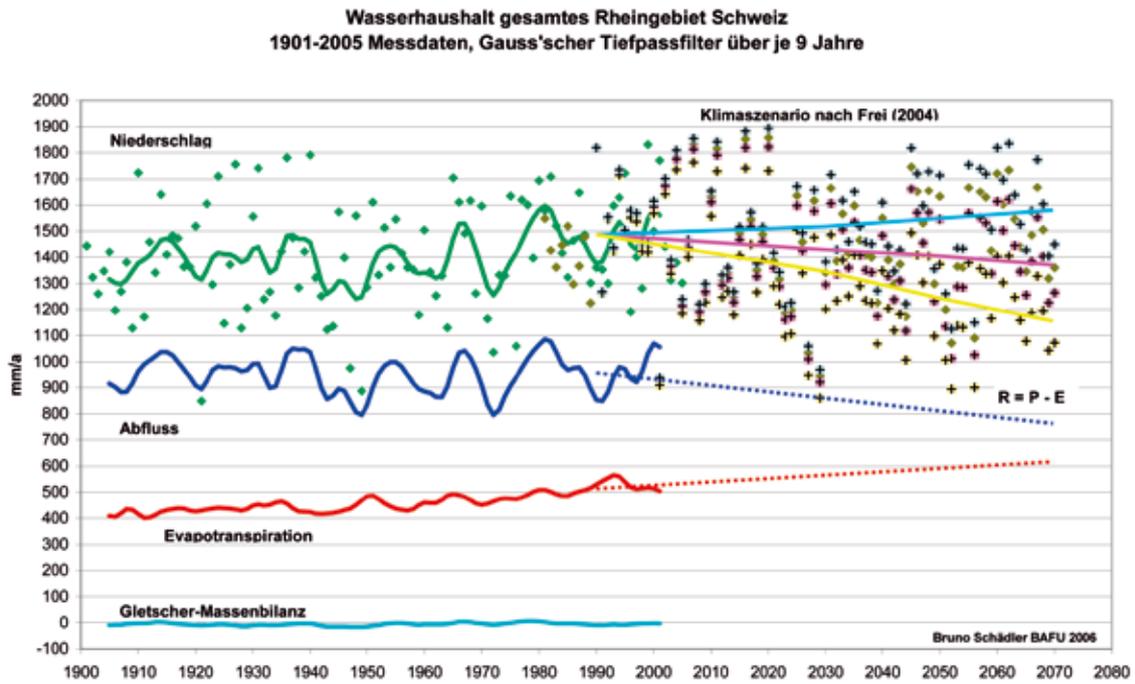


Bild 1: Der Wasserhaushalt der Schweiz gemessen seit 1900 (Schädler et al., 1992; BAFU, 2007) und als Szenario bis 2070. Dargestellt bis 2005 sind die jährlichen Niederschlagswerte sowie die Tiefpass-gefilterten Werte über jeweils 9 Jahre für Niederschlag, Abfluss, Verdunstung. Für die Niederschlags-Szenarien sind die 5%-, 50%- und 95%-Quantile aus Frei (2004) dargestellt (analog Bild 4). Entsprechend dieser Szenarien sind die Jahreswerte aus dem 20. Jh. ins 21. Jh. übertragen und verändert worden. Die Verdunstung ist linear extrapoliert und der Abfluss aus der Wasserbilanz mit dem 50%-Quantil des Niederschlags berechnet worden

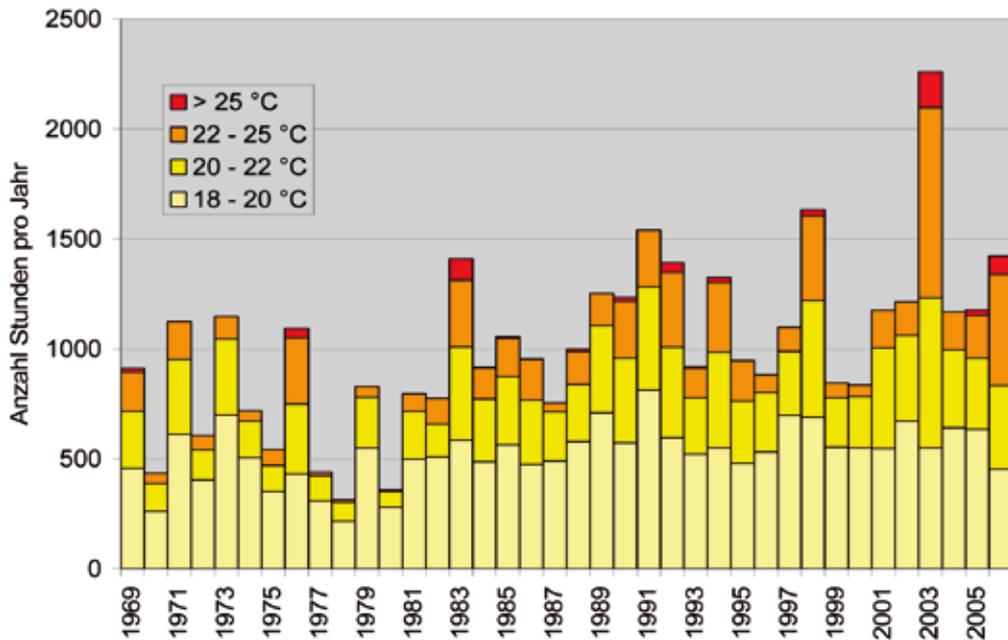


Bild 2: Dauer in Stunden der Wassertemperatur für bestimmte Temperaturbereiche in der Thur in Andelfingen (Einzugsgebiet 1696 km<sup>2</sup>, mittlere Höhe 770 m ü. M.) für die Zeitperiode 1969–2006 (nach Jakob et al., 2007)

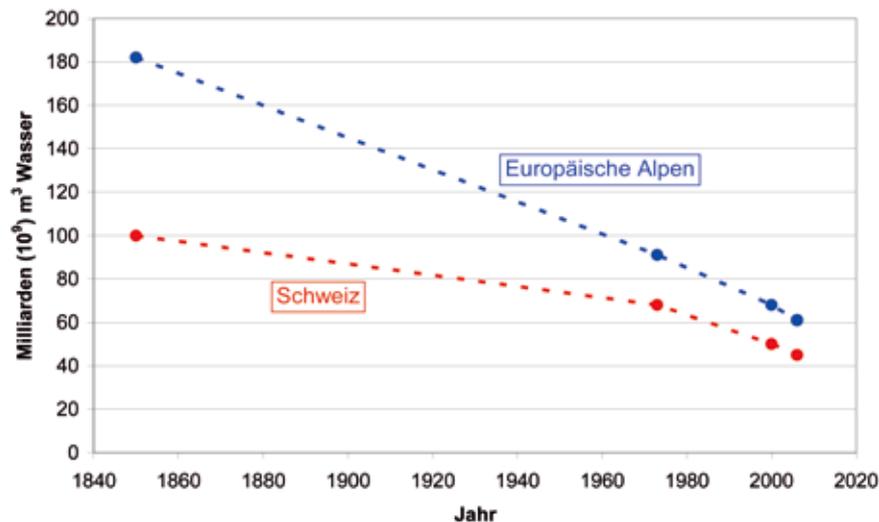


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der im Gletschereis gespeicherten Wasservolumen in der Schweiz und in den Europäischen Alpen von 1850 bis 2005 (nach Maisch et al., 2004; Huss et al., 2008; Zemp et al., 2006)

## 2 Zukunftsszenarien

Wie wird sich der globale Klimawandel im Jahre 2050 auf die Schweiz auswirken? Welches sind mögliche Folgen und Verletzlichkeiten für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft in der Schweiz? Sind neue Maßnahmen und Anpassungsstrategien notwendig? Diese Fragen hat das „Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC)“ zusammen mit über 100 Fachleuten aus den verschiedensten Fachbereichen in neun Arbeitsgruppen diskutiert und Antworten dazu in einem umfassenden Bericht (OcCC, 2007) dargelegt.

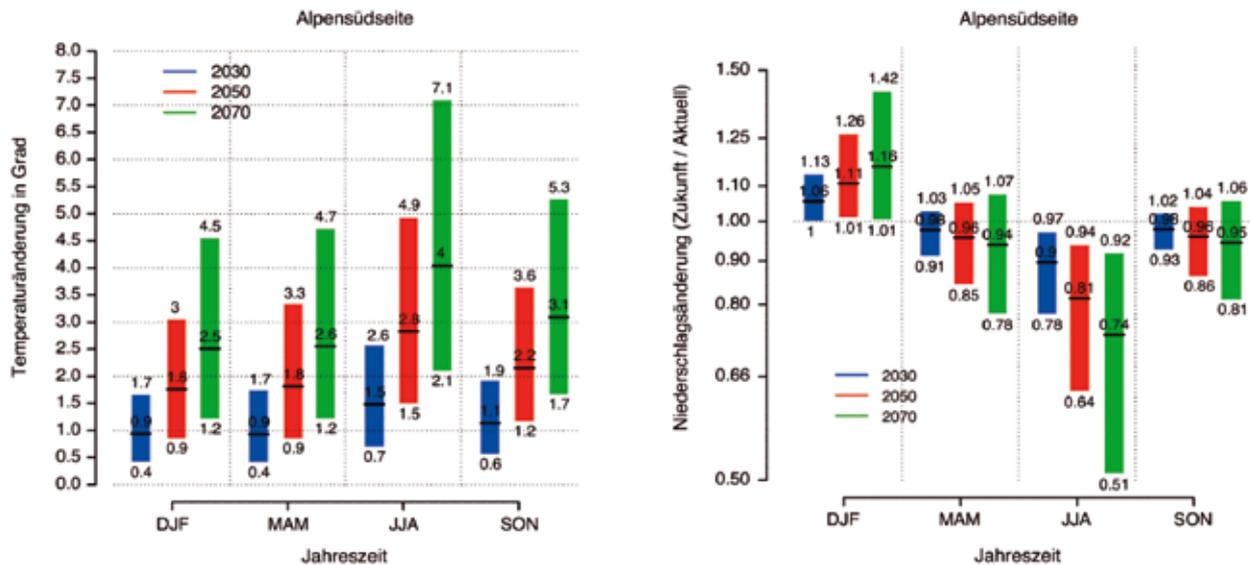
Das OcCC wurde 1996 von der Schweizer Regierung eingesetzt und hat den Auftrag, Empfehlungen zu Fragen des Klimas und der Klimaänderungen zu Händen von Politik und Verwaltung zu formulieren. Rund 30 Persönlichkeiten aus Forschung, Wirtschaft und Bundesverwaltung wirken in diesem Fachgremium mit.

### 2.1 Das Klimaszenario bis 2050

Damit alle neun Arbeitsgruppen von denselben Zukunftsperspektiven ausgingen, wurden im OcCC Klimaszenarien bereitgestellt, welche dem Stand des heutigen Wissens (IPCC, 2007) entsprechen. Die hier beschriebenen Szenarien stützen sich auf umfangreiche Simulationen mit globalen und regionalen Klimamodellen in Europäischen Klimaforschungsprojekten (PRUDENCE, Christensen et al., 2007; STARDEX, Goodess, 2003), und deren spezifischen Auswertung für den Alpenraum (Frei, 2004; Frei et al., 2006; Schmidli et al., 2007). Der Einbezug verschiedener Szenarien über die zukünftige Emission von Treibhausgasen erlaubt eine quantitative Beschreibung der involvierten Unsicherheiten. Die Szenarien beschreiben die Änderungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2050) im Vergleich zum Ende des 20. Jahrhunderts (1990).

Die **Temperatur** wird demnach um 1 bis 3.5 °C ansteigen. Die Jahreszeiten unterscheiden sich dabei nur wenig und regionale Erwärmungsunterschiede sind kleiner als der abschätzbare Unsicher-

heitsbereich (*Bild 4*). Als Folge der Erwärmung verschiebt sich die vertikale Temperaturstruktur in der Atmosphäre. Damit wird erwartet, dass auch die mittlere Schneegrenze und die Permafrostgrenze um 150 bis 600 m ansteigen.



*Bild 4: Änderung der mittleren Temperatur (links, in Grad) und des mittleren Niederschlags (rechts, Verhältnis Zukunft/Gegenwart) in den vier-Jahreszeiten für die Südschweiz. Die Balken zeigen die Unsicherheiten und die Linien die jeweils beste Schätzung der Änderung. Die Änderungen sind dargestellt für die Perioden 2020–2040 (blau), 2040–2060 (rot), 2060–2080 (grün) gegenüber 1980–2000 (aus Frei, 2004)*

Im Gegensatz zur Temperatur ändert sich der mittlere Jahresgang der **Niederschlagsmengen** erheblich, mit Zunahmen von 0–20 % im Winter (Dezember–Februar) und Abnahmen von 5–30 % im Sommer (Juni–August). Im Frühling und Herbst liegen die Änderungen dazwischen. Die Verschiebung zu trockeneren Sommern dominiert die Änderung in den Jahresniederschlagsmengen, für welche eine Abnahme um 5–10 % geschätzt wird. (*Bild 1 und 4*). Diese Veränderungen resultieren im Mittel in einer Abnahme der mittleren jährlichen Niederschläge um 5–7 Prozent (entsprechend im Norden um etwa 75 mm und im Süden um rund 140 mm).

Die Auswertungen der Klimasimulationen erlauben eine grobe Quantifizierung der **Niederschlagsextremwerte** 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 (*Bild 5*; Frei et al., 2006). Im Winter und Frühling wird als Folge der Kombination von höheren Spitzen und längerer Dauer eine Zunahme der Niederschlagsvolumen erwartet.

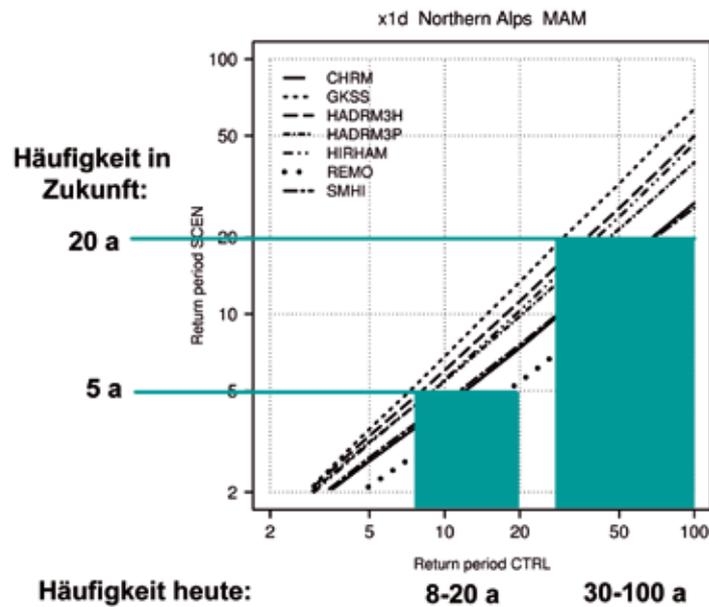


Bild 5: Änderung der Häufigkeitsverteilung der 1-Tages-Starkniederschläge im Frühjahr für den nördlichen schweizerischen Alpenraum. Vergleich der Gegenwart (CTRL) mit dem Szenario 2050 (SCEN) für verschiedene regionale Modelle (aus Frei et. al., 2006)

Für den Sommer erlauben die große Variabilität der Resultate sowie das eingeschränkte Vertrauen in die Modellsimulationen keine Aussagen. Allenfalls sind Tendenzen für eine Zunahme nordalpin und eine Abnahme südalpin erkennbar.

## 2.2 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Der Wasserkreislauf wird geprägt durch das Klima und das aktuelle Wettergeschehen. Die Abflüsse sind indirekt an die Niederschläge gekoppelt. Über mehrere Jahre hinweg folgen sie bei relativ konstanter Verdunstung den Veränderungen der Niederschläge. Aber nur ein geringer Anteil der Niederschläge fließt direkt ab; der größere Teil wird beispielsweise in der Schneedecke und in Gletschern, im Boden, im Grundwasser und in natürlichen und künstlichen Seen gespeichert. Kurzfristig wird der Abfluss durch die Freigabe des Wassers aus allen diesen Speichern beeinflusst.

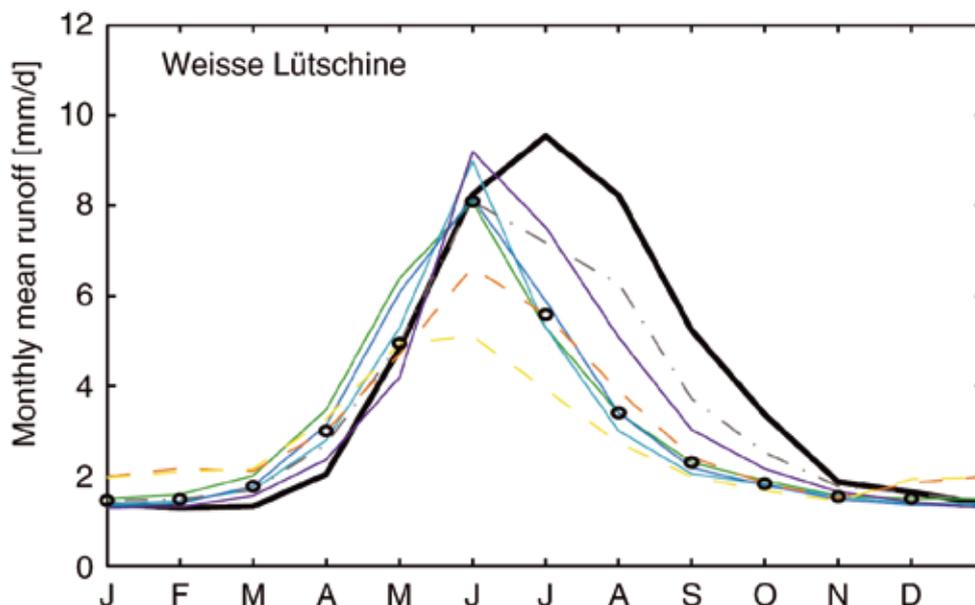
Ausgehend vom Grad der Vergletscherung und Schneebedeckung lassen sich verschiedene Abflusstypen unterscheiden, die unterschiedliche jahreszeitliche Abflussmuster aufweisen (Aschwanden und Weingartner, 1985). Fließgewässer, die hauptsächlich durch das Abschmelzen von Gletschern und Schnee gespeist werden (Typ glazial), weisen die größten Abflussschwankungen auf. Hier kann sich der mittlere Monatsabfluss zwischen Winter und Sommer leicht um einen Faktor 30 verändern. Am geringsten sind die Abflussschwankungen bei Fließgewässern, die überwiegend vom Regen abhängig sind (Typ pluvial).

Aufgrund des vorliegenden Klimaszenarios muss bis ins Jahr 2050 mit den folgenden generellen Veränderungen im Wasserkreislauf gerechnet werden:

- Die Verdunstung wird als Folge der Erwärmung generell weiter zunehmen. Wegen der Austrocknung des Bodens kann die Verdunstung lokal und zeitlich befristet auch eingeschränkt

und folglich vermindert sein

- In tieferen und mittleren Höhenlagen fallen wegen der Erwärmung weniger Niederschläge in Form von Schnee. Die Schneegrenze, welche schneebedeckte Gebiete von den tiefer liegenden Gebieten abtrennt, steigt bei einer mittleren Erwärmung um ungefähr 360 m. Bei einer mittleren Erwärmung wird die Gletscherfläche in den Alpen bis 2050 um rund drei Viertel abnehmen. Als Folge des veränderten Auf- und Abbaus der Schneedecke, des Anstiegs der Schneegrenze und des Abschmelzens der Gletscher werden sich die Abflussregimes um etwa eine bis zwei Regimestufe nach unten verschieben. Als Beispiel ist die Veränderung des Abflussregimes der Lütchine in *Bild 6* dargestellt. Deutlich ist eine Verschiebung der jahreszeitlichen Spitze in Richtung Frühjahr, das heißt in Richtung eines nivalen Regimes zu erkennen. Gleichzeitig nimmt das gesamte Abflussvolumen ab, bedingt durch die Niederschlagsabnahme und die Verdunstungszunahme
- Mit der Verringerung der Niederschlagsmenge und dem Anstieg der Verdunstung, dürfte sich das mittlere jährliche Abflussvolumen um 7 bis 12 % verringern (*Bild 1*). Die Beiträge des Schmelzwassers der Gletscher sind mit weniger als 1 % des Abflusses in großen Flüssen vergleichsweise gering und können den Rückgang auch vorübergehend nicht kompensieren. Allerdings sind die Beiträge von Schmelzwasser der Gletscher in kleinen gletschernahen Bächen im Sommer wichtig und dürften später weitgehend fehlen
- Die Grundwasserneubildung wird im Sommer und im Herbst in allen nicht vergletscherten Gebieten abnehmen. Dies wird jedoch weitgehend kompensiert durch die zusätzlichen Niederschläge im Winter, sodass insgesamt die Grundwasserstände nicht sinken.



*Bild 6: Abflussregimes der Lütchine, einem Zufluss aus dem Jungfraugebiet zum Brienersee im Berner Oberland (Einzugsgebiet 164 km<sup>2</sup>, mittlere Höhe 2.170 m ü. M., Vergletscherung 17.6 %). Dargestellt als farbige Linien sind die berechneten Abflussregimes basierend auf den Szenarien für 2077–2099 aus dem PRUDENCE-Projekt (Christensen et al., 2007). Die rote Kurve ist der aktuelle Zustand. Die kleinen Kreise geben den Median aller Modellläufe (aus Horton et al., 2005)*

### **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 abnehmen. Für die Reduktion der Abflussmengen sind abnehmende Niederschläge und erhöhte Verdunstung verantwortlich. Der geringere Wasserabfluss dürfte bis 2050 zu einer um durchschnittlich 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.

#### **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. 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.

Die Sommerhitze führt auch zu einer Erhöhung der Wassertemperaturen. Für viele einheimische Fische (z. B. Forellen) verkleinern sich dadurch die Lebensräume, da sie bei nur wenig höheren Wassertemperaturen sich nicht fortpflanzen oder überhaupt nicht leben können. Andere Fische wie z. B. Karpfen oder exotische Fische könnten einwandern.

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 Grund-

wasserstände 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. Daneben haben auch die weiter unten an den Fließgewässern liegenden Anrainerstaaten legitime Ansprüche auf eine genügende Wasserversorgung. Es ist durchaus denkbar, dass Nachbarstaaten Ansprüche bezüglich der Erhöhung des Wasserstands bei Niedrigwasser und der Lieferung größerer Mengen Trinkwasser stellen.

### **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 50.000 Hektaren bewässerter Flächen werden in Zukunft weitere dazukommen.

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:

- Trinkwassernutzung
- Nutzung für Kühlung von Industrieanlagen
- Bedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung
- Anspruch der Gewässerökologie auf genügend Wasser
- Ansprüche von unterliegenden Anrainern.

Wasser wird damit – allerdings zeitlich und örtlich beschränkt – im Sommer zunehmend zu einem knappen Gut werden. Die Notwendigkeit einer geeigneten Bewirtschaftung wird zunehmen. Diese 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).

#### **Nordalpine Gebiete unter 1.500 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 1.500 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 Schadensempfindlichkeit, bauliche Schutzmaßnahmen sowie Notfallmaßnahmen. In jedem Fall muss dem erhöhten Unsicherheitsgrad in der Hochwasserschutzbemessung 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.

### 3.7 Feststofftransport

Durch den Rückzug der Gletscher und das Auftauen von Permafrost nimmt in Gebieten zwischen ca. 2.300 und 2.800 m ü. M. das Feststoffpotenzial deutlich zu (*Bild 7*). 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.



*Bild 7: Der Tschiervagletscher (Engadin, Val Roseg) ist seit seinem Hochstand Mitte des 19. Jahrhunderts stark abgeschmolzen. Die freigelegten alten Seitenmoränen und die Grundmoräne bilden ein zunehmend größeres Feststoffpotenzial. Heute ist ein Teil dieser großen Schuttmassen noch meist gefroren (Permafrost) und dadurch wenig der Erosion ausgesetzt. Einzelne Erosionsrinnen sind jedoch bereits sichtbar. Im Hintergrund Mitte links der Piz Bernina mit Biancograt und ganz rechts der Piz Roseg (Foto: B. Schädler 2006)*

In den Voralpen lassen die erwähnten künftigen hydrometeorologischen Bedingungen (Niederschlag, Schneedecke, Verdunstung) im Winter und Frühjahr über längere Phasen auf wassergesät-

tigte 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.

#### 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. Eine vom Bundesamt für Umwelt in Auftrag gegebene Studie (Arbeitsgemeinschaft Ecoplan/SigmaPlan, 2007) hat gezeigt, dass sich die volkswirtschaftlichen Erwartungsschäden im Jahr 2050 im Bereich von 0.15 BIP% pro Jahr bewegen, sich dann allerdings – mit einem großen Unsicherheitsbereich – bis ins Jahr 2100 bis gegen 0.5 BIP% pro Jahr entwickeln könnten. 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. Dazu kommt, dass es viele Länder auf der Erde geben wird, darunter vor allem ärmere Entwicklungsländer, die einerseits deutlich gravierendere Folgen zu gewärtigen und andererseits nicht genügend finanzielle Möglichkeiten zur Anpassung haben. Die daraus entstehenden geopolitischen Entwicklungen könnten durchaus auch größere Folgen für die Schweiz haben (Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Ecologic/Rütter, 2007).

#### 5 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft Ecoplan/SigmaPlan (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Energie BFE, Bern, 176 S.
- Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Ecologic/Rütter (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (internationale Einflüsse). Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 167 S.
- Aschwanden, H. und R. Weingartner, 1985. Abflussregimes in der Schweiz. Pub. Gewässerkunde Nr. 65, Geographisches Institut der Universität Bern, 238 S.
- BAFU (2007): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt Zustand Nr. 0728. Bundesamt für Umwelt, Bern, 77 S.
- BUWAL (2002): Das Klima in Menschenhand. Neue Fakten und Perspektiven. Bundesamt für Umwelt, Bern, 28 S.
- Christensen J.H., T.R. Carter, und M. Rummukainen (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Clim. Change*, (in press).
- Frei, C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Erhältlich unter [www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050\\_scenario\\_d.html](http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html).
- 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.
- Goodess, C. M. (2003): Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions: STARDEX, EGGS, 6.
- Horton, P. et al. (2005): Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie.
- Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Hock, R. (2008): Determination of seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007JF000803

IPCC (2007): Climate Change 2007 – Fourth Assessment Report.

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.

KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz – ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). Wasser-Energie-Luft, Heft 1/2007.

Maisch, M., Paul, F. and Kääb, A. (2004): Kenngrößen, Flächen- und Volumenänderungen der Gletscher 1850-2000, Tafel 3.10, Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Bern, Bundesamt für Wasser und Geologie.

OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC/ProClim, Bern, 168 S.

PRUDENCE: Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects. Forschungsprojekt der Europäischen Union. <http://prudence.dmi.dk/>.

Schädler, B., Bigler R. (1992): Wasserhaushalt großer Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.1, Weingartner R, Spreafico M (eds). Bundesamt für Wasser und Geologie: Berne.

Schmidli, J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, C. Schär (2001): Mesoscale precipitation in the Alps during the 20th century. In: Int. J. Climatology, 22, 2001, 1049-1074.

Schmidli, J., C. M. Goodess, C. Frei, M. R. Haylock, Y. Hundecha, J. Ribalaygua, und T. Schmith (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *J. Geophys. Res.*, 112.

STARDEX: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions. Forschungsprojekt der Europäischen Union. [www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/](http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/).

Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M. and Paul, F. (2006): Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33(L13504), doi:10.1029/2006GL026319.

### **Anschrift des Autors**

Dr. Bruno Schädler

Bundesamt für Umwelt

Abteilung Hydrologie

3003 Bern (CH)

Tel. +41-31-324-7758

E-Mail: [bruno.schaedler@bafu.admin.ch](mailto:bruno.schaedler@bafu.admin.ch)

# Klimawandel und aquatische Makrophyten

Georg A. Janauer

## 1 Einleitung

Seit etwa 20 Jahren zeigt die Messung klimarelevanter Daten, dass eine Entwicklung zu höheren CO<sub>2</sub>-Gehalten in der Atmosphäre gemeinsam mit deren Erwärmung und der Zunahme von Starkniederschlägen und entsprechenden Folgen im Abflussverhalten von Fließgewässern in weiten Teilen der Erde manifest geworden ist (IPCC 2008). Mit der für Gewässer üblichen Verzögerung führt dieser Einfluss langsam zu einer zeitlich versetzten Erhöhung der Wassertemperaturen in Oberflächengewässern und zu geänderten hydrologischen Randbedingungen. Daraus folgt eine schleichende Veränderung der Lebensbedingungen für die aquatischen Organismen, wovon im vorliegenden Beitrag die aquatischen Pflanzen (*vulgo* „Schlingpflanzen“) behandelt werden.

## 2 Der Wasserkörper als Lebensraum von Wasserpflanzen

Als Makrophyten werden alle „mit dem freien Auge bis zur Art bestimmmbaren Wasserpflanzen“ (Zitat nach Westlake, 1973) benannt, wobei zwei Aspekte zu beachten sind:

- (i) diese Charakterisierung trifft nicht auf alle Wasserpflanzen zu, da vielfach auch anatomische, nur mit einer Lupe oder einem Mikroskop erkennbare Merkmale zur endgültigen Identifizierung gebraucht werden (die mikroskopisch kleinen Algen sind hier a priori als „Mikrophyten“ ausgeschieden)
- (ii) in Bezug auf ihren spezifischen Lebensraum treten unterschiedliche „Wuchsformen“ im – und am – und auf dem Wasser auf.

Allgemein beeinflusst die Dichte des Wassers, die fast 1.000 Mal höher ist als jene der Luft (1,2041 kg/m<sup>3</sup> bei 20 °C auf Meereshöhe), die physikalischen und chemischen Eigenschaften vieler Umweltparameter:

- Verringerung der Gasdiffusion (v. a. CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), daher schlechtere Versorgung der Pflanzen mit diesen lebensnotwendigen Gasen
- Abschwächung des Lichts und spektrale Veränderung mit der Wassertiefe (blaues Licht kann in reinem Wasser am tiefsten eindringen)
- Tägliche und jahreszeitliche Temperaturamplitude wesentlich geringer als an der Luft
- Stärkere mechanische Wirkung der Bewegung des Umgebungsmediums Wasser (Strömung), im Gegensatz zur Bewegung der Luft (Wind), bei gleicher Geschwindigkeit
- Schwankungen des Wasserspiegels, somit Austrocknung bzw. Überstauung, u. U. auch im täglichen Rhythmus, mit entsprechender Wirkung auf die Wasserpflanzen.

## 3 Makrophyten im Gewässerökosystem

Die Wasserpflanzen müssen sich einerseits an den Wasserlebensraum anpassen, andererseits beeinflussen sie die Eigenschaften des Wasserkörpers und damit die Lebensbedingungen für andere Lebewesen.

Die Makrophyten produzieren am Tage Sauerstoff und unterstützen damit alle atmenden Lebewesen. In der Nacht allerdings atmen sie wie tierische Organismen.

Als grüne Pflanzen produzieren sie Biomasse mittels Fotosynthese, die Menge an Biomasse hängt aber stark von der Wuchsform und den klimatischen Bedingungen ab. Untergetauchte Pflanzen erzeugen geringere Biomassen, Schwimmblattpflanzen und Pleustophyten (schwimmen frei an der Wasseroberfläche) bis zu ca. 5 mal mehr, und Röhrichpflanzen können Biomasse bis zum 8-fachen Wert der untergetauchten Pflanzen produzieren, wobei die Produktionsleistung in wärmeren Klimaten höhere Werte erreicht.

Wichtiger als diese beiden Einflüsse ist aber die Strukturfunktion der Makrophyten: „Wasser hat keine Balken“, aber die Stängel und Blätter der Wasserpflanzen bilden, wie die Bäume in einem Wald, jene Strukturen im strukturlosen Wasserkörper, die für viele Gewässertiere, aber auch für Algen, Bakterien und Pilze als Lebensraum unverzichtbar sind.

Alle jene Arten, die mit ihren Beständen weite Teile der Wasseroberfläche bedecken können (z. B. Teich- und Seerosen, Wasserlinsen), vermindern die Einstrahlung von Licht und Wärme in den Wasserkörper und erniedrigen somit die Wassertemperatur unter dieser Pflanzendecke. Die Absenkung der Temperatur beeinflusst unter anderem den wärmeabhängigen Entwicklungsgang anderer Wasserorganismen (z. B. Insektenlarven). Es lassen sich mehrere Wuchsformen unterscheiden:

- Submerse Makrophyten (untergetaucht lebende Wasserpflanzen)  
Diese Pflanzen reichen meist nur mit den Blütenständen über der Wasseroberfläche  
Beispiele: Laichkräuter, Wasserpest, Tausendblatt (*Bild 1*)



*Bild 1: Kammlaichkraut (Zaya, Niederösterreich), alle Fotos: © G.A. Janauer 2007*

- Schwimmblattgewächse  
Beispiele: Seerose, Teichrose



*Bild 2: Seerose (Donaualtwasser, Rumänien)*

- Amphiphyten (amphibische Pflanzen, unter und über Wasser oder am Ufer gedeihend)  
Beispiele: Berle, Schwanenblume, Pfennigkraut



*Bild 3: Berle, untergetaucht und aus dem Wasser ragend (Bildmitte)*

## Klimawandel und aquatische Makrophyten

- Pleustophyten („Wasserschweber“, frei schwimmend, nicht im Sediment verwurzelt)  
Beispiele: Wasserlinse, Wasserfarn, Wassersalat



*Bild 4: Wasserlinsen-Decke (Abflussgraben, Ungarn)*

- Helophyten (Röhrichtpflanzen, nur mit dem unteren Sprosssteil im Wasser stehend)  
Beispiele: Rohrkolben, Schilf, Seggen



*Bild 5: Röhrichte (Donaudelta, Rumänien), Foto*

- Uferrand-Kräuter („fringing herbs“, vom Ufer aus mit Ausläufern über die Wasseroberfläche wachsend)  
Beispiele: Wasser-Ehrenpreis, Ludwigia



*Bild 6: Uferrandkräuter (Ludwigia, Senegal)*

Weitere Angaben zu der Funktion der Makrophyten im Gewässerökosystem finden sich bei Janauer & Dokulil (2006).

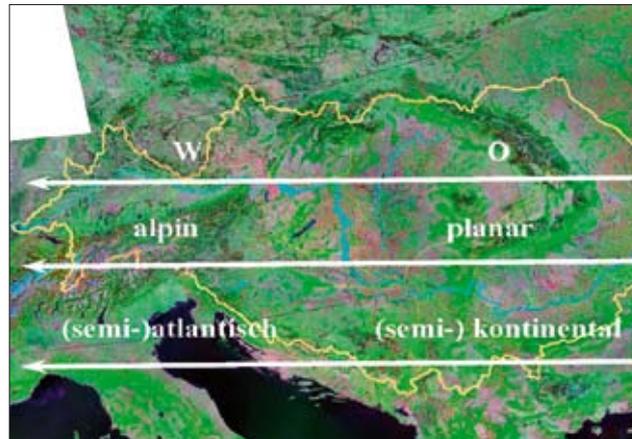
#### **4 Vergleichsdaten**

Um zu einer konkreten Aussage im Sinne der Fragestellung zu kommen, wurde auf eine Reihe von Untersuchungen zurückgegriffen, die quantifizierte Daten über das Auftreten von Makrophyten in verschiedenen Gewässern des Donau-Korridors beinhalten (*Bild 7*). Es handelt sich um Datensätze aus der Pilotstudie (Janauer et al. 2003) und den Abschlussbericht des MIDCC-Projekts (MIDCC 2005 und [www.midcc.at](http://www.midcc.at)). Daten für den Stauraum Freudenuau stammen aus dem Interreg-III A-Projekt FIDON (Chovanec et al., 2006).

*Tabelle 1: Partnerstaaten im MIDCC-Projekt*

Österreich (Projektleitung)  
Deutschland (Baden-Württemberg, Bayern)  
Slowenien  
Slowakei  
Ungarn  
Kroatien  
Serbien  
Bulgarien  
Rumänien

Warum sich Vergleichsdaten aus dem Donauroaum besonders gut für eine Abschätzung von Folgen des Klimawandels eignen ist leicht aus *Bild 7* erkennbar:



*Bild 7: Gradienten im Donaueinzugsgebiet*

Im Donaueinzugsgebiet treten wesentliche Gradienten auf, die sich in Klimazonen, Höhenstufen, Geländemorphologie und – in Bezug auf die Verbreitung von Pflanzen- und Tierarten – in einer generellen West/Ost – Differenzierung widerspiegeln.

## 5 Folgen des Klimawandels

Überlegungen zu den Auswirkungen des Klimawandels werden meist auf die Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur fokussiert. Aber auch die Verlängerung der Periode höherer Temperaturen in den Herbst hinein und das Auftreten weniger kalter Winter ohne extreme Frostperioden sind in unserer geografischen Lage und im Bezug auf die Gewässervegetation zu berücksichtigen.

Unter diesen Voraussetzungen sind folgende Veränderungen zu erwarten, beziehungsweise bereits im Ansatz erkennbar:

- **Wärmere Sommer**

Erhöhte Sommertemperaturen fördern Wärme liebende Pflanzenarten, die durch ein höheres Temperaturoptimum oder eine größere Temperaturamplitude charakterisiert sind und erhöhen deren Chance, mehr Biomasse zu bilden. In weiterer Folge zeigt sich, dass eine dauernde Etablierung von kältesensitiven Arten in geschützten räumlichen Nischen mit geringerem Kälteeinfluss möglich ist (z. B. Wasserfarn im Mauthnerwasser).

- **Wärmere Winter**

Da zwischen der nicht absterbenden Biomasse im Herbst und dem Wucherfolg vieler Makrophytenarten im folgenden Frühjahr ein positiver Zusammenhang besteht (Janauer & Wychera 2000, Kapitel „*Inter-annual biomass relationship*“) sind milde Wintertemperaturen die Ursache für besonders starke Entwicklung überdauernder Bestände. Dieser Zusammenhang konnte auch in letzter Zeit wieder beobachtet werden (z. B. Entwicklung von Tausendblatt in Schotterteichen

und in der Alten Donau). Dadurch wird auch der „Start-Vorsprung“ für bestimmte Arten erhöht, die danach über andere Arten leichter dominieren können.

### 5.1 Migration und Neophyten

Unter migrierenden Arten sind Wasserpflanzen zu verstehen, die aus ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet kommend in ein neues Gebiet einwandern, wobei über die Ursache dieser Migration in vielen Fällen nur spekuliert werden kann (etwa passiver Transport von Verbreitungseinheiten, wie z. B. Sprossstücken), der Klimawandel aber als eine der möglichen Ursachen nicht ausgeschlossen werden kann. Dies gilt vor allem bei Arten, die aus wärmeren Teilen Europas in vormals kältere einwandern (z. B. Ost-West-Wanderung entlang der Donau flussauf). Ein rezentes Beispiel ist der Wasserfarn, der seit 2006 in einem Gewässer der Praterauen nachweisbar ist und große Bestände bilden kann. Seine frühere Grenze flussauf lag in der Slowakei.

Andererseits ist über die Donau flussab seit etwa 1975 der Nussfrüchtige Wasserstern in österreichischen Nebengewässern des Hauptstroms nachweisbar, der in der Zwischenzeit den Weg bis nach Rumänien gefunden hat. Die gleiche Route hat etwa im selben Zeitraum Nuttalls Wasserpest genommen, die sich ebenfalls flussab in alle Anrainerstaaten verbreitet hat.

Eine ähnliche Entwicklung zeigen in jüngster Zeit echte Neuankömmlinge, die Neophyten. Ornamentale Pflanzen aus zumeist subtropischen Gebieten sind über den Fachhandel und über das Internet jederzeit verfügbar und werden bei zu starkem Aufkommen in Aquarien oder Gartenteichen in heimische Gewässer ausgesetzt. Infolge wärmerer Winter können sie sich z. B. im Donauroum leicht etablieren. So hat sich eine aquatische Art der Dickblattgewächse, *Crassula helmsii* (verwandt mit dem Pfennigbaum / Fetthenne) über die Britischen Inseln und weite Teile West-Europas verbreitet (*Bild 8*), sporadisch auch bis Deutschland. Über die Schifffahrtskanäle wandernd wäre ein Auftreten dieser Art in Österreich im nächsten Jahrzehnt nicht ganz unwahrscheinlich. Die hohe Konkurrenzkraft dieser Pflanze könnte für manche einheimische Art in stehenden und langsam fließenden Gewässern zu einem Verdrängungsproblem führen.



*Bild 8:* *Crassula helmsii* (Kirk) Cockayne

Die Europäische und Mediterrane Pflanzenschutzorganisation (EPPO, 44 Mitgliedsstaaten) setzt sich mit der Einschleppung von Kultur- und Wildpflanzen auseinander und hat ein Konzept zur Begrenzung und/oder Bekämpfung dieser invasiven, gebietsfremden Arten („Pflanzen als Schadorganismen“) ausgearbeitet. In Großbritannien ist in gleicher Richtung das GB Non-Native Species Secretariat NNSS aktiv ([www.nonnativespecies.org](http://www.nonnativespecies.org)).

Für Deutschland wurde das Problem ebenfalls erkannt und eine Neophyten-Liste veröffentlicht (Tabelle 2). Weiterführende Informationen im Internet unter der Adresse [www.aquatischeophyten.de](http://www.aquatischeophyten.de).

Tabelle 2: Neophyten-Liste Deutschland (Quelle: *lanaplan* / van de Weyer)  
[www.lanaplan.de/public/index/rubrik/Makrophyten/artikel/Aquatische%20Neophyten](http://www.lanaplan.de/public/index/rubrik/Makrophyten/artikel/Aquatische%20Neophyten)  
 Arten, die im Donaauraum bereits nachgewiesen sind, wurden kursiv gesetzt. Jahreszahl in Klammer: erstes Auftreten in Deutschland

<i>Azolla filiculoides</i>	(1980)	<i>Lemna aequinoctialis</i>	(1980)
<i>A. mexicana</i> c.f. (?)	(?)	<i>L. minuta</i>	(1990)
<i>Crassula helmsii</i>	(1988)	<i>L. turionifera</i>	(1965)
<i>Egeria densa</i>	(1914)	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	(1988)
<i>Eichhornia crassipes</i>	(?)	<i>M. heterophyllum</i>	(1960)
<i>Elodea canadensis</i>	(1965)	<i>Pistia stratiotes</i>	(?)
<i>E. nuttallii</i>	(1953)	<i>Sagittaria latifolia</i>	(1952)
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	(2004)	<i>S. subulata</i>	(1980)
<i>Hydrilla verticillata</i>	(1907)	<i>Salvinia auriculata</i> agg.	(?)
<i>Hygrophila polysperma</i>	(2005)	<i>Shinnersia rivularis</i>	(1992)
<i>Lagarosiphon major</i>	(1970)	<i>Vallisneria spiralis</i>	(1900)

Eine weitere stark invasive Pflanzengattung stellt *Ludwigia* (Heusenkraut) dar, deren Arten u. a. aus Südamerika stammen und von Westeuropa auf die Britischen Inseln und weiter auf den Kontinent vordringen. Besonders die Fähigkeit, mit auf dem Wasser schwimmenden Sprossen weite Teile von stehenden oder langsam fließenden Gewässern, aber auch feuchte Wiesen total überwuchern zu können, führt u. a. in Frankreich zu größten Problemen in der Nutzung von Fischteichen. Auch aus Spanien, Italien, Belgien, Holland und der Schweiz sind Vorkommen gemeldet.

Allgemein stellen weniger die submersen Makrophyten als jene, die die Wasseroberfläche von Gewässern gesamthaft besiedeln können, eine ernst zu nehmende Gefahr dar. Ausbreitungsraten von mehr als 100 Hektar im Jahr wurden berichtet. Als direkte Folgen können genannt werden:

- Die Abdeckung auch großer Wasserflächen in sehr kurzer Zeit
- Unter der Pflanzendecke starke Verminderung der Sauerstoffkonzentration und erhebliche Abkühlung des Wasserkörpers (u. U. ein Problem für die Entwicklung von Wasserinsekten oder Fischen)
- Verlangsamung des Wasserabflusses
- Massive Unterdrückung aller anderen, vor allem nützlicher heimischer submerser Makrophyten
- Rapide Beschleunigung der Verschlämmung (Sedimentneubildung) der Gewässer und in der Folge beschleunigte Verlandung.

Die *Bilder 9 und 10* lassen erkennen, dass auch heimische Pflanzenarten ähnliche Effekte bewirken können, wenn z. B. durch lang andauernde Trockenperioden günstige Voraussetzungen für eine Massenvermehrung bestimmter Makrophyten gegeben sind.



*Bild 9: Wasserlinsen-Decke (Altarm an der March)*



*Bild 10: Massenbewuchs der Wassernuss infolge niederer Wasserstände (Csatloi Holt Tisza/Theiss-Altarm; verheerendes Fischsterben durch Sauerstoffmangel)*

## **5.2 Erhöhte Abflüsse als Folge der Klimaänderung**

Veränderungen des Abflussverhaltens von Flüssen infolge von Starkregenereignissen führen zu stärkeren kurzfristigen Flutungen von Augewässern. Da an den regulierten Flüssen Europas, daher

auch an der Donau in Österreich, die Augewässer zu letzten Refugien von Stillgewässerpflanzen in der durch Siedlungsausweitung und Intensiv-Landwirtschaft vollständig überprägten Kulturlandschaft geworden sind, gefährden solche Flutungszustände die dort überlebenden Wasserpflanzen. Dies zeigen wissenschaftliche Untersuchungen in den stromnahen Bereichen von Altwässern ganz eindeutig (Janauer, unveröffentlicht). Noch intensivere negative Wirkung geht allerdings von einer nicht lokal und regional abgestimmten Rehabilitierung von Altarmschlingen aus, durch die große Anteile oder auch der gesamte Abfluss eines Fließgewässers wieder ständig durch das Altwässersystem geleitet werden.

## 6 Zusammenfassung

Abschließend lässt sich folgendes Szenario für klimabedingte Veränderungen der Makrophytenvegetation darstellen:

Mit Sicherheit folgen weitere Invasionen Wärme liebender aquatischer Vegetationselemente, die zum Teil bereits in Form von Migrationen bekannter Arten manifest sind. Die Verbreitung erfolgt dabei vorwiegend entlang der Donau, wobei thermophile Elemente aus dem unteren Donaunraum flussauf vordringen, und sich aus dem atlantischen Bereich Makrophyten über den Rhein-Main-Donau-Kanal flussab verbreiten. Soweit Neophyten betroffen sind, erfolgt ihre Einbringung oft über anthropogene Verbreitung, u. a. aus Zier- oder Schwimmteichen. In geschützten Habitaten kann ein Überdauern der winterlichen Kälteperiode leicht stattfinden: z. B. ist das Vorkommen der ursprünglich tropisch-subtropischen Wasserschraube *Vallisneria* in einem Becken des Donau-Oder-Kanals seit über 40 Jahren bekannt.

Der Zeithorizont für zumindest teilweise klimabedingte Ausbreitung von migrierenden Arten und Neophyten liegt nicht in der Zukunft – schon heute sind einzelne Neuankömmlinge Teil unserer Gewässerflora.

Für die heimische Makrophytenvegetation sind Gefährdungen vor allem in stehenden und langsam fließenden Gewässern oder Gewässerabschnitten gegeben. Da dies besonders die äußerst schützenswerten Auegebiete der Donau betrifft, ist hier besondere Aufmerksamkeit geboten. Aber selbst im Hauptgerinne der Donau erfolgte 2007 ein Massenbewuchs von Wasserlinsen im Raum Szentendre (Ungarn), und seit 2002 ist das Massenaufreten von Cabomba in Ungarischen Bewässerungskanälen bekannt.

Viele der neuen Arten haben starke Auswirkungen auf das befallene Gewässersystem, besonders aber auf die vorher dort wachsenden Wasserpflanzen. Gefährdung der heimischen Biodiversität, Auswirkungen auf die Fisch- und Evertebratenfauna und Sportfischerei, die Behinderung verschiedener Freizeitnutzungen (Baden, Bootfahren), Erhöhung der Verlandungsrate, aber auch Veränderung der Referenzbedingungen für die Erfassung des ökologischen Gewässerzustands im Sinne der Europäischen Wasser-Rahmenrichtlinie sind als Auswirkungen zu nennen, die durch den Klimawandel zumindest teilweise hervorgerufen oder stark unterstützt werden. Wieweit sich in diese Vorgänge eingreifen lässt, ist allerdings nicht endgültig geklärt.

## 7 Literatur

- Chovanec, A., Straif, M., Waidbacher, H., Schmidt, B., Janauer, G., Keckeis, H., Rakowith, G., Moser, K., Schmidt, J., Wimmer, R., Hain, A. (2006). Fischökologische Untersuchung zur Funktionsfähigkeit anthropogen gestalteter Flusshabitate an der Donau und ausgewählter Zubringer in den Regionen Wien – Győr. EU INTERREG III A. Hrsg. Magistrat der Stadt Wien (MA 45), Bundesministerium für Wissenschaft und Kunst, Amt der NÖ Landesregierung. 89pp.
- ICPDR (2002). Joint Danube Survey 1. Technical Report. International Commission for the Protection of the Danube River. Vienna. 261pp.
- IPCC (2008). Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaänderungen / IPCC. 4. Sachstandsbericht zur Klimaänderung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Deutschland. Zitiert nach dem Internet [6.6.2008]: [www.bmu.de/klimaschutz/internationale\\_klimapolitik/ipcc/doc/39274.php](http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/ipcc/doc/39274.php).
- Janauer, G., Dokulil, M. (2006). Macrophytes and algae in running waters. In: Ziglio, G., Siligardi, M., Flaim, G. (eds.) Biological Monitoring of Rivers: Applications and Perspectives. John Wiley & Sons, Ltd. Pp.89-109.
- Janauer, G.A., Hale, P., Sweeting, R. (2003). Macrophyte inventory of the River Danube: a pilot study. Arch. Hydrobiol. 147 (1-2), 229 pp.
- Janauer, G.A., Wychera, U. (2000). Biodiversity, succession and the functional role of macrophytes in the New Danube (Vienna, Austria). Arch. Hydrobiol. 135, 61-74.
- MIDCC (2005). Makrophyten, Flusskorridor, Landnutzung, Habitate: Eine multifunktionale Studie im Einzugsgebiet der Donau auf GIS-Basis. Janauer, G.A. und Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kunst. Zitiert nach dem Internet [jüngste Revision: Mai 2008]: [www.midcc.at](http://www.midcc.at).
- Westlake, D.F. (1973). Aquatic macrophytes in rivers: a review. Pol.Arch.Hydrobiol. 20, 31-40.

### **Anschrift des Autors**

Univ.-Prof. Dr. Georg A. Janauer  
 Universität Wien  
 Department für Limnologie und Hydrobotanik  
 Althanstraße 14, 1090 Wien  
 Tel. +43-1-4277-543 60  
 E-Mail: [georg.janauer@univie.ac.at](mailto:georg.janauer@univie.ac.at)



# Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Fischfauna

Stefan Schmutz

## Zusammenfassung

Aktuelle und prognostizierte Veränderungen der Lebensraumbedingungen aquatischer Ökosysteme infolge Klimawandel implizieren Änderungen der organismischen Besiedelung. Fische als Endglieder der Nahrungskette stellen integrative Indikatoren für Änderungen in aquatischen Ökosystemen dar. Der Anstieg der Wassertemperatur und Änderungen in der Hydrologie der Gewässer sowie deren Folgewirkungen sind die bedeutendsten Einflussfaktoren für die Fischfauna. Fische sind in vielfältiger Weise vom Klimawandel betroffen. Insgesamt ist mit einer Verschiebung der Artenzusammensetzung hin zu wärmetoleranten und ein Zurückdrängen kälteliebender Arten zu rechnen. V.a. aufgrund der Wechselwirkung mit anderen Belastungen wie Kontinuumsunterbrechungen, Regulierungen, Wasserkraftwerken und weiteren, thermisch wirksamen Einflüssen ist mit einer fortschreitenden Degradation der bereits stark bedrohten Fischfauna zu rechnen. Während in den USA bereits seit den 1990er-Jahre intensiv zu diesem Thema geforscht wird, besteht in Österreich und Europa gravierender Mangel an einschlägigen Studien.

## 1 Folgen von Klimaänderungen für die Lebensraumbedingungen von Fischen

Der für die Fischfauna wesentliche Wärmehaushalt im Längsverlauf der Fließgewässer ist von vielen Faktoren abhängig. Die Quelltemperatur (Grundwassertemperatur) korreliert deutlich mit der mittleren jährlichen Lufttemperatur. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle kommt es im Sommer zu einer Erwärmung und im Winter zu einer Abkühlung der Gewässer, wobei der Erwärmungs-/Abkühlungsgrad grundsätzlich von der Gewässerdimension abhängt. In Hinblick auf eine mögliche Temperaturänderung ist es auch von Bedeutung, ob die Gewässer gegenwärtig im Winter zufrieren und so die Kopplung Luft- zu Wassertemperatur unterbrechen. Lokal kann dieses Temperaturkontinuum durch Seen oder Grundwassereinträge unterbrochen sein. Auch die Beschattung durch die Ufervegetation stellt einen wesentlichen Faktor dar. Kleine Gewässer weisen generell größere tages- und jahreszeitliche Schwankungen als große Gewässer auf.

Die Donau als größtes Fließgewässer Österreichs integriert sehr gut die Veränderungen der Temperaturverhältnisse im gesamten Einzugsgebiet. Die mittlere jährliche Wassertemperatur der Donau ist im letzten Jahrhundert um 1,3 °C, von 8,9 °C auf 10,2 °C angestiegen (*Bild 1*). Die vier höchsten Werte lagen alle im letzten Jahrzehnt. Der Trend setzte sich auch in den letzten Jahren fort.

Diese Entwicklung scheint in der Zukunft noch deutlich verstärkt zu werden. Morrison et al. (2002) z. B. prognostizierten für den Fraser River (BC, Canada) basierend auf einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes eine mittlere Zunahme der Sommertemperaturen von 1,9 °C für den Zeitraum 2070–2099.

Temperaturänderungen führen auch zur Beeinflussung anderer, die Fischfauna prägenden Faktoren. Hierzu sind v. a. das Abflussgeschehen, letztendlich aber auch Änderungen des Feststoffhaushalts sowie der morphologischen Ausgestaltung der Gewässer zu zählen. Nicht zuletzt können

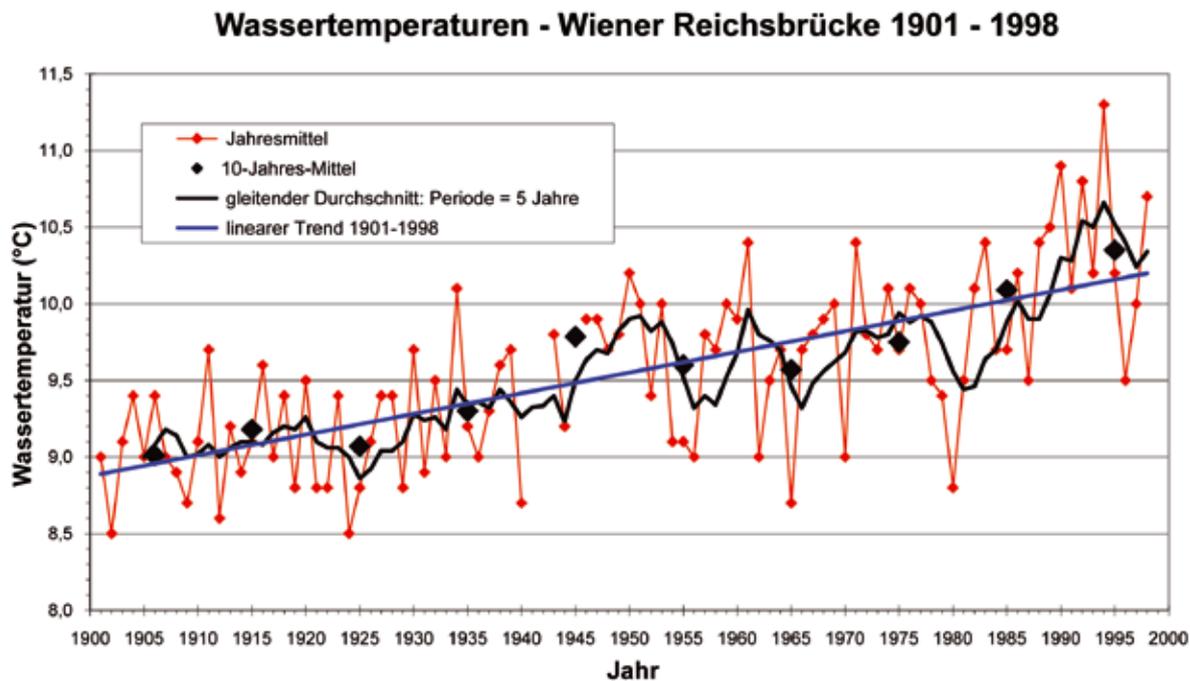


Bild 1: Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperatur der Donau bei Wien im 20. Jahrhundert (unveröffentlichte Datenzusammenstellung von S. Hohensinner basierend auf diversen HZB Publikationen)

auch Sekundäreffekte wirksam werden, wie z. B. klimawandelbedingte Zunahme der Sensitivität von Fischen gegenüber toxischen Belastungen.

## 2 Die Bedeutung der Wassertemperatur für Fische

Die Wassertemperatur stellt einen der bedeutendsten Faktoren für aquatische Organismen dar. Fische reagieren als wechselwarme Organismen besonders sensibel auf Temperaturveränderungen. Alle Lebensbereiche sind stark von der Wassertemperatur beeinflusst. Die Wassertemperatur regelt Wanderverhalten, Eientwicklung, Laichgeschehen, Befruchtungs- und Wachstumsrate, inter- und intraspezifische Konkurrenz, aber natürlich auch den Stoffwechsel, die Atmung und die Toleranz der Tiere gegenüber Parasiten und Schadstoffen (Bild 2). Oftmals limitieren schon geringfügige Änderungen das Überleben einzelner Arten oder Lebensstadien (Jungwirth & Winkler, 1984). In zoogeografischer Hinsicht spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle. So ist die Wassertemperatur einer der wesentlichsten Faktoren für regionale und höhenzonale Verbreitungsgrenzen einzelner Fischarten und Lebensgemeinschaften.

Der Einfluss der Temperatur auf Fische wird in drei Bereiche gegliedert: (1) Letale Temperatur führt zum Tod, (2) subletale Temperaturen führen zu physiologischen Beeinträchtigungen (Wachstumsverringerung, reduzierte Vermehrungsfähigkeit etc.), (3) optimale Temperaturen gewähren die beste Lebensfähigkeit. Fischarten sind hinsichtlich ihrer Temperaturpräferenzen unterschiedlich eingemischt. Kälteliebende Arten stehen wärmeliebenden gegenüber. Hinsichtlich Temperaturniveau, Temperaturoptima und -grenzwerte für Fischzönosen weisen Fische vergleichsweise enge thermische Nischen auf. Eingriffe ins Temperaturregime eines Gewässers können Nachteile für die eine und Vorteile für die andere Art mit sich bringen. Eine Erhöhung der Temperatur kann das

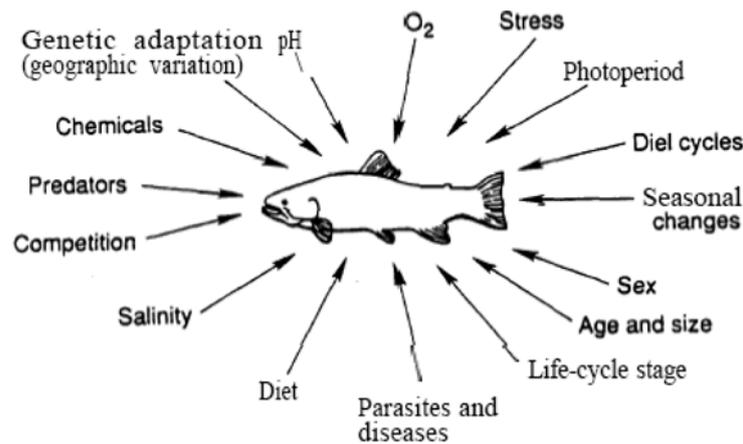


Bild 2: Wechselwirkungen zwischen der Wassertemperatur und anderen die Fische beeinflussenden Faktoren (nach Hutchinson, 1976)

Verschwinden von Salmoniden (Forellenartigen) bedeuten. Andererseits sind Cypriniden (Karpfenartige) an gewisse Minimaltemperaturen hinsichtlich ihrer Reproduktion gebunden.

Um den Einfluss von Veränderungen des Temperaturregimes auf die jeweiligen Fischarten abschätzen zu können, ist die Kenntnis der Temperaturpräferenzen und -grenzwerte für die verschiedenen Lebensstadien unerlässlich. In *Tabelle 1* werden beispielgebend für die unterschiedlichen Lebensstadien von Bachforelle, Äsche, Koppe, Aitel, Barbe, Nase und Elritze Temperaturoptima und -grenzwerte angegeben. Die unterschiedlichen Lebensstadien bei Fischen haben verschiedene Temperaturtoleranzbereiche. Meist weist das Eistadium, im Vergleich zu den Adultstadien, einen engeren Temperaturbereich auf. Die Fortpflanzung findet in einem besonders engen Rahmen statt. Die Toleranzbereiche unterscheiden sich zudem zwischen den verschiedenen Arten beträchtlich.

Tabelle 1: Temperaturoptima und -grenzwerte [°C] für einige in Österreich vorkommende Fischarten und deren Lebensstadien (Küttel et al., 2002)

		<b>Bachforelle</b> <i>Salmo trutta fario</i>	<b>Äsche</b> <i>Thymallus thymallus</i>	<b>Koppe</b> <i>Cottus Gobio</i>	<b>Aitel</b> <i>Leuciscus cephalus</i>	<b>Barbe</b> <i>Barbus barbus</i>	<b>Nase</b> <i>Chondostroma nasus</i>	<b>Elritze</b> <i>Phoxinus phoxinus</i>
Adultstadium	Maximum	25-30	26	33	39	30		31
	ob. Optimum	19	18	27	25			25
	unt. Optimum	4	4	4	8			13
	Minimum	0	0	0	8			0
Juvenile	Maximum	28		33				23
	ob. Optimum	14		27				
	unt. Optimum	7		5				
	Minimum	0		0		14		
Eientwicklung	Maximum	14	16		30	21	19	16
	ob. Optimum	9	14		24	21	17	16
	unt. Optimum	1	7		16	16	12	6
	Minimum	0	0		16	16	10	6
Fortpflanzung	Maximum	13	15	14	18	29	16	22
	ob. Optimum	10	10	14	18	20	16	22
	unt. Optimum	1	6	7	13	14	10	11
	Minimum	1	4	7	13	8	7	7

### 3 Längenzonale Gliederung von Fließgewässern nach biozönotischen Regionen

Fließgewässer werden schon seit etwa 140 Jahren von der Quelle bis zur Mündung in Fischregionen gegliedert. Heute spricht man auch von biozönotischen Regionen (Illies und Botosaneanu, 1963). Die klassischen Regionen umfassen die Quelle, den Quellbach, die obere und untere Forellenregion, die Äschenregion, die Barbenregion, die Brachsenregion und die Kaulbarsch-Flunder-Region. Im Kontext mit der globalen Erwärmung kommt den Fischregionen eine wichtige Rolle als bioindikatorische Messgröße zu, da die Ausprägung der Fischzönosen sehr stark von der Wassertemperatur geprägt wird. Auf diese Weise kann im Vergleich zu bekannten Referenzzuständen die Auswirkung von Temperaturänderungen auf die Gewässerzönosen nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Zugehörigkeit einer Fischlebensgemeinschaft zu einer Fischregion kann mittels des Fischregionsindex beschrieben und quantifiziert werden (Schmutz et al., 2000). Erhöhungen des Fischregionsindex bedeuten eine „Potamalisierung“, Erniedrigungen eine „Rhithralisierung“ der Lebensgemeinschaften. Durch Klimaerwärmung hervorgerufene Änderungen in der Artensammensetzung führen demnach zu Potamalisierungserscheinungen und lassen sich mittels Fischregionsindex quantifizieren (Schmutz et al., 2004; Matulla et al., 2007).

*Tabelle 2: Fischregionen, Biozönotische Regionen und dazugehörige Fischregionsindizes (Schmutz et al. 2000)*

Fischregion	Biozönotische Region	Fischregionsindex
Obere Forellenregion	Epirhithral	3
Untere Forellenregion	Metarhithral	4
Äschenregion	Hyporhithral	5
Barbenregion	Epipotamal	6
Brachsenregion	Metapotamal	7

### 4 Veränderungen der Verbreitung einzelner Arten und Artengemeinschaften

Während v. a. in Nordamerika zum Thema Klimawandel und dessen Folgen für Süßwasserfische bereits seit ca. 15 Jahren Untersuchungen laufen, ist die diesbezügliche Forschung in Österreich kaum existent (Schmutz & Jungwirth, 2003). Wissenschaftlich besteht jedoch darüber Konsens, dass eine globale Erwärmung für die meisten kälteliebenden Arten in einer Verschiebung ihrer Lebensräume gegen höhere Breiten und in größere Seehöhen resultieren wird (Jackson and Mandrak, 2002; Rahel, 2002; Mohseni et al., 2003). Man geht auch davon aus, dass kälteliebende Arten durch wärmeliebende Arten ersetzt werden (Daufresne et al., 2004). Diese Annahme wird durch paläoklimatische Untersuchungen unterstützt, die derartiges für die glazialen und interglazialen Perioden des Pleistozän belegen. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die Klimaänderung langsam genug vor sich geht, so dass eine Anpassung möglich ist. Weitere Voraussetzung ist, dass die Temperaturveränderung synchron mit anderen wesentlichen Lebensraumfaktoren erfolgt.

Mohseni et al. (2003) prognostizierten in einer breit angelegten Studie in den USA (764 Messstellen), dass, unter der Annahme einer CO<sub>2</sub>-Verdoppelung in der Atmosphäre, an 36 % der unter-

suchten Standorte keine geeigneten Temperaturbedingungen für Kaltwasserfische und an 15 % für Fische mit Präferenzen für kühles Wasser mehr vorliegen werden. Diese Veränderungen sind mit einer Verschiebung des Verbreitungsgebietes nach Norden verbunden. Im Gegensatz dazu nimmt die Zahl geeigneter Standorte für Warmwasserfische um 31 % zu. Laut Vorhersagemodellen von Casselman (2002) führt eine Temperaturerhöhung zu einer Zunahme der Dichte von Warmwasserarten (z. B. beim Schwarzbarsch bei 1 °C Erwärmung um Faktor 2,5, bei 2 °C um Faktor 6 und bei 3 °C um Faktor 14,7). Im Gegensatz dazu verringerte sich die Dichte bei Arten mit Präferenzen für kälteres Wasser (z. B. beim Hecht bei 1 °C Erwärmung um Faktor 2,4, bei 2 °C um Faktor 17,9). In ähnlicher Weise hat eine Zunahme der Temperatur eine verringerte Reproduktionsrate bei Kaltwasserfischen zur Folge (z. B. beim Amerikanischen Seesaibling nimmt der Schlupferfolg bei 1 °C Temperaturerhöhung im Herbst um den Faktor 1,5, bei 2 °C um den Faktor 20,1 ab). Jackson und Mandrak (2002) prognostizierten für Kanada, dass es aufgrund der erwarteten Temperaturerhöhungen zu einer Ausdehnung des Verbreitungsgebietes von Warmwasserfischen Richtung Norden kommen wird. So wird vorhergesagt, dass infolge der Ausbreitung des Schwarzbarsches, einem Räuber, 24.000 Populationen von 4 konkurrenzschwachen Cyprinidenarten verschwinden werden. Rahel (2002) fasste Studien zusammen, die anhand bestehender, temperaturbedingter Verbreitungsgrenzen bestimmter Arten Vorhersagen für Verbreitungsverschiebungen infolge Temperaturerhöhungen treffen. So beschrieb er einen Habitatverlust für Kaltwasserfische in den Rocky Mountains infolge 1–5 °C Temperaturerhöhung (Julimittel) in der Höhe von 17 bis 72 %.

Inwieweit Fische in der Lage sind, durch genetische Anpassungen ihre Lebensfähigkeit unter geänderten Klimabedingungen zu gewährleisten, ist unbekannt. Es stellt sich v. a. die Frage, inwiefern eine zeitliche Synchronität zwischen raschen Klimaänderungen und möglichen genetischen Anpassungen, die sich über den Zeitraum mehrerer Generationen erstrecken, gegeben ist.

Übertragen auf Österreich würden die bisherigen Erkenntnisse ein Zurückdrängen der Salmoniden bedeuten. Einzelne Arten, wie z. B. die Äsche, sind derzeit infolge anderer anthropogener Eingriffe in ihrem Bestand schon so stark gefährdet, dass zusätzliche, klimabedingte Beeinträchtigungen sie an den Rand des Aussterbens bringen könnten. Jedoch nicht nur einzelne Arten, sondern die gesamte Lebensgemeinschaft ist von den Klimaänderungen betroffen. Dies kann sich z. B. in einer Verschiebung des Fischregionsindex zeigen (Schmutz et al., 2004; Mattula et al., 2007). Räumlich betrachtet entspricht dies einer Verlagerung der Fischregionen nach flussauf (Phänomen der Potamalisierung, siehe oben).

## 5 Verhaltensänderungen infolge Klimawandel

Wie oben erwähnt, können Temperaturänderungen das Verhalten von Fischen maßgeblich beeinflussen. Anhand von Fischmigrationen sollen hier beispielhaft mögliche Einflüsse des Klimawandels aufgezeigt werden. Fische unternehmen jährlich kurze bis lange Wanderungen zwischen verschiedenen Lebensräumen. Am ausgeprägtesten sind Laichwanderungen. Langjährige Beobachtungen (44 Jahre) der Laichgewohnheiten von Fischen in Estland zeigten z. B., dass sich klimabedingt eine Verschiebung der Laichtermine bei Hechten um 6 Tage und bei Brassen um 8 Tage ergab (Ahas, 1999).

Neben der Wassertemperatur ist v. a. die Tageslänge für die Gonadenentwicklung von Bedeutung. Es ist augenscheinlich, dass der Erfolg der Laichwanderung und der Reproduktion von der Syn-

chronität zwischen Tageslänge und Wassertemperatur abhängt. Klimabedingte Veränderungen in der Terminisierung des Wanderungsverhaltens können hier zu einschneidenden Veränderungen und Bedrohungen für betroffenen Arten führen.

Als besonders gefährdet gelten Arten mit besonders spezifischen Ansprüchen an ihren Lebensraum, isolierten Habitaten und geringen Populationsstärken (Rabinowitz et al., 1986). Aufgrund anderer Belastungen sind bereits ca. drei Viertel der österreichischen Fischarten gefährdet (Spindler et al.). Zusätzliche Belastungen infolge Klimawandel könnten diese Situation noch deutlich verschlechtern.

### 5.1 Fallbeispiel Mur

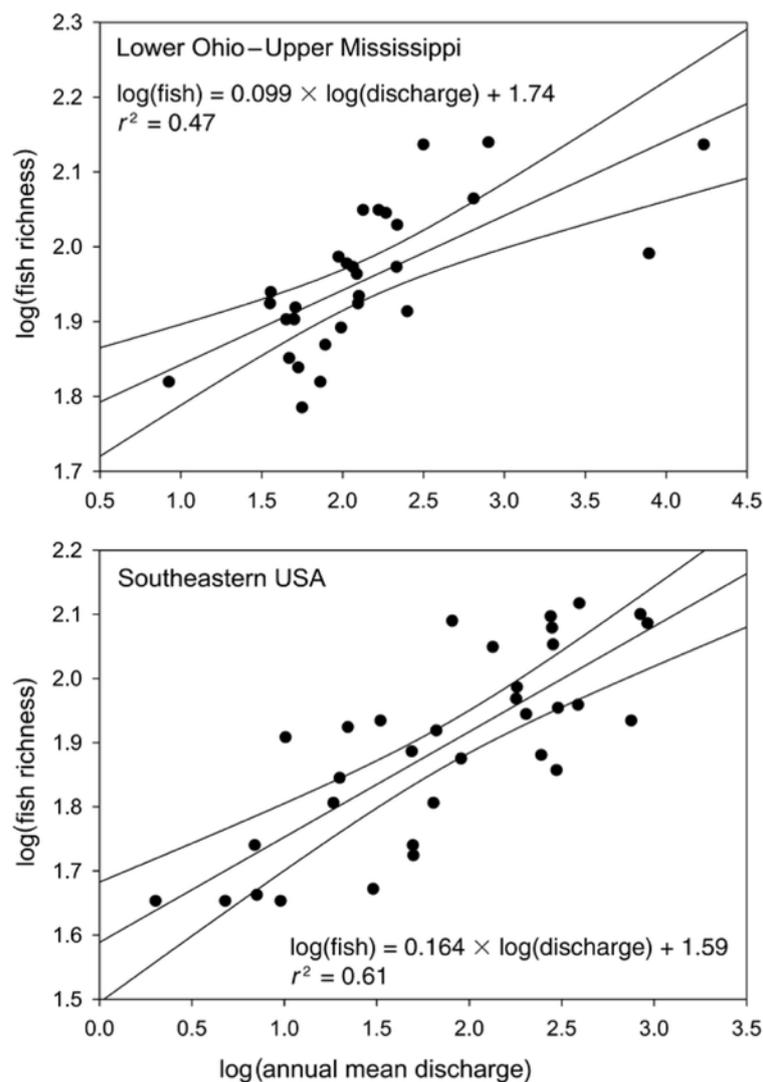
Schmutz et al. (2004) und Mattula et al. (2007) entwickelten anhand einer Modellkette ein Prognosesystem, mit welchem eine lokale Vorhersage von Klimafolgen für Fische möglich ist. Ausgehend von großräumigen IPCC-Emissionsszenarien wurden für die Mur, einen inneralpinen Fluss in Österreich, in einem Downscaling-Verfahren lokale Klima- und Wassertemperaturveränderungen prognostiziert und die daraus folgenden Änderungen der Fischartenzusammensetzung anhand des Fischregionsindex beurteilt. Methodisch bediente man sich der Space-for-time-substitution, einer Methode, bei der die derzeitigen biogeografischen und längszonalen Grenzen verwendet werden, um die zukünftige Verbreitung der Fische vorherzusagen. Damit lassen sich Zukunftsszenarios unterschiedlicher Temperaturveränderungen erstellen (Flebbe et al., 2006). Die Modelle an der Mur wurden anhand der Sommermonatsmittel erstellt, da im Sommer die höchsten und damit am stärksten limitierenden Temperaturen auftreten. Für die Sommermonate wurden Temperaturzunahmen von 0,5 (Untere Forellenregion) bis 0,8 °C (Barben- und Brachsenregion) prognostiziert. Die Temperaturerhöhung resultierte in einer Zunahme des Fischregionsindex von 0,22 Einheiten. Dies entspricht einer Verschiebung der Fischregion um 70 Seehöhenmeter bzw. in einer längszonalen Verlagerung der Fischregionen nach flussauf um ca. 30 km. Entsprechend diesem Szenario würden die Salmoniden nach flussauf zurückgedrängt und der Lebensraum für Cypriniden vergrößert werden (Potamalisierung). Am stärksten wird voraussichtlich die Äsche von den Temperaturerhöhungen betroffen sein, da deren Verschiebung durch ihre Präferenz für größere Gewässer nach flussauf limitiert ist.

## 6 Einfluss veränderter Hydrologie auf die Fischfauna

Fische weisen distinkte Anpassungen an hydrologische Verhältnisse von Fließgewässern auf, insbesondere in Bezug auf Abflusshöhe, jahreszeitliche und räumliche Verteilung und Extremereignisse (Niederwasser, Hochwasser). Fließgewässer, die bislang intermittierend waren, könnten infolge Wassermangel vollkommen austrocknen. Gewässer mit geringem Abfluss könnten intermittierend und so für Fische unattraktiv werden. Gletscherbäche könnten hingegen, wie in Österreich im extrem sommerwarmen Jahr 2003, zumindest solange die Gletscher nicht vollkommen abgeschmolzen sind, in den Sommermonaten sogar mehr Wasser führen. Veränderung der Vegetationsdecke im Einzugsgebiet beeinflusst die Erosionsprozesse und den Eintrag von Sedimenten ins Gewässer. Dadurch können auch Fische betroffen sein, da ihre Lebensfähigkeit stark von den Sedimentverhältnissen im Gewässer abhängen. So kann z. B. der erhöhte Eintrag von Feinsedimenten aus dem Einzugsgebiet infolge Trockenheit und/oder Zunahme von Starkregenereignissen zu einer Verdrängung von Salmoniden führen, da diese Arten besonders stark auf klares Wasser und intakten Kieslückenraum angewiesen sind.

In den meisten Klimamodellen wird eine Zunahme von Extremereignissen vorhergesagt. Neben einer Häufung von Hitzewellen geht man v. a. von einem Anstieg an Starkregenereignissen und daraus resultierenden Hochwässern aus. Katastrophenhochwässer stellen einen massiven Stress für aquatische Organismen dar und führen bei Fischen meist zu einer massiven Ausdünnung der Bestände. Wiederbesiedelung entwester Bereiche ist jedoch aufgrund der heutzutage häufig vorzufindenden Kontinuumsunterbrechungen nicht oder nur über sehr lange Zeiträume möglich.

Eine der wenigen wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema klimabedingter Änderungen der Hydrologie und deren Folgewirkungen stammt von Xenopoulos & Lodge (2006). In dieser Studie wurde untersucht, wie sich eine Wasserverknappung auf die Fischartendiversität in (semi-)ariden Einzugsgebieten auswirken könnte. Der methodische Ansatz geht vom bekannten Arten-Areal-Konzept aus: Je größer ein Einzugsgebiet ist, umso höher ist die Artenzahl. Analog dazu verwendeten sie für diese Studie den Abfluss als Kenngröße für die Dimension des Lebensraumes. Sie prognostizierten, dass eine erwartete Abnahme des Abflusses in Höhe von 20–90 % zu einem Verlust von 2–38 % der Fischarten führen könnte (*Bild 3*).



*Bild 3: Beziehung zwischen mittlerem jährlichem Abfluss und Anzahl der Fischarten in Einzugsgebieten der USA (Xenopoulos & Lodge, 2006)*

## 7 Klimawandel als nur *ein* Faktor globaler Veränderungen

Erschwerend bei der Erforschung möglicher Einflüsse des Klimawandels wirkt die Tatsache, dass aquatische Ökosysteme, insbesondere Fließgewässer, durch andere menschliche Eingriffe bereits heute stark beeinträchtigt sind und daher oft die Gefahr besteht, dass klimabedingte Effekte durch andere Faktoren überlagert, und somit nicht leicht erkennbar sind. So sind z. B. in Österreich etwa 80 % der größeren Fließgewässer hinsichtlich ihrer hydromorphologischen Charakteristik infolge von Wasserkraftwerken und Flussregulierung stark beeinflusst (Muhar et al., 1998). Dies bedeutet für die Forschung, dass klimabedingte Einflüsse nicht isoliert von anderen anthropogenen Beeinträchtigungen betrachtet werden können.

## 8 Sozioökonomische Folgen

Abnahme der Habitatqualität dieser Gewässer oder Verlust einzelner Gewässerstrecken würde neben ökologischen auch deutliche sozioökonomische Folgewirkungen erwarten lassen. Salmonidengewässer zählen zu den attraktivsten Angelsportgewässern in Österreich. In Österreich ist die Zahl der Sportfischer bereits auf 400.000 angewachsen. Die Sportfischerei stellt einen wichtigen ökonomischen Faktor dar, insbesondere wenn man die Sekundärmärkte wie Freizeit, Tourismus und Angelgerätefachhandel hinzuzählt. Fischereireviere unterscheiden sich deutlich in ihrer fischereilichen Wertigkeit. So kann der jährliche Pachtpreis für 1 km Salmonidengewässer (Fliegenfischergewässer) bis zu 7.000 Euro und mehr betragen, wohingegen Barben- und Brachsengewässer auf wesentlich niedrigerem Preisniveau liegen. Eine Änderung der Artenzusammensetzung infolge Klimawandels, insbesondere ein Verlust an hoch attraktiven Salmoniden, wie Bachforelle, Äsche und Huchen, kann zu einer deutliche Wertminderung eines Gewässers führen.

## 9 Ausblick

Die hier dargestellten Ergebnisse belegen eindeutig die vielfältigen potenziellen Gefahren für die Fischfauna durch Klimawandel. Während grundsätzliche Einflüsse des Klimawandels zumindest für nordamerikanische Verhältnisse weitgehend bekannt sind, fehlen entsprechende großräumige Untersuchungen in Österreich und Europa. Insbesondere die spezifische Situation in alpin geprägten Landschaften ist praktisch unerforscht. Fragen wie

- 1) Wie wirken sich klimabedingte Veränderungen auf temperaturregulierte Mechanismen in Verhalten und Verbreitung in unseren Alpenflüssen aus?
- 2) Welche Interaktionen gibt es zwischen klimabedingten und anderen menschlichen Einflüssen in unseren stark genutzten Fließgewässern?
- 3) Wie wirken sich klimabedingte Änderungen der Fischfauna auf die angelfischereilichen Verhältnisse aus?

sollten Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

## 10 Literatur

- Ahas, R., 1999. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology* 42: 119-123.
- Casselman, J.M., 2002. Effects of temperature, global extremes, and climate change on year-class production of warmwater, coolwater and coldwater fishes in Great Lakes Basin. In: N.A. McGinn (ed). *Fisheries in a changing climate*. American Fisheries Society Symposium 32. Bethesda, Maryland. p39-60.
- Daufresne, M., Roger, M.C., Capra, H. and Lamouroux, N., 2004. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhone River: effects of climatic factors. *Global Change Biology* 10, 124-140.
- Flebbe, P.A., Roghair, L.D. & Bruggink, J.L., 2006. Spatial Modeling to project southern Appalachian trout distribution in a warmer climate. *Transactions of the American Fisheries Society* 135, 1371-1382.
- Hutchison, V.H., 1976. Factors influencing thermal tolerance of individual organisms. pp. 10–26. In: G.W. Esch & R.W. McFarlane (ed.) *Thermal Ecology II*, Nat. Tech. Inform. Serv., Springfield.
- Illies, J. & L. Botosaneanu, 1963. Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes considérées surtout du point de vue faunistique. *Int. Verh.Limnol.* 12: 1–57.
- Jackson, D., N. Mandrak, 2002. Changing fish biodiversity: predicting the loss of cyprinid biodiversity due to global climate change. In: McGinn N (ed) *Fisheries in a changing climate*. American Fisheries Society Symposium 32. American Fisheries Society, Bethesda, MD, pp 89–98.
- Jungwirth, M., & H. Winkler, 1984. The temperature dependence of embryonic development of Grayling (*Thymallus thymallus*, L.), Danube Salmon (*Hucho hucho*, L.), Arctic Char (*Salvelinus alpinus*, L.) and Brown Trout (*Salmo trutta fario*, L.). *Aquaculture*, 6, 315-327.
- Küttel, S., A. Peter & A. Wüest, 2002. Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. Rhône-Thur Publikation Nr 1. EAWAG, Kastanienbaum, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.
- Matulla, C., S. Schmutz, A. Melcher, T. Gerersdorfer, P. Haas, 2007. Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. *Int.J.Biometeorol.* 52(2):127-137.
- Mohseni, O., Stefan, H.G. & Eaton, J.G., 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in US streams. *Climatic Change* 59, 389-409.
- Morrison, J., M. Quick, & M. Foreman, 2002. Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections. *J. Hydrol.*, 263, 230–244.
- Muhar, S., M. Kainz, M. Kaufmann & M. Schwarz 1998. Erhebung und Bilanzierung flußtypspezifisch erhaltener Fließgewässerabschnitte in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Sonderdruck*. 50: 119-127.
- Rabinowitz, D., S. Cairns and D. Dillon, 1986. Seven forms of rarity and their frequency in the flora of the British Isles. In: *Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity*. Sinauer, Sunderland, MA, USA, pp. 182-204.
- Rahel, F., 2002. Using current biogeographic limits to predict fish distributions following climate change. In: McGinn N (ed) *Fisheries in a changing climate*. American Fisheries Society Symposium 32. American Fisheries Society, Bethesda, MD, pp 99–110.
- Schmutz, S., Kaufmann, M., Vogel, B., & Jungwirth, M., 2000. Methodische Grundlagen und Beispiele für die Bewertung der fischökologischen Funktionsfähigkeit österreichischer Fließgewässer. *Wasserwirtschaftskataster, BMLF*, 210pp.
- Schmutz, S., & M. Jungwirth, 2003. Fische. In H. Kromp-Kolb & T. Gerersdorfer: *Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt – derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich*. Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur Wien. 149pp.
- Schmutz, S., Matulla, Ch., Melcher, A., Gerersdorfer, T., Haas, P., Formayer, H., 2004. Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer. Endbericht, im Auftrag des BMLFUW, GZ 54 3895/163-V/4/03.

## Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Fischfauna

Spindler, T., 1997. Fischfauna in Österreich, Ökologie – Gefährdung – Bioindikation – Gesetzgebung. Wien, Umweltbundesamt. M-087: 140.

Xenopoulos, MA, & Lodge, DM, 2006. Going with the flow: Using species-discharge relationships to forecast losses in fish biodiversity. Ecology 87 (8):1907-1914.

### **Anschrift des Autors**

Univ.-Prof. DI Dr. Stefan Schmutz  
Universität für Bodenkultur Wien  
Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement  
Max-Emanuel-Straße 17, 1180 Wien  
Tel. +43-1-47654-5202  
E-Mail: stefan.schmutz@boku.ac.at

# Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft

*Klaus Katzensteiner*

## 1 Einleitung

Die Ansprüche der Gesellschaft an den Wald sind vielfältig. Die moderne, multifunktionelle Waldwirtschaft ist in Österreich gesetzlich verpflichtet, gleichzeitig Nutz-, Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswirkung des Waldes zu gewährleisten. Bewaldete Einzugsgebiete leisten einerseits einen wesentlichen Beitrag zur Trinkwasserschüttung, zum anderen schützen Waldstandorte durch ihren Wasserverbrauch und die Zwischenspeicherung von Wasser unterliegende Landschaftsteile vor Abflussspitzen, die ansonsten zu Überschwemmungen oder Murenabgängen führen können. Die prognostizierte Temperaturerhöhung im Zusammenspiel mit einer ungünstigeren Niederschlagsverteilung könnte zukünftig zu vermehrtem Trockenstress der Wälder führen. Instabile Waldbestände, die anfälliger gegenüber zusätzlichen biotischen oder abiotischen Schadfaktoren sind, wären die Folge eines derartigen Szenarios. Großflächige Schäden in Bergwäldern etwa durch Windwurf und/oder Borkenkäferkalamitäten, wie man sie zurzeit in Kanada beobachten kann (Winkler et al., 2008), bringen massive hydrologische Probleme mit sich.

In dem folgenden Beitrag sollen unter diesem Blickwinkel mögliche mittelfristige Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Zustand unserer Wälder analysiert und Anpassungsstrategien in der Bewirtschaftung aufgezeigt werden.

## 2 Der gegenwärtige Zustand des österreichischen Waldes

Nach der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) sind derzeit 47 % der Fläche Österreichs bewaldet (Russ, 2004) – mit steigender Tendenz. Der stockende Holzvorrat hat von der Inventurperiode 1961/70 von 780 Millionen Vorratsfestmetern auf 1.095 Millionen Vfm in der Periode 2000/02 zugenommen (Schadauer und Büchsenmeister, 2004). Neben einer Abnahme der Nutzungen im Kleinwald werden positive Zuwachstrends als Ursache angeführt. Dieser Trend steigender Holzzuwächse hält nun bereits mehrere Jahrzehnte an. Es gibt eine Anzahl von Erklärungsansätzen für diese besseren Zuwächse europäischer Wälder (Kahle et al., 2008). Erhöhte atmosphärische Stickstoffeinträge werden als wesentlichster Faktor eingestuft. Daneben wird erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und günstigeren Temperatur- und Niederschlagsbedingungen eine hohe Bedeutung beigemessen. Zu steigenden Zuwächse in österreichischen Wäldern dürften noch andere Einflüsse – Erholung der Böden nach Übernutzung in der Vergangenheit (Schadauer und Büchsenmeister, 2004) und besonders günstige Wachstumsbedingungen auf aufgeforsteten landwirtschaftlichen Grenzertragsböden – beitragen.

## 3 Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wald

Das potenzielle Vorkommen und die Konkurrenzfähigkeit von Arten und Vegetationsgesellschaften werden unter anderem durch Klima, Lage und Bodenbedingungen, welche wiederum die Ressourcenverfügbarkeit steuern, determiniert (*Bild 1*). Weiters sind Störungen („stochastische Effekte“) eine treibende Kraft für dynamische Prozesse in Ökosystemen. Diese Gesamtheit der an einem Wuchsort auf Pflanzen einwirkenden Umweltbedingungen, soweit sie nicht durch den

Wettbewerb der Pflanzen untereinander bestimmt sind, wird unter dem Begriff „Standort“ subsumiert. Dabei zählen nur solche Umweltbedingungen als Standort prägend, welche in überschaubaren Zeiträumen konstant bleiben oder regelmäßig wiederkehren (Arbeitskreis Standortskartierung, 1996). Das Konzept einer Konstanz der Umweltbedingungen wurde für die forstliche Standortskartierung als Grundlage waldbaulicher Planungen entwickelt.

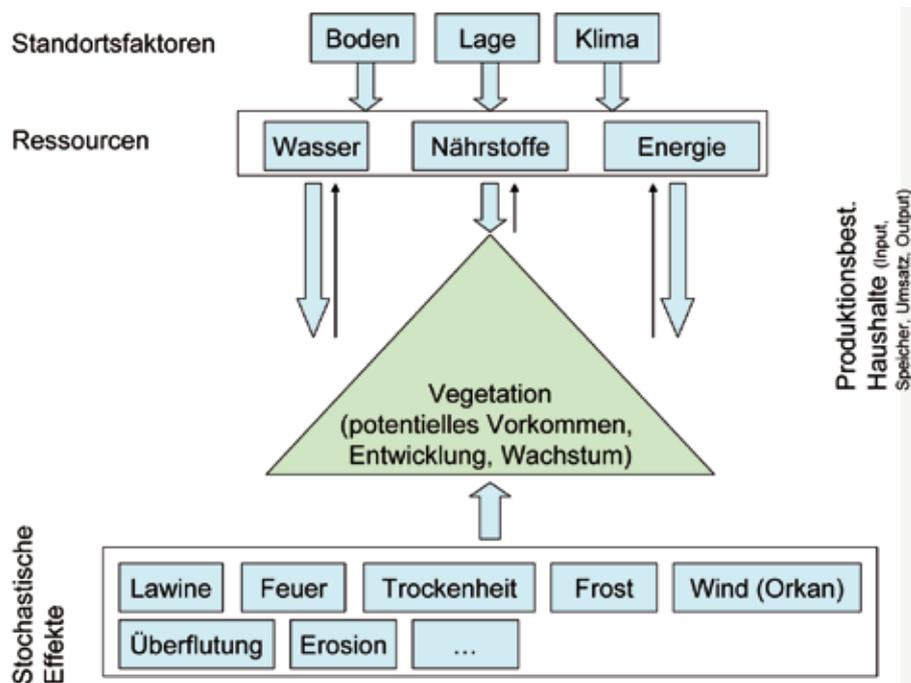


Bild 1: Standort als Summe der Umweltbedingungen. Der Klimawandel hat Auswirkungen auf die Ressourcenverfügbarkeit und auf stochastische Effekte

Für langlebige Arten wie Waldbäume bedeuten nun rasche Klimaänderungen, dass sich die Standortbedingungen vom Zeitpunkt der Etablierung der Jungpflanzen über die potenzielle Lebensdauer von Jahrhunderten gravierend verändern.

Das Klima ist der wichtigste Faktor für die Vegetationsentwicklung und die Temperatur ist ein zentraler steuernder Faktor für zahlreiche Prozesse im Ökosystem. Neben der Jahresmitteltemperatur, deren Änderung innerhalb gewisser Grenzen gut modellier- und prognostizierbar ist, ändern sich aber zahlreiche weitere Klimaparameter wie Niederschlag, Saisonalität, Strahlung, Schneedecke und damit der Energie- und Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen. Zusätzlich ändert sich auch die Art und Häufigkeit von Störungen.

### 3.1 Wirkungen einer Temperaturerhöhung

Die gegenwärtige und prognostizierte Temperaturerhöhung hat unter Bedingungen, bei denen die Temperatur einen limitierenden Faktor darstellt, auf jeden Fall positive Wirkungen auf das Pflanzenwachstum. Dies ist sowohl in nördlichen Breiten als auch in höheren Gebirgslagen zu beobachten. Eine Veränderung der phänologischen Jahreszeiten (Menzel und Fabian, 1999) bedingt eine Verschiebung der Vegetationszonen. Durch die geografische Lage Österreichs an der Grenze verschiedener Klimaprovinzen und die ausgeprägte Höhenstreckung liegt es nahe, die gegenwärtige

tige Verteilung von Vegetationsgesellschaften für Prognosen der Verschiebung von Arealgrenzen heranzuziehen.

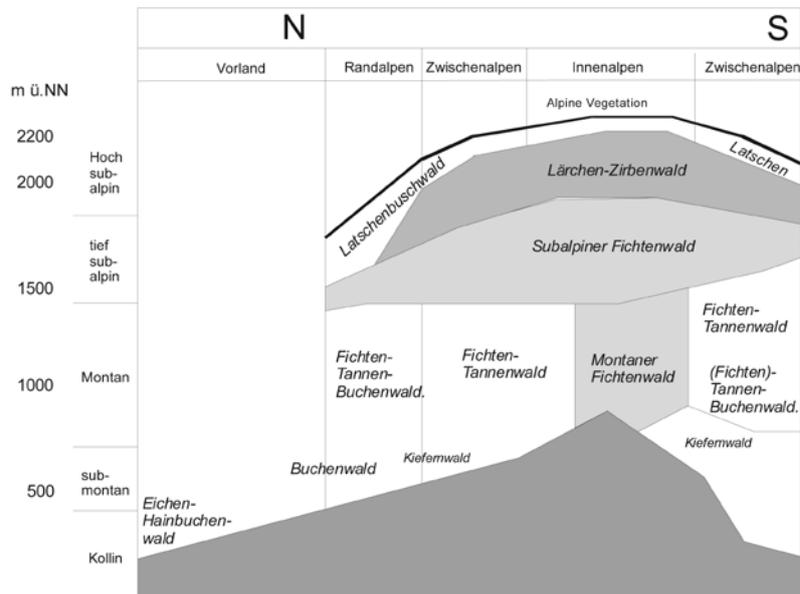


Bild 2: Geobotanisches Nord-Süd-Profil durch die Ostalpen (stark vereinfacht nach Ozenda, 1988)

Bild 2 zeigt die Verteilung natürlicher Waldgesellschaften in einem Nord-Süd-Transekt über die Ostalpen. Entsprechend der Verteilung von Temperatur, Niederschlag und Kontinentalität ergibt sich eine klare horizontale und vertikale Gliederung. Der Höhengradient der Jahresmitteltemperatur beträgt ca.  $-0.5\text{ °C}$  je 100 m Seehöhe (Ozenda, 1988).

Ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur von  $2.3\text{ °C}$  bis Mitte des Jahrhunderts (Gobiet, 2008) entspricht somit vereinfacht einer vertikalen Verschiebung der Höhenzonen um etwa 450 m nach oben. Eine Verschiebung der Vegetationszonen und ein Anstieg der Waldgrenze sind auf jeden Fall zu erwarten und in manchen Gebirgen bereits zu beobachten (Parmesan, 2006). Nicolussi und Patzelt (2006) belegen für die Tiroler Zentralalpen einen Anstieg der Verbreitungsgrenze von Zirben während der letzten 150 Jahre, wohingegen das frühe 19. Jahrhundert durch ein Absinken der Baumgrenze gekennzeichnet war. Ihre dendrochronologischen Untersuchungen über die letzten 9.000 Jahre hinweg zeigen aber auch, dass zwischen 7000 und 4000 vor unserer Zeitrechnung die Waldgrenze über dem gegenwärtigen potenziellen Niveau lag.

Neben positiven Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf den Zuwachs sind auch negative Effekte zu erwarten. Eine der erwarteten Auswirkungen des globalen Wandels für Mitteleuropa ist die Erhöhung der Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden (IPCC, 2007). Selbst bei gleich bleibender Niederschlagsverteilung ist durch die Temperaturzunahme und die damit einhergehende Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit vor allem im Osten Österreichs (Auer et al., 2001) eine Zunahme des Verdunstungsanspruches für die Vegetation gegeben. Der Wasserverbrauch von Wäldern ist in der Regel deutlich höher als in anderen Kulturgattungen. Waldökosysteme haben aufgrund langer Entwicklungszeiträume nur bedingt Mechanismen entwickelt, sich an kurzfristig geänderte Klimabedingungen anzupassen. Kurzfristig geänderte Klimabedingungen und Trockenstressphasen während der Vegetationsperiode können daher gravierende direkte und indirekte

Auswirkungen auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbäumen ausüben. Blattverlust und Produktionsrückgang bis zum Absterben von Einzelbäumen und Beständen sind direkt beobachtbare Auswirkungen, wobei die Symptome zum Teil mit Zeitverzögerung auftreten (Review in Breda et al., 2006, Utschig et al., 2004). Eine indirekte Auswirkung von Trockenstress ist eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber biotischen Schadfaktoren wie den Befall mit phytophagen Insekten und Pathogenen. Da gleichzeitig die Entwicklung wichtiger Schadinsekten durch die Temperatur gesteuert wird, sind verstärkt Kalamitäten zu erwarten.

Lexer et al. (2002) modellierten Auswirkungen des Klimawandels auf den österreichischen Ertragswald mit einem dynamischen Waldökosystemmodell. Als Modelleingangsgrößen verwendeten sie Bestands- und Standortdaten der österreichischen Waldinventur (ÖWI) und regionalisierte Klimaszenarien. Ein Klimaszenario mit einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur bis 2050 um 2 °C gegenüber der Periode 1961 bis 1995 und einer Abnahme der Sommerniederschläge um 15 % zeigte deutliche Auswirkungen auf die Ökosystemdynamik. Eine Veränderung der potenziellen natürlichen Waldgesellschaften auf mehr als drei Viertel der Inventurpunkte ist zu erwarten. Während der Anteil an Laubwaldgesellschaften unter diesem Szenario in höheren Lagen zunimmt, verliert die Fichte an Konkurrenzfähigkeit und wäre in Tieflagen nicht mehr tragbar. Lexer und Seidl (2007) folgern, dass viele heutige Fichtendickungen und -stangenhölzer bis in mittlere Lagen auf Eichenmischwaldstandorten und trockenen Buchenstandorten stocken und damit eine höheren Störungsanfälligkeit aufweisen werden, während sich in höheren Lagen die waldbaulichen Freiheiten bezüglich Baumartenwahl und Verjüngungsverfahren verbessern.

Vereinfachte Analogieschlüsse aus der Vegetationszusammensetzung unter gegenwärtigen Klimakonstellationen auf die Vegetationsverbreitung unter künftigen Klimabedingungen sind allerdings nur bedingt zulässig. Da sich neben der Temperatur weitere wichtige Klimaparameter ändern, ergeben sich neue Konkurrenzverhältnisse und es kann sich die Ausnutzung ökologischer Nischen verändern. Williams et al. (2007) konnten mit pollenanalytischen Untersuchungen zeigen, dass im Spätglazial vor etwa 14.000 Jahren in Nordamerika Vegetationsgesellschaften mit heute noch existierenden Arten vorkamen, die in dieser Zusammensetzung nicht mehr vorstellbar wären. Regenerations- und Verbreitungsfähigkeit einerseits, die Verfügbarkeit entsprechender Habitats, welche als Rückzugsgebiete bei geänderten Umweltbedingungen dienen können, sind andererseits eine Voraussetzung für das Überleben von Arten. Evolutionäre Anpassungen von Arten mit Generationswechseln über einem Jahr sind bis Ende dieses Jahrhunderts eher unwahrscheinlich. Arten, die geografisch isoliert vorkommen, wie z. B. im Hochgebirge, sind durch rasche Klimaänderungen in ihrer Existenz gefährdet (Parmesan, 2006). Durch den Anstieg der Waldgrenze können isolierte alpine Lebensräume verloren gehen, was eine Gefährdung vor allem von endemischen Arten bedingt. Verschiebungen in der Artenzusammensetzung der Vegetation in der alpinen und nivalen Stufe der Alpen innerhalb von nur 10 Jahren konnten im Projekt GLORIA bereits nachgewiesen werden ([www.gloria.ac.at](http://www.gloria.ac.at); Pauli et al., 2007).

### 3.2 Wirkungen einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die Zunahme von CO<sub>2</sub>, dem wichtigsten Pflanzennährstoff in der Atmosphäre, hat direkte Auswirkungen auf das Wachstum und Rückkoppelungseffekte auf den Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen. Die fotosynthetische Aufnahme von CO<sub>2</sub> ist derzeit noch nicht gesättigt. Daher ist nach wie vor ein positiver „Düngungseffekt“ durch CO<sub>2</sub> zu erwarten, der allerdings von den

sonstigen Standortfaktoren – Boden, Nährstoffversorgung und Wasserverfügbarkeit – abhängig ist (Körner, 2003). Besonders C3-Pflanzen, zu denen unsere Waldbäume gehören, reagieren auf erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit einer reduzierten stomatären Leitfähigkeit, einem dadurch reduzierten Wasserverbrauch und einer erhöhten Wassernutzungseffizienz (Leutzinger et al., 2005; Leutzinger und Körner, 2007). Damit wirkt dieser Faktor zum Teil dem durch die Temperaturerhöhung gesteigerten Verdunstungsanspruch entgegen.

### 3.3 Wirkungen von Klimaänderungen auf Störungsmuster

Störungen wie Sturm- und Schneebruchschäden oder Insektenkalamitäten sind, auch wenn sie wirtschaftlich gravierende Auswirkungen haben, grundsätzlich als Teil der Walddynamik zu sehen (Brang et al., 2004; Splechna und Gratzler, 2005). Wälder sind nicht statisch und unterliegen Auf- und Abbauprozessen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist allerdings eine strukturierte Risikoabschätzung notwendig. Dafür wird in Anlehnung an Kobler (2006) und Brang et al. (2004) folgendes Konzept verwendet:

Als **Gefahr** wird ein Phänomen gesehen, das bei seinem Auftreten negative Auswirkungen auf ein Untersuchungsobjekt hat (Sturm, Trockenheit, Insektenkalamität), eine **Gefährdung** ist dann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines potenziell gefährlichen Ereignisses. Wie hoch das **Risiko**, der prognostizierte Schaden bei Eintritt des gefährlichen Ereignisses ist, hängt wiederum von der **Vulnerabilität**, dem Grad der Verletzbarkeit eines Untersuchungsobjektes ab. Die Reaktion des Waldes auf Störungen ist von der **Störungsresistenz**, d. h. der Fähigkeit, Belastungen durch Störungsfaktor ohne Veränderung zu überstehen (z. B. windwurfanfällig oder nicht), und der **Störungselastizität**, der Geschwindigkeit mit der das System in den Ausgangszustand zurückkehrt (z. B. sich rasch wieder verjüngend), abhängig.

Auf wenn die Prognosen im Hinblick auf Klimawandel mit Unsicherheiten behaftet sind, dürfte die Gefährdung, d. h. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremereignissen regional steigen. Wie die Wälder auf derartige Störungen reagieren, ist aus den langjährigen Beobachtungen der Schadholzmengen infolge Sturm und Schneebruch sowie Borkenkäferbefall zu ersehen (*Bild 3*, Tomiczek und Steyrer, 2008).

Die Gefährdung von Waldbeständen durch Orkane wird regional durch die Lage modifiziert. Die Windwurfanfälligkeit hängt sehr stark von der Bestandsstruktur ab, die wiederum durch die Bewirtschaftung beeinflussbar ist. So vermeiden Forstleute die Erzeugung scharfer, zur Hauptwindrichtung exponierter Bestandsränder. Ganzjährig begrünte Bäume wie die Fichte bieten auch außerhalb der Vegetationszeit hohe Angriffsflächen für den Wind. Durch ein eher flach streichendes Wurzelsystem sind Fichten auf manchen Standorten weniger stabil als andere Baumarten. Daraus ergibt sich gerade für Fichtenwälder eine niedrige Resistenz. Wenn große Schadholzmengen infolge eines Windwurfereignisses vorliegen, sind günstige Bedingungen für Folgeschäden durch Schadinsekten gegeben. In Fichtenwäldern ist der Buchdrucker (*Ips typographus*) ein wesentlicher Schadfaktor (Christiansen und Bakke, 1988). Unter günstigen Temperaturbedingungen kann der Buchdrucker mehrere Generationen im Jahr bilden. Lange, warme, niederschlagsarme Vegetationsperioden begünstigen Massenvermehrungen von Borkenkäfern. Modellrechnungen von Seidl et al. (2007, 2008) zeigen daher eine besonders hohe Vulnerabilität von Fichtenbeständen auf

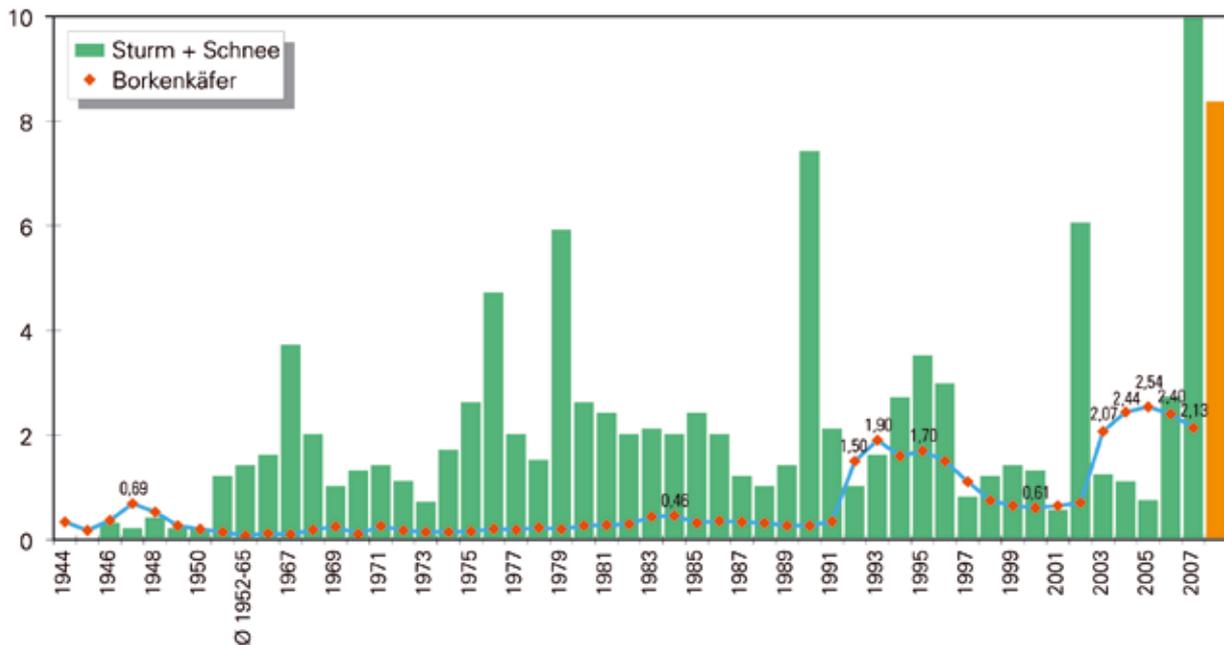


Bild 3: Zeitreihen von Schadholzmengen infolge von Borkenkäferbefall, Sturm und Schneebruch (Tomiczek und Steyrer, 2003, mit freundlicher Genehmigung des BWF Wien)

Tieflagenstandorten und prognostizieren eine starke Zunahme der Borkenkäferschäden unter den erwarteten Klimaänderungen. Nach Grabher (1998) sind 22 Prozent der Österreichischen Wälder als durch den Menschen stark verändert einzustufen. Diese Wälder haben eine gegenüber der potenziell natürlichen Waldgesellschaft veränderte Baumartenzusammensetzung und veränderte Strukturen. Darunter fallen vor allem sekundäre Fichtenmonokulturen in Tieflagen. Allerdings ist die Störungselastizität auf Tieflagenstandorten als niedrig einzustufen, da die Wiederaufforstung oder natürliche Verjüngung in der Regel relativ problemlos funktioniert.

Die Gefährdung von naturnahen, subalpinen Fichtenwäldern durch Borkenkäfer ist aufgrund ungünstiger Temperaturbedingungen in den meisten Jahren grundsätzlich geringer als in Tieflagen. Im extremen Trockenjahr 2002 zeigte sich aber, dass der Buchdrucker auch in Hochlagen zu Massenvermehrung fähig ist (Schopf, 2007). So haben der Orkan „Uschi“ 2002 und das nachfolgende warme, trockene Jahr 2003 dazu geführt, dass Borkenkäferbefall in der Steiermark und in Salzburg in Seehöhen bis über 1.800 m vorkommt (Wiener, 2008; Lick, 2008). Durch diese Entwicklung ergeben sich für die Bewirtschaftung der Schutzwälder neue Rahmenbedingungen. Schlechte Erschließung dieser Regionen führt zu erschwerten Bedingungen für die Aufarbeitung von Schadholz. In manchen Gebirgstälern entstanden durch den Borkenkäferbefall große Kahlflächen. Um die Schutzwirkung von Wäldern vor Lawinen, Spitzenabflüssen und Erosion wieder herzustellen, bedarf es hoher Summen aus öffentlichen Mitteln (Lick, 2008). Subalpine Fichtenwälder zeigen zwar eine höhere Störungsresistenz als Wälder in Tieflagen, die Störungselastizität ist aber bei Zeiträumen von 30 bis 80 Jahren bis zur gesicherten Verjüngung gering (Brang et al., 2004). Die Fläche des österreichischen Schutzwaldes beträgt 776.000 ha, davon 303.000 ha im Ertrag. Auf 2/3 des Schutzwaldes in Ertrag ist Verjüngungsnotwendigkeit gegeben, davon weisen aber 80 % keine Verjüngung auf. Im Hinblick auf die multifunktionalen Wirkungen des Waldes ist daher für diese Wälder ein besonders hohes Risiko zu sehen.

Wie sich Störungsmuster künftig entwickeln, ist nur bedingt vorhersehbar. Ein möglicher Effekt der Klimaerwärmung ist die Verschiebung oder der Wegfall von thermischen Barrieren für die Ausbreitung von Pflanzenschädlingen. So hat zum Beispiel der Pinien-Prozessionsspinner (*Thaumetopoea pityocampa*) sein Areal in Frankreich innerhalb der letzten drei Jahrzehnte um 87 km nach Norden verbreitert. Im Vinschgau ist seine Höhengausbreitung im selben Zeitraum 110 bis 230 m bis auf eine Seehöhe von 1.400 m angestiegen (Battisti et al., 2005). Die Larven dieses Schmetterlings fressen im Winter an Kiefernnadeln. Durch den Anstieg der Wintertemperaturen ist ein Überleben in höheren Lagen bzw. nördlicheren Breiten begünstigt.

#### 4 Mitigationsstrategien der Forstwirtschaft

Ziel der Forstwirtschaft muss eine Erhöhung der Störungsresistenz und Resilienz sein. Bei der Baumartenwahl muss angesichts von Umtriebszeiten von 100 Jahren und mehr auf die geänderten Klimabedingungen Bedacht genommen werden. Eine Reduzierung des Risikos in Tieflagen kann durch Verzicht auf Fichtenmonokulturen erreicht werden. Eine Abkehr vom Altersklassenwald hin zu Dauerwald mit Naturverjüngung und größerer, standortgerechter Bandbreite an Baumarten wird als eine Möglichkeit gesehen, die Vulnerabilität der Wälder zu verringern (Spiecker, 2003; Lexer et al., 2006). Dieser Trend ist auch in der forstlichen Praxis bereits zu beobachten. In der Waldinventur ist ein deutlicher Rückgang der Nadelholzzreinbestände von 70 Prozent in der Inventurperiode 1971/80 auf 62 % in der Periode 2000/02 und eine Zunahme der Mischbestände und Laubholzzreinbestände zu beobachten (Russ, 2004).

In jüngeren sekundären Fichtenbeständen können durch rechtzeitige Durchforstungsmaßnahmen der Wasserverbrauch gesenkt und der Wasserstress für den Einzelbaum reduziert werden (Katzensteiner et al., 2007 a, b).

#### 5 Literaturverzeichnis

- Arbeitskreis Standortkartierung 1996: Forstliche Standortaufnahme. Hrsg. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 5. Auflage, München.
- Auer I., Böhm R., Schöner W. (2001). Austrian Long-Term Climate 1767-2000. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik 25, 147 S.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A. and Larsson S. 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications* 15(6), 2084-2096.
- Brang P., Schönenberger W. Bachofen H. Zingg A. und Wehrli A. 2004. Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systemischen Sicht. *Forum für Wissen* 2004, 55.66.
- Breda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.* 63, 625-644.
- Christiansen E. und Bakke A. 1988. The spruce bark beetle of Eurasia. In: Berryman A.A. (Ed.) *Dynamics of Forest Insect Populations: Patterns, Causes, Implications*. Plenum, NY, 479-503.
- Gobiet, 2008. Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich.
- Grabherr G., Koch G., Kirchmeir H., Reiter K. 1998 Hemerobie oesterreichischer Waldoekosysteme. Veröffentlichungen des Oesterreichischen MaB-Programmes, Oesterreichische Akademie der Wissenschaften Bd. 17. 493 pp.

## Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft

- IPCC 2007. 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, 996 pp.
- Kahle H-P., Karjalainen T., Schuck A., Ågren G.I., Kellomäki S., Mellert K., Prietzel J., Rehfuess K-E. and Spiecker H.(Eds.) 2008. Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe: Results of the Recognition Project. European Forest Institute Research Report 21, Brill: Leiden, Boston, Köln.
- Katzensteiner K., Klimo E., Szukics U. (2007a). The impact of forest management on the water cycle of forest stands and watersheds. In: Raulund-Rasmussen K. and Hansen K. (Eds.) Synthesis report on impact of forest management on environmental services. Report EU FP 7 EFORWOOD, Project number 518128.
- Katzensteiner K., Eckmüllner O., Schume H. (2007b). Hydrological models as decision support tools. In Proceedings of Symposium: The Role of Forests and Forest Management in the Water Cycle, Dresden. Ed. K H a Y W Feger, Progress in Hydrosociences and Engineering, in press.
- Kobler J. 2004. Risikokarten als Planungsgrundlage für Flächenbewirtschaftung und Tourismuslenkung im Nationalpark Kalkalpen Oberösterreich. Diplomarbeit, Univ. Wien, 319. S.
- Körner C. 2003. Ecological impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in terrestrial ecosystems. *PhilTrans.R.Soc. Lond. A* 361, 2023-2041.
- Leutzinger S. and Körner K. 2007. Water savings in mature deciduous forest trees under elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 13, 2498-2508.
- Leutzinger S., Zotz G., Asshoff R. and Körner Ch. 2005. Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiology* 25, 641-650.
- Lexer M., Hönninger K., Scheffinger H., Matulla Ch., Groll N., Kromp-Kolb H., Schadauer, F., Starlinger F., Emglish M. 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climate change: a large scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management* 162, 53-72.
- Lexer M.J., Seidl R., Rammer W. und Jäger D. 2006. Waldbaukonzepte im Klimawandel – ein simulationsgestützter Vergleich. *BFW Praxisinformation* 10. 25-26.
- Lexer M.und Seidl R. 2007. Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. *Ländlicher Raum* 1-14.
- Lick H. 2008. Steiermark: Borkenkäferbefall auch in höheren Lagen. *BFW Praxisinformation* 17, 14.
- Menzel A. and Fabian P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 659
- Nicolussi K. und Patzelt G. 2006. Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze – aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. *BFW Praxisinformation* 10, 3-5.
- Niese G. 2004. Zustand der Schutzwälder. *BFW Praxisinformation* 3, 10-12.
- Ozenda P. 1988. Die Vegetation der Alpen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 353 S.
- Parmesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu.Rev.Ecol.Evol.Syst.* 37, 637-669.
- Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C. and Grabherr G. 2007. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA\*master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology* 13, 147-156.
- Russ W. 2004. Mehr Wald-ein positiver Trend? *BFW Praxisinformation* 3, 4-7.
- Schadauer K. und Büchsenmeister R. 2004. Holzvorrat wieder deutlich gestiegen: Milliardengrenze ist durchbrochen. *BFW Praxisinformation* 3, 8-9.
- Schopf A. 2007. Impact of climatic changes to forests generally and particularly in Austria, *Studia Forestalia Slovenica*, 130, 45-49.
- Seidl R., Baier P., Rammer W., Schopf A. and Lexer M.J. 2007. Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests. *Ecological Modelling* 206, 383-399.

- Seidl R., Rammer W., Jäger D. and Lexer M.J. 2008. Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. *Forest Ecology and Management*, in press.
- Spiecker H. 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe-temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67, 55-65.
- Splechtna, B.E., Gratzner, G. 2005. Natural disturbances in Central European forests: approaches and preliminary results from Rothwald, Austria. *Forest Snow and Landscape Research*, 79, 1/2, 57-67; ISSN 1424-5108
- Tomiczek C. und Steyrer G. 2008. Aktuelle Borkenkäfersituation in Österreich. *BFW Praxisinformation* 17, 4-5.
- Utschig H., Bachmann M. und H. Pretzsch, 2004. Das Trockenjahr 2004 bescherte langjährige Zuwachseinbrüche. *LFW aktuell* 43, 17-18.
- Williams, J. W., Jackson, S. T., Kutzbach, J. E. (2007) Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 5738-5742.
- Wiener L. 2008. Salzburg: Borkenkäfer auf Gipfelsturm. *BFW Praxisinformation* 17, 12-13.
- Winkler R., Rex J., Teti P., Maloney D. And Redding T. 2008. Mountain pine beetle, forest practices, and watershed management. B.C.Min.For. Range, Res. Br., Victoria, B.C.Extension Note 88. <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/En/En88.ht>

### **Anschrift des Autors:**

Univ.-Prof. DI Dr. Klaus Katzensteiner  
Universität für Bodenkultur Wien  
Institut für Waldökologie  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Tel. +43-1-47654-4103  
E-Mail: klaus.katzensteiner@boku.ac.at



# Der Klimawandel und seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft

*Josef Eitzinger, Gerhard Kubu und Sabina Thaler*

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. 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 mithilfe des heutigen Wissens etliche Schlussfolgerungen ziehen bzw. Trends erkennen, welche das künftige Risikopotenzial und Anpassungsstrategien skizzieren.

## **1 Regionale Klimaänderung und Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Produktionsressourcen**

Um die regionalen Auswirkungen einer Klimaänderung abschätzen zu können, muss zuerst bekannt sein, welche klimatische Faktoren sich a) in welchem Ausmaß, b) innerhalb welchen Zeitraums, c) an welchem Standort voraussichtlich ändern werden. Dies wird durch Regionalisierungsmethoden von globalen Klimaszenarien erreicht. Die Szenarien für die Temperatur sind grundsätzlich weniger unsicher als die des Niederschlags und anderer Klimaparameter. Ebenso sind die mittleren Änderungen wesentlich besser abgesichert als eine mögliche Änderung in der Klimavariabilität, d. h. der Häufigkeit, Stärke, Dauer, des Zeitpunkts und des räumlichen Ausmaßes von Extremereignissen der Witterung (Trockenheiten, Starkniederschläge, Stürme, Hagel, Frost, Hitzeperioden usw.). Weiters ist zu berücksichtigen, dass das Schadenspotenzial dieser Extremereignisse für die Landwirtschaft wesentlich von dem Zeitpunkt ihres Auftretens im Zusammenhang mit der im Jahresverlauf variablen Empfindlichkeit der Rezeptoren abhängt (wie Kulturpflanzen, die sich in einem bestimmten phänologischen Stadium befinden). Somit werden in der Forschung zuallererst die Folgen einer mittleren Temperaturerhöhung auf das Produktionspotenzial der Kulturpflanzen abgeschätzt und stufenweise andere Parameter und auch die Klimavariabilität miteinbezogen.

Die derzeitigen Klimaszenarien zeigen, dass die Temperaturen in den Hauptproduktionsgebieten Oberösterreichs, Niederösterreichs und der Steiermark bis zu den 2050er-Jahren (entspricht dem Medium aus dem 30-jährigen Mittel) je nach Klimamodell und Emissionsszenario zwischen ca. 0.8 °C und 2 °C (Vergleichszeitraum 1961–1990) ansteigen werden. Eine weitere Steigerung wird bis zu den 2080er-Jahren zwischen 2.5 °C und 4.5 °C angegeben. Alle Klimamodelle zeigen eine höhere Temperaturzunahme während des Winters und Sommers als in den Übergangszeiten. Auch zeichnet sich mit zunehmender Höhenlage eine stärkere Erwärmung ab.

Ein für die Landwirtschaft wesentlicher Faktor – insbesondere dort, wo Wasser als produktionslimitierender Faktor in Erscheinung tritt – ist, wie sich die Niederschläge in den Klimaszenarien darstellen. Hier liegt Österreich grundsätzlich in einem Übergangsbereich, wobei im Mittelmeerraum sehr unerfreuliche Aussichten mit bis zu 50 % weniger Sommerniederschlag bis zu den 2080er-Jahren bestehen, während in den höheren Breitengraden mit einer Niederschlagszunahme zu rechnen ist. Regional gesehen könnten nach den vorliegenden Szenarien die Jahresniederschläge im Osten und Süden leicht abnehmen, und im Westen eher zunehmen, jedoch mit einer relativ hohen Unsicherheit verbunden. Weiters zeigen die Szenarien vor allem bei den Sommerniederschlägen eine Abnahme und eine deutliche Zunahme bei den Niederschlägen im Winterhalbjahr, also eine Änderung der saisonalen Niederschlagsverteilung. Daher ist auch im nördlichen Alpenraum mit einer Zunahme der Häufigkeit und Stärke von agrarmeteorologischen Trockenperioden bzw. Abnahme von Niederschlägen im Sommer zu rechnen. Ein besonderer Faktor für die Wasserversorgung in der Pflanzenproduktion ist neben der Niederschlagsverteilung auch eine mögliche Zunahme von Starkniederschlägen, die sich aus Messungen regional abzeichnet. Es ist daher vor allem während der Vegetationsperiode mit zunehmend trockenen Verhältnissen zu rechnen. Dadurch nehmen auch die regionalen Differenzierungen hinsichtlich der Wasserversorgung zu, wobei für die Pflanzenproduktion insbesondere die Bodenwasserspeicherfähigkeit eine wichtige Rolle spielt (z. B. generell zunehmender Wassermangel im Nordosten, Osten und Süden Österreichs, verstärkt aber auf den leichteren Böden).

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

- Etliche Studien für den mitteleuropäischen Raum kommen zu dem Ergebnis, dass 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. Allerdings würden unter den „extremere“ klimatischen Bedingungen auch stärkere regionale Unterschiede auftreten, die bisher aber kaum untersucht wurden.
- 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. Wasser sparende 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

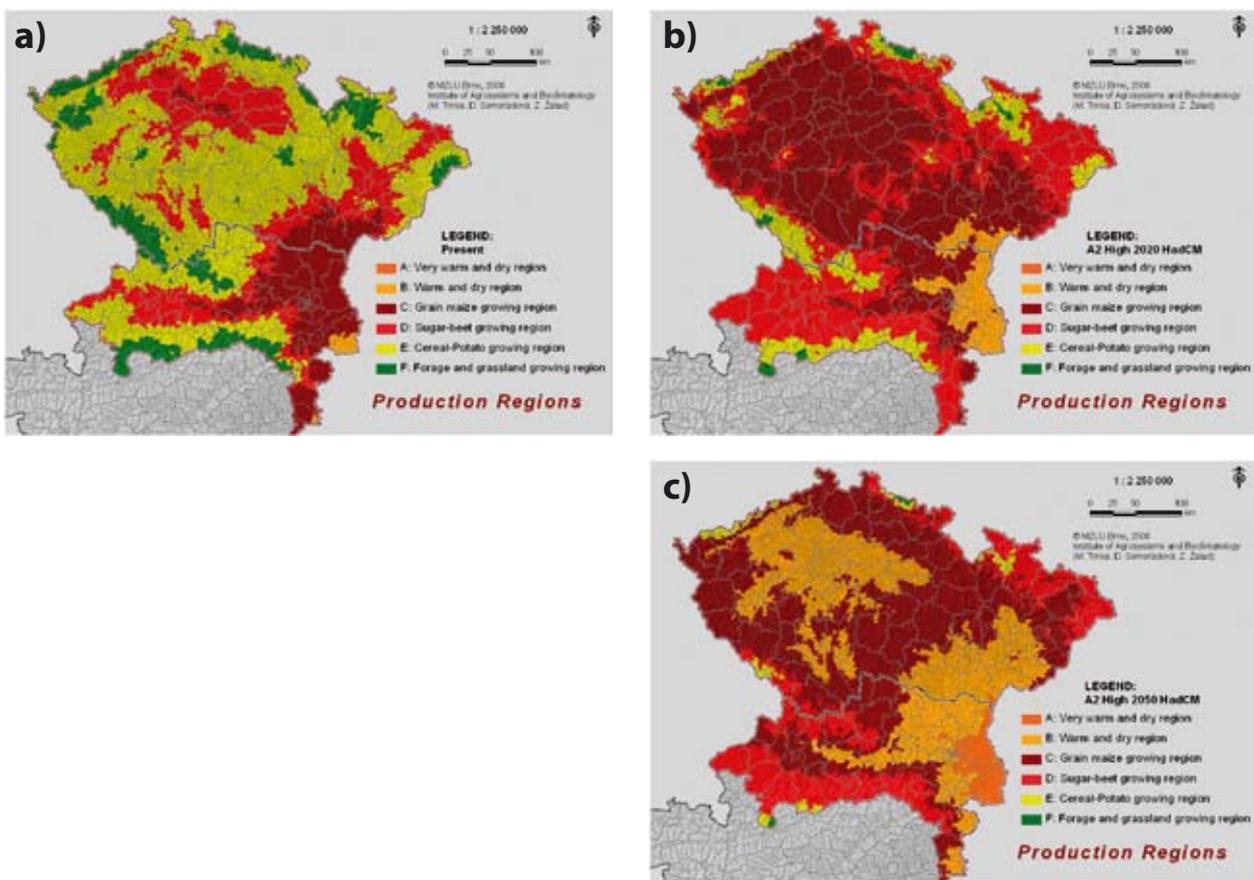
in der Produktionstechnik erhöhen bzw. erlauben, bestimmte maschinelle Kapazitäten (als Kostenfaktor) zu verringern.

- 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 gleich bleibender 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). Neuere Studien belegen mit steigender Kohlendioxidkonzentration eine veränderte Qualität des Erntegutes, wie z. B. eine Verschlechterung der Kleberqualität bei Weizen.
- Zunehmende Temperaturen erhöhen bei gleich bleibender 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.
- 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).
- 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 zwischenjährliche Ertragsvariabilität ab.

## **2 Auswirkungen auf verschiedene Produktionssysteme und mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Anpassungsmaßnahmen der österreichischen Landwirtschaft an den Klimawandel wurden bisher erst ansatzweise untersucht (z. B. im laufenden EU-Projekt ADAGIO), was einen noch großen Forschungsbedarf hinsichtlich regionaler Analysen bedeutet. Durch Simulation verschiedener Szenarien z. B. in der Produktionstechnik lassen sich mögliche Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das langjährige Produktionspotenzial bewerten. Endgültig lassen sich Auswirkungen und mögliche Anpassungsmaßnahmen natürlich nur unter Berücksichtigung der zu erwartenden sozioökonomischen Randbedingungen bewerten, welche durch den fortlau-

fenden Strukturwandel in der Landwirtschaft mittelfristig einen größeren Einfluss haben dürfte als der Klimawandel alleine. Allerdings kann der Klimawandel durch eine Veränderung des Produktionsrisikos bzw. Ertragspotenzials dazu beitragen, entsprechende Trends zu verstärken oder abzuschwächen. Die jeweiligen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse und deren mögliche Änderung sind immer in Verbindung zu einem bestimmten Produktionssystem zu sehen, da hierfür unterschiedliche kritische klimatische Grenzen gelten. So sind für die Grünlandproduktion andere Niederschlags- und Temperaturverhältnisse für das Produktionspotenzial optimal als für den Ackerbau. Auch innerhalb des Ackerbaus können wieder unterschiedliche Grenzen gezogen werden, bis hin zu kulturartenspezifisch klimatischen Grenzen. Insgesamt lässt sich eine deutliche Verschiebung der agroklimatischen Zonen erwarten (*Bild 1 a)–c*). Produktionssysteme die unter den gegebenen Standortbedingungen nahe oder an den klimatischen Grenzwerten liegen, würden durch den Klimawandel als erste – positive oder negative – Änderungen im klimatisch bedingten Produktionspotenzial bzw. -risiko zu spüren bekommen.

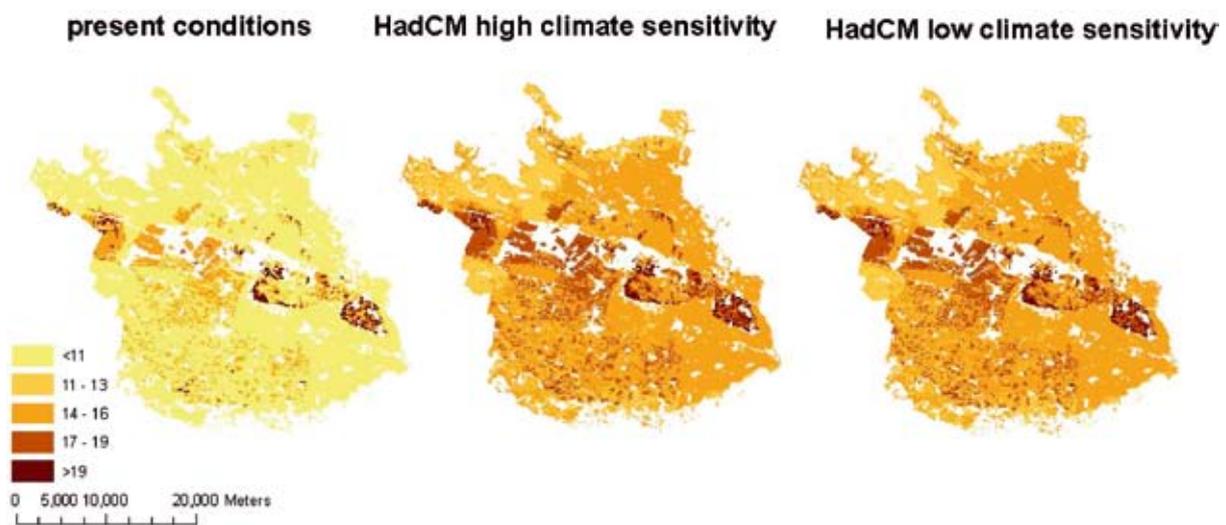


*Bild 1: Verschiebung von agroklimatischen Zonen auf Basis der Bedingungen von 1961–1990 (a) unter den HadCM AG4-Klimaszenario für die 2020er-Jahre (b) und 2050er-Jahre (c) (Trnka et al., 2008)*

Im Folgenden werden mögliche Anpassungsmaßnahmen der wichtigsten landwirtschaftlichen Produktionsparten Österreichs an den Klimawandel skizziert :

## 2.1 Ackerbau

Eine weitgehend effektive Maßnahme ist die Anpassung von Anbaumaßnahmen an eine verlängerte Vegetationsperiode (frühere Anbauzeitpunkte im Frühjahr, Auswahl später reifender Sorten) bei vielen einjährigen Kulturpflanzen. Bei Sommergetreide und Mais bringt diese Maßnahme eine Beibehaltung bzw. Verlängerung der Wachstumsperiode – ein wesentlich ertragsbeeinflussender Faktor. Trockenheiten können sich allerdings insbesondere bei Kulturen auswirken, die weit in den Sommer hineinreichen, wobei bei früh geernteten Winterkulturen (z. B. Wintergetreide) die negativen Auswirkungen durch eine mögliche bessere Nutzung der Winterfeuchte während kritischer phänologischer Phasen (wie z. B. Blüte, Kornfüllung) im Mittel geringer sind. Dabei zeigte sich zum Beispiel in den niederschlagsarmen Regionen Österreichs eine deutliche Abhängigkeit vom Bodenwasserspeichervermögen (*Bild 2*).



*Bild 2: Räumliche Änderung eines relativen Wasserstressfaktors für Sommergerste im Marchfeld für die 2050er-Jahre (dunkle Flächen, vorwiegend auf den leichteren Böden, deuten eine stärkere Zunahme an). Simulation mit dem Wachstumsmodell CERES-Barley*

Dies bedeutet im Allgemeinen, dass jegliche Anpassungsmaßnahmen, welche die Effizienz der Wassernutzung im Pflanzenbau erhöhen, von Bedeutung sind. Diese Maßnahmen beinhalten entsprechende Landschaftsgestaltung (Wind- und Verdunstungsschutz durch Hecken), bodenwasserschonende Fruchtfolgegestaltung (z. B. Winterungen vor Sommerungen bevorzugen), Bodenbedeckungen als Verdunstungs- und Erosionsschutz (Mulchdecken), auf Bodenvariationen reagierende und/oder effiziente Bewässerungssysteme, Auswahl trocken- und hitzeresistenter Sorten bzw. Kulturen mit geringem Wasserverbrauch, Verbesserung des Bodenwasserspeichervermögens durch Förderung einer guten Bodenstruktur und durch Humusaufbau, Vermeidung von Bodenschäden usw.

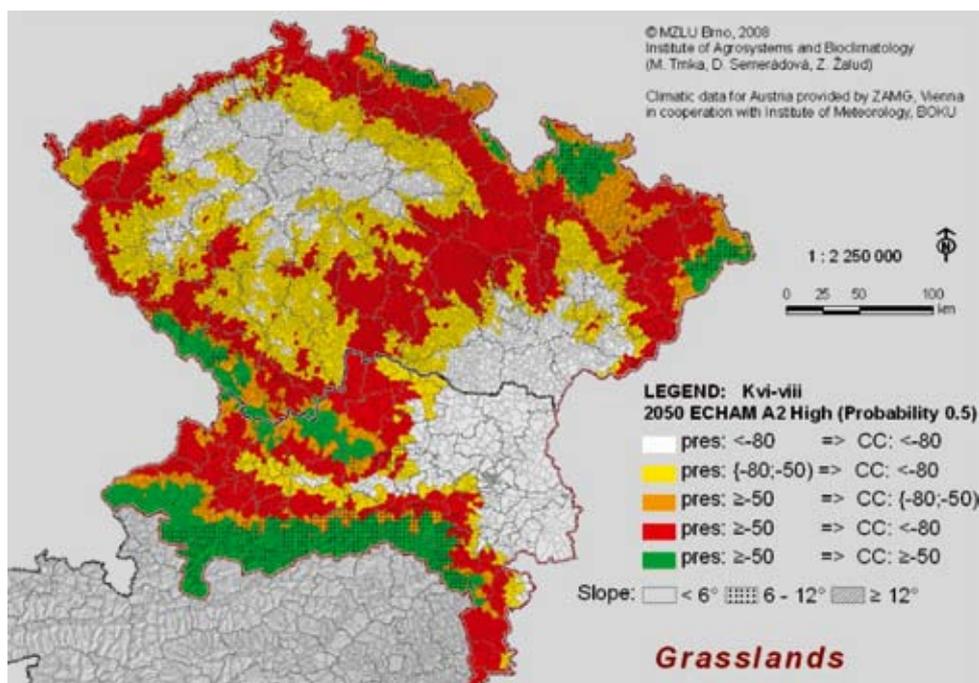
Alternativen wie die Biomasseproduktion werden sich wegen ihres hohen Wasserbedarfs stark an den regionalen Niederschlagsverhältnissen und verfügbaren Bodenwasserreserven orientieren müssen. Das verstärkte oder neue Auftreten klimasensitiver Schadfaktoren wie Unkräuter, Schädlinge (insbesondere Insekten) und Krankheiten wird eine hohe Flexibilität und schnelle Reaktionszeit der Produktionstechnik erfordern. Auch die Anforderungen an die Pflanzenzüchtung und an

die Methoden des Pflanzenschutzes werden dadurch zunehmen. So wird eine größere Bandbreite von robusten, stress- und krankheitsresistenten Sorten gefragt sein, als auch eine Zunahme der angebauten Sorten- und Artenvielfalt (auch aus regionaler Sicht), um das Produktionsrisiko des Einzelbetriebs als auch einer Region durch die verschiedenen biogenen Schadfaktoren und die zunehmenden Witterungsextreme zu minimieren.

## 2.2 Grünland

Bei der Grünlandproduktion dürften die bedrohten Grenzlagen in Österreich ungefähr bei 600–700 mm Jahresniederschlag angesiedelt werden, wobei neben der Topografie zusätzlich die Temperaturverhältnisse und die Bodeneigenschaften (Nährstoff- und Wasserspeichervermögen) das Produktionspotenzial über die klimatische Wasserbilanz wesentlich mitbestimmen.

Durch die in den Klimaszenarien angezeigten gleich bleibenden oder leicht abnehmenden Niederschläge am Ostalpenrand bzw. auch nördlich und südlich der Alpen und die zunehmende unproduktive Verdunstung durch die Temperaturzunahme sind ebendiese Regionen betroffen, wie erste Abschätzungen mittels agroklimatischer Wasserbilanzmodelle zeigen (*Bild 3*).



*Bild 3: Die unter dem ECHAM-Klimaszenario für 2050 negativ betroffenen Grünlandregionen nördlich der Alpen (in rot). Ursache ist eine zunehmend schlechtere Wasserbilanz und damit sinkendes Produktionspotenzial bzw. deutlich höheres Ertragsrisiko*

Insbesondere dürften aufgrund schlechter Bodenverhältnisse das Mühlviertel und das Waldviertel verstärkt mit abnehmendem Produktionspotenzial und zunehmendem Produktionsrisiko (häufigere extreme Ertragseinbußen durch häufigere Trockenheiten) im Grünlandbereich zu kämpfen haben. Am Ostalpenrand sind es vor allem die Übergangsregionen von Grünland und Ackerland, die durch eine im Osten eher deutlichere Niederschlagsabnahme und wärmere Temperaturen betroffen sein könnten. In Lagen mit deutlich höheren Niederschlägen (ca. über 800 mm Jah-

resniederschlag) würde durch die höheren Temperaturen das Produktionspotenzial ansteigen. In höheren Lagen, wo vor allem die Temperatur und die Länge der Wachstumsperiode begrenzend wirken, dürfte dieser Effekt noch stärker ausfallen. Allerdings sind dadurch auch Änderungen in der Artenzusammensetzung des Dauergrünlands zu erwarten, welche die Futterqualität beeinflussen. Auch für das Grünland bedeutende klimasensitive Schädlinge wie Engerlinge könnten verstärkt auftreten und großflächige Schäden verursachen.

Da regionale Anpassungsstudien bisher kaum vorliegen, kann derzeit nur auf Einschätzungen von Experten zurückgegriffen werden. Adaptionsmöglichkeiten sind im Grünlandbereich sicher viel begrenzter als im Ackerbau, da oft nur schwer auf eine andere Produktionsform umgestiegen werden kann, wenn Randbedingungen (wie Bodeneigenschaften, Topografie oder Landnutzungsbeschränkungen) z. B. keinen Ackerbau zulassen. Ansonsten wäre ein Umstieg auf Biomasseproduktion und Futterpflanzenbau – wenn auch nur auf Teilflächen – eine Option, die eine wesentlich höhere Flexibilität ermöglicht. Eine Anpassungsmöglichkeit wäre auch die Bewässerung von Grünland, falls das Wasser dazu lokal kostengünstig zugänglich und vorhanden ist. Durch den weiterhin anhaltenden Strukturwandel (Trend zu zunehmenden Betriebsgrößen) könnte auch der Druck auf möglichst hohe Flächenerträge durch eine größere verfügbare Produktionsfläche zum Teil kompensiert werden (was allerdings auch höhere Produktionskosten verursachen würde und wesentlich von Grundkosten beeinflusst wird).

### **2.3 Tierhaltung**

Für den Bereich der Tierhaltung kann direkt durch die Zunahme von Hitzetagen mit zunehmendem Stress durch Hitze gerechnet werden (d. h. schlechtere Zuwachsrate oder Milchleistung, Ausfälle), und die Anforderungen an entsprechende Stallsysteme oder Lüftungsanlagen werden in dieser Hinsicht steigen. Indirekt kann auch eine Verschlechterung der Futterqualität (z. B. aus dem Grünland durch eine veränderte Artenzusammensetzung oder aus der Maisproduktion durch verstärkten sekundären Fusariumbefall) mittelfristig die Produktionskosten erhöhen. Grundsätzlich werden auch die Anforderungen an die (häufig relativ kostenintensiven) Kapazitäten der Lagerhaltung steigen, um für eine ev. zunehmende Häufigkeit größerer Ertragsausfälle durch Extremereignisse besser gerüstet zu sein. Das Auftreten neuer klimabedingter Krankheiten im Bereich der Tierhaltung ist ebenfalls ein weitgehend unerforschtes Gebiet.

### **2.4 Dauerkulturen**

Für den Obst- und Weinbau liegen derzeit nur vereinzelte Abschätzungen von Experten zu Anpassungsmaßnahmen vor. So wird beim Wein mit einer Veränderung der regionalen Weinqualitäten und Sortenverschiebungen gerechnet, die bereits ansatzweise stattfinden. Langfristig ist auch die Erschließung neuer Wein- bzw. Obstanbaugebiete in bisher zu kühlen Regionen denkbar. Eine nach wie vor große Unbekannte ist das neue oder veränderte Auftreten von klimasensitiven Schädlingen oder Krankheiten wie z. B. der Rebzikade, die neue Methoden des Pflanzenschutzes oder rasche Reaktionen in der Pflanzenzüchtung erforderlich machen. Bei Obstkulturen könnte eine Zunahme der Gewittertätigkeit, wie es unter einem wärmeren Klima erwartet wird, die Hagelgefahr weiter steigen lassen. Entsprechende Absicherung durch Hagelschutzmaßnahmen bzw. eine Hagelversicherung werden hier besonders an Bedeutung gewinnen. Die Zunahme von Starkniederschlägen hat besonders in Dauerkulturen durch den oft unbedeckten Boden negative Aus-

wirkungen auf die Bodenwassererosion. Hier sind verstärkt Schutzmaßnahmen wie Mulchdecken oder landschaftsgestaltende Maßnahmen zu treffen, die insbesondere in den Hanglagen wichtig sind, um langfristig enorme und irreversible Schäden an der Bodenstruktur und -fruchtbarkeit zu vermeiden.

Natürlich sind etliche Anpassungsmaßnahmen auch auf allgemeiner und überregionaler Ebene, im Bereich der Politik und von Steuerungsmaßnahmen unerlässlich. Dazu zählen neben der Bereitstellung von Notfallfonds für Entschädigungen ein möglichst umfassend abdeckendes Versicherungssystem gegen Schäden aus extremen Witterungsereignissen. Andere Bereiche betreffen Regelungen hinsichtlich effektiver Ressourcennutzung wie der Nutzung von Wasser für Bewässerungszwecke, was in den kommenden Jahrzehnten vor allem in den niederschlagsarmen Regionen sicherlich zunehmend an Bedeutung gewinnen wird. Auch der Ausbau von Monitoringsystemen zur raschen räumlichen Abschätzung von aufgetretenen kulturartenspezifischen Schäden, zur Früherkennung von Schäden oder für Warnhinweise, wie z. B. bei Krankheiten oder Schädlingen, oder der Abschätzung langfristiger Risiken wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese und andere ähnliche Maßnahmen sollten verstärkt Eingang in operationelle Anwendungen finden und für die Praxis entwickelt werden.

### **Anschrift der AutoInnen:**

Univ.-Prof. DI Dr. Josef Eitzinger  
DI Gerhard Kubu  
Mag. Sabina Thaler  
Universität für Bodenkultur Wien  
Institut für Meteorologie  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Tel. +43-1-47654-5610  
E-Mail: josef.eitzinger@boku.ac.at